

T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



CERRAHİ NAVİGASYON ÖLÇÜMLERİNİN STEREO  
FOTOGRAMETRİK YÖNTEMLERLE YAPILMASI VE  
DOĞRULUKLARININ ARAŞTIRILMASI

Doktora Tezi

**Temel DURGUT**

Danışman

**Doç. Dr. Erdem Emin MARAŞ**

II. Danışman

**Doç. Dr. Hadi Hakan MARAŞ**

Cerrahi Navigasyon (CAN) Projesi kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

SAMSUN  
2021

## TEZ KABUL VE ONAYI

Temel DURGUT tarafından, Doç. Dr. Erdem Emin MARAŞ danışmanlığında hazırlanan “Cerrahi Navigasyon Ölçümlerinin Stereo Fotogrametrik Yöntemlerle Yapılması ve Doğruluklarının Araştırılması” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 30.7.2021 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

|                   | Unvanı Adı Soyadı<br>Üniversitesi<br>Ana Bilim/Ana Sanat Dalı   | İmza | Sonuç                               |
|-------------------|---|------|-------------------------------------|
| Başkan            | Prof. Dr. Dursun Zafer ŞEKER<br>İstanbul Teknik Üniversitesi<br>Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı       |      | <input checked="" type="checkbox"/> |
|                   |   |      | Kabul                               |
| Üye               | Prof. Dr. Faik Ahmet SESLİ<br>Ondokuz Mayıs Üniversitesi<br>Harita Mühendisliği Anabilim Dalı             |      | <input type="checkbox"/>            |
|                   |   |      | Ret                                 |
| Üye               | Doç. Dr. Alp Özgün BÖRCEK<br>Gazi Üniversitesi Tıp Fakültesi<br>Beyin ve Sinir Cerrahisi Anabilim Dalı    |      | <input checked="" type="checkbox"/> |
|                   |   |      | Kabul                               |
| Üye<br>(Danışman) | Doç. Dr. Erdem Emin MARAŞ<br>Ondokuz Mayıs Üniversitesi<br>Harita Mühendisliği Anabilim Dalı              |      | <input type="checkbox"/>            |
|                   |   |      | Ret                                 |
| Üye               | Doç. Dr. Sevim ALIŞIR<br>Ondokuz Mayıs Üniversitesi<br>Metalurji ve Malzeme Mühendisliği<br>Anabilim Dalı |      | <input checked="" type="checkbox"/> |
|                   |   |      | Kabul                               |
|                   |   |      | <input type="checkbox"/>            |
|                   |   |      | Ret                                 |

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY

... / ... / ...

Prof. Dr. Ali BOLAT  
Enstitü Müdürü

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Doktora tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

11 / 6 / 2021  
Temel DURGUT

## TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

**Tez Başlığı :** Cerrahi Navigasyon Ölçümlerinin Stereo Fotogrametrik Yöntemlerle Yapılması ve Doğruluklarının Araştırılması

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 11.6.2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 8

Tek kaynak oranı : % 1 çıkmıştır.

11 / 6 / 2021  
Doç. Dr. Erdem Emin MARAŞ

## ÖZET

### CERRAHİ NAVİGASYON ÖLÇÜMLERİNİN STEREO FOTOGRAMETRİK YÖNTEMLERLE YAPILMASI VE DOĞRULUKLARININ ARAŞTIRILMASI

Temel DURGUT

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Harita Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Doktora, Ağustos/2021

Danışman: Doç. Dr. Erdem Emin MARAŞ

Klasik cerrahi yöntemlerin taşıdığı riskleri ve cerrahi müdahale sürelerini en aza indirmek amacıyla günümüz teknolojik gelişmelerine paralel olarak fotogrametri tabanlı cerrahi uygulamalar gün geçtikçe daha da önem kazanmaktadır. Cerrahi müdahalenin yapılacağı bölgenin tamamen açılmasına ihtiyaç duyulmayan durumlarda belirlenen uygun bir noktadan giriş yapmak suretiyle kısa sürede ve daha güvenli cerrahi işlemler yapılabilmektedir.

Bu doktora çalışmasında; ölçüm doğruluklarının hayati öneme sahip olduğu cerrahi operasyonlar için gerekli mekânsal ölçümlerin stereo fotogrametrik yöntemlerle, yüksek doğrulukla ve 3B olarak yapılabildiği Cerrahi Navigasyon Sistemi ve bu sistemin doğruluğunu destekleyen Kamera Kalibrasyon Yazılımı başta olmak üzere diğer alt bileşenleri için gerekli donanım ve ileri düzey yazılımlar bu tezin yazarı tarafından açık kaynak kodu kullanılmadan hayata geçirilerek sistem üzerinde kapsamlı doğruluk araştırmaları yapılmıştır.

Cerrahi navigasyonda; standart bir ölçü biriminde tanımlı bir cerrahi altlık (MRI,CT,vb.) üzerinde, gerçek zamanlı olarak takip edilen, 3B olarak konumları belirlenen ve ulaşılmak istenen bir konuma yönlendirilen hareketli sondalar kullanılmaktadır. Söz konusu sondaların 3B hareketlerinin yüksek doğruluklarla ve gerçek zamanlı olarak konumlandırılabilmesi için kamera odak uzaklığı, kamera görüş açısı, görüntü çözünürlüğü, stereo baz mesafesi, görüntüleme mesafesi, referans yüzey ve sondaların boyut ve geometrileri gibi bileşenlerin sistem tasarımı esnasında en baştan arzu edilen hedeflere göre sağlıklı bir şekilde belirlenmesi ve kullanılan stereo kameraların fotogrametrik kalibrasyona tabi tutulması büyük önem arz etmektedir.

Sistemin tasarımı ve uygulama safhaları detaylı bir şekilde ele alınarak bütün bileşenlerin konumlama doğruluğu üzerindeki etkileri kapsamlı olarak araştırılmış ve bulgular bölümünde sunulmuştur. Bu kapsamda ayrıca; kameralara ait iç yöneltme parametreleri ve sabit olan stereo kamera bazı ileri dengeleme teknikleri kullanılarak yeniden hesaplanmıştır. Çalışma neticesinde; kalibrasyonu yapılmış sistem bileşenlerinin, gerçek zamanlı 3B konum doğruluğunu 2-3 mm seviyelerinden 0,2 mm seviyelerine yükselttiği görülmüş ve ayrıntılı olarak sunulmuştur.

**Anahtar Sözcükler:** Cerrahi navigasyon, Sayısal fotogrametri, Yersel fotogrametri, Kamera kalibrasyonu, EKK dengeleme, Konum doğruluğu, Otomatik obje tespiti, Otomatik görüntü işleme.

## ABSTRACT

### PERFORMING SURGICAL NAVIGATION MEASUREMENTS WITH STEREO PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES AND ACCURACY ASSESSMENT

Temel DURGUT

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Geomatics Engineering

Doctorate, August/2021

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Erdem Emin MARAŞ

Photogrammetric surgical navigation applications are gaining more importance day by day in order to minimize the surgical operation times and the risk of classical methods with respect to the technological developments. In case there is no need to open whole related anatomic location of the body, more reliable surgical operations in shorter times can be performed by an entry from a suitable point.

In this doctoral study; Especially Surgical Navigation System that can perform highly accurate 3D spatial measurements based on stereo photogrammetric techniques for critical surgical operations and Camera Calibration Software that supports the system accuracy, all required hardware and advanced softwares which are necessary for sub-components are designed and developed by the author of this thesis without any open-source coding and comprehensive accuracy assessments are performed on related system and sub-components.

In surgical navigation; moving surgical probes which are periodically tracked in real-time, located in 3D and navigated to a desired location on a layer (MRI,CT,etc.) that is defined in a standard measuring unit are used. It is of vital importance to determine and define the critical components such as focal length, field of view, image resolution, stereo base length, acquisition distance, size and geometry of the reference frame and probes at the beginning in system design phase according to desired system objectives and also to perform photogrammetric camera calibrations for real-time 3D movements of the probes to be located highly accurate.

Handling the system design and implementation phases in detail, the effects of all system components and parameters on measurement accuracies are researched, analyzed and presented in findings section. Additionally, the effects of camera calibrations for measuring accuracy of the system is also analyzed. For this purpose; camera interior orientation parameters and stereo camera base length are re-calculated with the advanced adjustment and optimization techniques. As a result of this doctoral study; it is observed and presented in detail that the calibrated system components and parameters have brought the real-time 3D spatial measurement accuracy from 2-3 mm level to 0,2 mm level.

**Keywords:** Surgical navigation, Digital photogrammetry, Close-range photogrammetry, Camera calibration, Least-squares adjustment, Geolocation accuracy, Automatic object detection, Automatic image processing.

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Doktora çalışmasında tecrübe ve desteklerini esirgemeyen kıymetli hocam ve danışmanım Doç. Dr. Erdem Emin MARAŞ'a, Prof. Dr. Faik Ahmet SESLİ'ye ve Prof. Dr. Fevzi KARSLI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunma jürisinde bulunmalarından onur duyduğum, tez çalışmasına önemli katkılar sağlayan Prof. Dr. Dursun Zafer ŞEKER, Doç. Dr. Alp Özgün BÖRCEK ve Doç. Dr. Sevim ALIŞIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen Cerrahi Navigasyon Projesinin (TÜBİTAK 1003, Proje No:113S094) tamamlanmasına katkı sağlayan bu tez çalışmasına sağladığı desteklerden dolayı TÜBİTAK, Çankaya Üniversitesi, Atılım Üniversitesi ve Gazi Üniversitesine teşekkürlerimi sunarım.

Meslek hayatıma örnek aldığım, genç yaşta bizlere haritacılığı sevdiren ve ayrıca Çankaya Üniversitesi Konumsal/Medikal Modelleme ve Simülasyon Laboratuvarında bulunan sistemleri ve yardımcı ekipmanları kullanmamda desteğini esirgemeyen eş danışmanım Doç. Dr. Hadi Hakan MARAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında ve yazılımın geliştirilmesinde çokça üzerinde durduğum dengeleme hesabı konularında her fırsatta bilgi ve tecrübelerine başvurduğum dengeleme hesabı hocam Dr. Müh. Coşkun DEMİR'e, stereo fotogrametri konularında değerli tecrübelerini esirgemeyen kıymetli büyüğüm Dr. Müh. Ali Coşkun KİRACI'ya ve yazılım geliştirme aşamasındaki değerli katkılarından dolayı mesai arkadaşım Dr. Müh. Mustafa CANIBERK'e ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her zaman başımın tacı olan Anneme ve Babama, bana verimli ve huzurlu bir çalışma ortamı sunan, hoşgörü ve desteğini esirgemeyen biricik eşim Emine DURGUT'a ve babaları olarak bilimsel anlamda örnek olabilmek adına kıymetli zamanlarından tasarruf ettiğim canım kuzucuklarım Yağız, Nehir ve Melih'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimine başlarken aramızda olan, şimdilerde ise çok özlediğim canım kardeşim Yakup DURGUT, mekânın cennet olsun. Sevgi ve Rahmetle...

Temel DURGUT

## İÇİNDEKİLER

|   |           |
|---|-----------|
| TEZ KABUL VE ONAYI .....  | i         |
| BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI .....                                    | ii        |
| TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI .....                              | ii        |
| ÖZET .....  | iii       |
| ABSTRACT .....  | iv        |
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....   | v         |
| İÇİNDEKİLER .....   | vi        |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....   | viii      |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....   | ix        |
| TABLolar DİZİNİ .....   | xii       |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2. FOTOGRAMETRİ.....</b>   | <b>4</b>  |
| 2.1. Fotogrametrinin Tanımı .....                                       | 4         |
| 2.2. Fotogrametrinin Görev ve Kapsamı .....                             | 4         |
| 2.3. Fotogrametrinin Matematiksel Temelleri.....                        | 5         |
| 2.3.1. Düzlemde 2 Boyutlu Benzerlik ve Afin Dönüşümü.....               | 9         |
| 2.3.2. Uzayda 3 Boyutlu Benzerlik ve Afin Dönüşümü .....                | 11        |
| 2.3.3. Eş-Doğrusallık (Kolinearite) Koşulu .....                        | 15        |
| 2.3.4. Eş-Düzlemsellik (Koplanarite) Koşulu.....                        | 18        |
| 2.4. Sayısal Fotogrametri.....  | 19        |
| 2.5. Kamera Kalibrasyonu.....   | 22        |
| 2.5.1. Görüntü Bozulmaları (Distorsiyonları).....                       | 24        |
| 2.5.2. Işın Demetleri ile Blok Dengeleme .....                          | 27        |
| 2.5.3. Kolinearite Eşitliklerinin Doğrusallaştırılması .....            | 29        |
| 2.5.4. Direkt Lineer Dönüşüm (Direct Linear Transformation - DLT) ..... | 30        |
| 2.6. Yersel Fotogrametri.....   | 30        |
| <b>3. CERRAHİ NAVİGASYON SİSTEMLERİ .....</b>                           | <b>31</b> |
| 3.1. Cerrahi Navigasyonun Başlıca Avantajları .....                     | 31        |
| 3.2. Cerrahi Navigasyonun Faydalı Olduğu Durumlar .....                 | 32        |
| 3.3. Haptik Robotik Sistemler .....                                     | 33        |
| 3.4. Optik Sistemler.....   | 34        |
| <b>4. SİSTEM TASARIMI.....</b>  | <b>35</b> |
| 4.1. Sistemin Genel Tasarımı .....                                      | 35        |
| 4.2. Sistem Mimarisi ve İş Akışı .....                                  | 36        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.3. Ölçüm Tekniği ve Sistem Bileşenleri.....                            | 38         |
| 4.4. Donanım Gereksinimleri .....  | 39         |
| 4.4.1. Kamera.....   | 39         |
| 4.4.2. Referans Yüzey.....   | 40         |
| 4.4.3. Hareketli Sonda .....   | 43         |
| 4.4.4. Gümüş (Küre) Toplar .....   | 45         |
| 4.5. Görüntüleme Geometrisinin Tasarımı.....                             | 48         |
| 4.5.1. Stereo Baz Aralığının Belirlenmesi .....                          | 48         |
| 4.5.2. Etkili Kullanım Alanının Belirlenmesi.....                        | 49         |
| 4.6. Yazılım Gereksinimleri .....  | 51         |
| <b>5. UYGULAMA .....</b>   | <b>52</b>  |
| 5.1. Uygulama Ekipmanları.....   | 52         |
| 5.2. Yazılım Geliştirme .....  | 54         |
| 5.2.1. Video Görüntülerden Otomatik Obje Tespit Yazılımı .....           | 55         |
| 5.2.2. Cerrahi Navigasyon Sistemi Yazılımı .....                         | 61         |
| 5.2.3. Kamera Kalibrasyon ve Stereo Test Yazılımı .....                  | 91         |
| 5.3. Fotogrametrik Kamera Kalibrasyonu.....                              | 93         |
| 5.4. Stereo Kamera Baz Kalibrasyonu .....                                | 98         |
| 5.5. Sonda ile Gerçek Zamanlı Ölçüm ve Yüzey Toplama Testleri.....       | 101        |
| <b>6. BULGULAR.....</b>  | <b>103</b> |
| 6.1. Sistem Doğruluğunu Etkileyen Faktörler.....                         | 103        |
| 6.1.1. Otomatik Obje Tespit Doğrulukları.....                            | 104        |
| 6.1.2. Kamera Odak Uzaklığının Doğruluklara Etkisi .....                 | 107        |
| 6.1.3. Kamera Kalibrasyonunun Doğruluklara Etkisi .....                  | 108        |
| 6.1.4. Stereo Kamera Baz Kalibrasyonunun Doğruluklara Etkisi .....       | 113        |
| 6.1.5. Referans Yüzeyin Boyut ve Geometrisinin Doğruluklara Etkisi ..... | 115        |
| 6.1.6. Sonda Geometrisinin Doğruluklara Etkisi.....                      | 116        |
| 6.2. Gerçek Zamanlı Stereo Ölçüm Doğrulukları .....                      | 117        |
| <b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>                                      | <b>120</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>   | <b>125</b> |
| <b>EKLER.....</b>  | <b>130</b> |
| EK-1 Kolinearite Eşitliklerinin Doğrusallaştırılması .....               | 130        |
| EK-2 Kalibrasyon Dengelemelerinde Kullanılan Ölçümler (Sol Kamera).....  | 131        |
| EK-3 Kalibrasyon Dengelemelerinde Kullanılan Ölçümler (Sağ Kamera) ..... | 133        |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### SİMGELER

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| $c$                             | Odak Uzaklığı   |
| $x_0, y_0$                      | Asal noktanın görüntü koordinatları                     |
| $k_1, k_2, k_3$                 | Çapsal distorsiyon katsayıları                          |
| $p_1, p_2$                      | Teğetsel distorsiyon katsayıları                        |
| $b_1, b_2$                      | Diferansiyel ölçek distorsiyon katsayıları              |
| $r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33}$ | Açısal dönüklük elemanları                              |
| $m$                             | Ölçek faktörü   |
| $x, y$                          | Görüntü koordinatları                                   |
| $X_0, Y_0, Z_0$                 | İzdüşüm merkezinin obje uzay koordinatları (Ötelemeler) |
| $\omega, \varphi, \kappa$       | R dönme matrisinin üç dönme açısı (Dönüklükler)         |
| $\delta x, \delta y$            | Mercek distorsiyon düzeltmeleri                         |

### KISALTMALAR

|       |   |
|-------|---|
| 2B    | İki Boyutlu   |
| 3B    | Üç Boyutlu  |
| İYP   | İç Yönelme Parametreleri                                    |
| DYP   | Dış Yönelme Parametreleri                                   |
| YKN   | Yer Kontrol Noktası   |
| CT    | Computerized Tomography                                     |
| MRI   | Magnetic Resonance Imaging                                  |
| DICOM | Digital Imaging and Communications in Medicine              |
| FPS   | Frames Per Second   |
| IR    | InfraRed  |
| NIR   | Near InfraRed   |
| DLT   | Direct Linear Transformation                                |
| GUI   | Graphic User Interface                                      |
| ISPRS | International Society for Photogrammetry and Remote Sensing |
| LED   | Light Emitting Diode  |
| SDK   | Software Development Kit                                    |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|   |    |
|---|----|
| Şekil 1.1. Fotogrametrik Cerrahi Navigasyon Sistemi.....                              | 1  |
| Şekil 2.1. Uzayın merkezi izdüşümü .....  | 5  |
| Şekil 2.2. Noktaların uzayda merkezi izdüşümü (mono).....                             | 6  |
| Şekil 2.3. Noktaların uzayda merkezi izdüşümü (stereo) .....                          | 6  |
| Şekil 2.4. Doğruların uzayda merkezi izdüşümü (mono) .....                            | 7  |
| Şekil 2.5. Doğruların uzayda merkezi izdüşümü (stereo).....                           | 7  |
| Şekil 2.6. Merkezi izdüşümde önemli nokta ve doğrular .....                           | 8  |
| Şekil 2.7. Düzlem koordinat sistemleri arasında dönüşüm .....                         | 9  |
| Şekil 2.8. İki boyutlu düzlemsel dönmenin matrisyel gösterimi.....                    | 9  |
| Şekil 2.9. Düzlemde 2B benzerlik ve afin dönüşümünün matrisyel gösterimi.....         | 10 |
| Şekil 2.10. Koordinat eksenleri arasındaki dönüklük açıları .....                     | 11 |
| Şekil 2.11. Üç boyutlu uzaysal dönmenin matrisyel gösterimi.....                      | 11 |
| Şekil 2.12. Uzaysal dönmenin 3 ekseninde matrisyel gösterimi.....                     | 12 |
| Şekil 2.13. Uzaysal dönme matrisi.....  | 12 |
| Şekil 2.14. Uzayda 3B benzerlik ve afin dönüşümünün matrisyel gösterimi .....         | 13 |
| Şekil 2.15. Görüntü ve obje uzay koordinatları arasında benzerlik dönüşümü .....      | 14 |
| Şekil 2.16. Eş-doğrusallık koşulunun obje uzay koordinatları cinsinden ifadesi .....  | 16 |
| Şekil 2.17. Eş-doğrusallık koşulunun görüntü koordinatları cinsinden ifadesi .....    | 16 |
| Şekil 2.18. Eş-doğrusallık (kolinearite) denklemleri .....                            | 17 |
| Şekil 2.19. Eş-düzlemsellik koşulunun vektörel gösterimi.....                         | 18 |
| Şekil 2.20. Sayısal algılayıcı izdüşüm düzlemi.....                                   | 19 |
| Şekil 2.21. Piksel ve metrik görüntü koordinat sistemi .....                          | 20 |
| Şekil 2.22. Piksel ve metrik görüntü koordinat sistemleri arasındaki ilişki.....      | 21 |
| Şekil 2.23. Çapsal (Radyal) distorsiyon .....   | 24 |
| Şekil 2.24. Teğetsel (Tangential) distorsiyon .....                                   | 24 |
| Şekil 2.25. Çapsal distorsiyonun oluşumu .....  | 25 |
| Şekil 2.26. Çapsal distorsiyon etkileri.....  | 25 |
| Şekil 3.1. Haptik robotik sistem örneği.....  | 33 |
| Şekil 3.2. Haptik robotik sistem temel bileşenleri .....                              | 33 |
| Şekil 3.3. Optik cerrahi navigasyon sistemi örneği.....                               | 34 |
| Şekil 4.1. Geliştirilen yazılımlara ait tasarım garafıği .....                        | 36 |
| Şekil 4.2. Geliştirilen yazılımlara ait iş akış garafıği .....                        | 37 |
| Şekil 4.3. Ölçüm tekniğinin yersel fotogrametrik olarak gösterimi.....                | 38 |
| Şekil 4.4. OptTrack Slim3U ve V120 Duo Kamera .....                                   | 39 |
| Şekil 4.5. Tasarımı yapılan referans yüzey .....                                      | 41 |
| Şekil 4.6. Çalışmalarda kullanılan NDI marka referans yüzey .....                     | 42 |
| Şekil 4.7. Tasarımı yapılan hareketli sonda .....                                     | 43 |
| Şekil 4.8. Çalışmalarda kullanılan NDI marka sonda .....                              | 44 |
| Şekil 4.9. Gümüş kaplı (küre) toplar .....  | 45 |
| Şekil 4.10. Kürenin izdüşümü ve ışınların uzayda kesişim noktası.....                 | 46 |
| Şekil 4.11. Ölçüm ortamına ait örnek stereo görüntüler .....                          | 47 |
| Şekil 4.12. Aynı mesafede baza bağlı olarak derinlik belirleme hatası .....           | 48 |
| Şekil 4.13. Kamera optik eksenlerinin birbirine paralel olması durumu .....           | 49 |
| Şekil 4.14. Kamera optik eksenlerinin çakışık (içe dönük) olması durumu .....         | 49 |
| Şekil 4.15. Optik eksenlerin 3 metre mesafede kesişimi ile oluşan stereo alanlar..... | 50 |
| Şekil 4.16. Yazılımlarda kullanılan kütüphaneler.....                                 | 51 |
| Şekil 5.1. Canon PowerShot SX220 HS fotoğraf makinası.....                            | 52 |
| Şekil 5.2. İlk çalışmalarda kullanılan amatör donanım ve ekipmanlar .....             | 52 |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 5.3. İleri düzey çalışmalarda kullanılan donanım ve ekipmanlar .....             | 53 |
| Şekil 5.4. Geliştirilen yazılımlar ve alt modülleri .....                              | 54 |
| Şekil 5.5. OptiTrack kamera bağlantısı kod örneği .....                                | 55 |
| Şekil 5.6. Optitrack OptiHub kamera bağlantısı kod örneği.....                         | 56 |
| Şekil 5.7. Piksel koordinatlarını eş-zamanlı olarak alan kod örneği.....               | 57 |
| Şekil 5.8. Her anlık görüntü çifti için C# tarafına aktarılan veriler .....            | 58 |
| Şekil 5.9. C++ tarafındaki senkronize bağlantı kodu.....                               | 59 |
| Şekil 5.10. C# tarafındaki senkronize bağlantı kodu .....                              | 59 |
| Şekil 5.11. Gerçek zamanlı ve dinamik olarak elde edilen görüntü koordinatları.....    | 60 |
| Şekil 5.12. Cerrahi Navigasyon Yazılımı Ana Modülü .....                               | 61 |
| Şekil 5.13. Ana modül sistematığı .....  | 62 |
| Şekil 5.14. Örnek donanım tanıtım dosyaları .....                                      | 63 |
| Şekil 5.15. Ana modül gerçek zamanlı ölçüm döngüsü.....                                | 64 |
| Şekil 5.16. Geometri tabanlı otomatik obje tespit ve nokta tanımlama .....             | 65 |
| Şekil 5.17. Görüntü koordinatlarının ana modül üzerinde gösterimi (Referans).....      | 66 |
| Şekil 5.18. Görüntü koordinatlarının ana modül üzerinde gösterimi (Sonda).....         | 66 |
| Şekil 5.19. Görüntü koordinatlarına getirilen düzeltmelere ilişkin kodlama.....        | 68 |
| Şekil 5.20. Gerçek zamanlı DYP için EKK dengelemesi parametreleri.....                 | 68 |
| Şekil 5.21. Yaklaşık değerlerin hesaplanması.....                                      | 69 |
| Şekil 5.22. Yaklaşık değerlerin hesaplanması için kullanılan kodlama.....              | 69 |
| Şekil 5.23. Dizayn matrisinin oluşturulması için kullanılan kodlama .....              | 71 |
| Şekil 5.24. Dolaylı model dengelemesi için kullanılan kodlama.....                     | 71 |
| Şekil 5.25. Ana modül üzerinde dinamik olarak DYP gösterimi.....                       | 72 |
| Şekil 5.26. Ana modül üzerinde stereo kamera bazı.....                                 | 72 |
| Şekil 5.27. Senkronize görüntülere ait dönüklük matrisleri.....                        | 73 |
| Şekil 5.28. Sonda üzerindeki gümüş topların obje uzay koordinatlarının hesabı .....    | 74 |
| Şekil 5.29. Sondaya ait gümüş top koordinatlarının dinamik olarak gösterimi .....      | 75 |
| Şekil 5.30. Sonda üzerinde kontrol edilen çapraz mesafeler .....                       | 75 |
| Şekil 5.31. Objeye uzay koordinat sistemi ve sonda lokal koordinat sistemi.....        | 76 |
| Şekil 5.32. Sonda dönüklüğü için EKK dengelemesi parametreleri.....                    | 76 |
| Şekil 5.33. Sonda dönüklüğünün dengelemesi için kullanılan kodlama.....                | 77 |
| Şekil 5.34. Sonda dönüklüğünün dengelemesi için kullanılan kodlama.....                | 78 |
| Şekil 5.35. Sonda ucu anlık koordinatlarının ana modül üzerinde gösterimi .....        | 79 |
| Şekil 5.36. Alt modüllere erişim paneli .....  | 79 |
| Şekil 5.37. Ölçüm yönetim paneli.....  | 80 |
| Şekil 5.38. Ana modül üzerinde manuel mod ile ölçüm .....                              | 80 |
| Şekil 5.39. Görüntü Akış ve Tespit Kontrol Modülü.....                                 | 81 |
| Şekil 5.40. Görüntü akış testi için kullanılan kodlama .....                           | 82 |
| Şekil 5.41. Kamera Detay Görüntüleme Modülü.....                                       | 83 |
| Şekil 5.42. Kalibre edilmiş parametreler ve distorsiyonların ayrıntılı gösterimi ..... | 84 |
| Şekil 5.43. Distorsiyon gösterimi için kullanılan kodlama örneği.....                  | 85 |
| Şekil 5.44. Sonda Ucu Eksenleme (Pivot) Modülü.....                                    | 86 |
| Şekil 5.45. Sonda ucu eksenleme için kullanılan kodlama örneği.....                    | 88 |
| Şekil 5.46. Görüntüleme ve Navigasyon Modülü.....                                      | 89 |
| Şekil 5.47. Ayarlar Modülü.....  | 90 |
| Şekil 5.48. Kamera Kalibrasyon ve Stereo Test Yazılımı .....                           | 91 |
| Şekil 5.49. Kalibrasyon levhası.....   | 95 |
| Şekil 5.50. Kamera kalibrasyonu için dizayn matrisinin oluşturulması.....              | 96 |
| Şekil 5.51. Kamera kalibrasyonu EKK dengelemesi için kodlama .....                     | 96 |
| Şekil 5.52. Kamera kalibrasyon dengelemesi örnek sonuç dosyası.....                    | 97 |

|   |     |
|---|-----|
| Şekil 5.53. Ölçümler esnasında referans yüzey ve sondanın görünümü.....         | 98  |
| Şekil 5.54. Stereo kamera bazının kalibrasyon tekniği .....                     | 100 |
| Şekil 5.55. Kafa modeli ve sonda ile toplanan 3B yüzey.....                     | 102 |
| Şekil 5.56. Örnek bir biblo ve sonda ile toplanan 3B yüzey.....                 | 102 |
| Şekil 6.1. Farklı mesafelerden çekilen gri tonlu ve IR görüntüler .....         | 104 |
| Şekil 6.2. Görüntüleme mesafesi 75 cm için manuel ve otomatik okumalar.....     | 105 |
| Şekil 6.3. Görüntüleme mesafesi 1,5 m için manuel ve otomatik okumalar .....    | 106 |
| Şekil 6.4. Görüntü koordinatlarındaki hatanın uzay koordinatlarına etkisi ..... | 107 |
| Şekil 6.5. Sonda üzerinde irdelenen çapraz mesafeler .....                      | 109 |
| Şekil 6.6. Gerçek zamanlı ölçüm testlerinde kullanılan kumpas .....             | 117 |
| Şekil 6.7. Görüntüleme mesafesi 1 metre iken toplanan 3B yüzey ve noktalar..... | 118 |
| Şekil 6.8. Sonda okuma değerlerine ait dağılım grafiği-1 .....                  | 119 |
| Şekil 6.9. Sonda okuma değerlerine ait dağılım grafiği-2 .....                  | 119 |



## TABLolar DİZİNİ

|  |     |
|--|-----|
| Tablo 4.1. OptiTrack Slim3U kameranın teknik özellikleri .....                   | 39  |
| Tablo 4.2. Gerçek zamanlı EKK dengeleme karakteristiği.....                      | 41  |
| Tablo 5.1. Gerçek zamanlı DYP çözümü için EKK dengeleme karakteristiği.....      | 70  |
| Tablo 5.2. Sonda dönüklüğü için EKK dengeleme karakteristiği.....                | 77  |
| Tablo 5.3. Eksenleme için yapılan EKK dengeleme karakteristiği .....             | 88  |
| Tablo 5.4. İç yöneltme parametreleri listesi.....                                | 93  |
| Tablo 5.5. Kamera Kalibrasyonu için yapılan EKK dengeleme karakteristiği.....    | 93  |
| Tablo 5.6. Baz kalibrasyonu için yapılan EKK dengeleme karakteristiği .....      | 99  |
| Tablo 6.1. Görüntüleme mesafesi 75 cm olan görüntüler için elde edilen sonuçlar  | 105 |
| Tablo 6.2. Görüntüleme mesafesi 1,5 m olan görüntüler için elde edilen sonuçlar. | 106 |
| Tablo 6.3. OptiTrack Slim3U kameranın teknik özellikleri .....                   | 108 |
| Tablo 6.4. Kamera kalibrasyon sonuçları .....                                    | 108 |
| Tablo 6.5. Kamera kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi-1.....       | 110 |
| Tablo 6.6. Kamera kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi-2.....       | 110 |
| Tablo 6.7. Kamera kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi-3.....       | 110 |
| Tablo 6.8. Kamera kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi-4.....       | 111 |
| Tablo 6.9. Kamera kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi-5.....       | 111 |
| Tablo 6.10. Kamera kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi (özet)..... | 112 |
| Tablo 6.11. Stereo kamera baz kalibrasyonu sonucu .....                          | 113 |
| Tablo 6.12. Baz kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi-1 .....        | 113 |
| Tablo 6.13. Baz kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi-2 .....        | 114 |
| Tablo 6.14. Düzlemsellik şartının anlık ölçüm doğruluklarına etkisi.....         | 116 |
| Tablo 6.15. Görüntüleme mesafesi 1 metre iken ölçüm değerleri ve doğrulukları..  | 118 |

## 1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelere paralel olarak sayısal fotogrametrik yöntemlerle cerrahi uygulamaların 3B ve gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmesi son yıllarda yeni bir boyut kazanmıştır. Cerrahi Navigasyon Sistemleri, klasik cerrahi yöntemlerin taşıdığı riskleri ve cerrahi müdahale sürelerini en aza indirmek için günümüz teknolojik gelişmelerine paralel olarak giderek daha da ihtiyaç duyulan bir alan haline gelmektedir. Özellikle cerrahi müdahalenin yapılacağı bölgenin tamamen açılmasına ihtiyaç duyulmayan durumlarda belirlenen uygun bir noktadan giriş yapmak suretiyle kısa sürede ve daha güvenli bir şekilde cerrahi işlemler yapılabilmektedir. Söz konusu cerrahi navigasyonda; standart bir ölçü biriminde tanımlı bir altlık uzay üzerinde (MR, Tomografi, vb.) fotogrametrik teknikler ve ileri dengeleme yöntemleri yardımıyla gerçek zamanlı olarak takip edilen (3B konumları anlık olarak belirlenen) ve ulaşılmak istenen bir konuma yönlendirilen hareketli sondalar kullanılmaktadır. Örnek bir fotogrametrik cerrahi navigasyon sistemi Şekil 1.1’de görülmektedir (NDI, 2021).



Şekil 1.1. Fotogrametrik Cerrahi Navigasyon Sistemi

Bu doktora çalışmasında; bilimsel teknik olarak insan gözünü esas alan stereo (3B) görüş, stereo fotogrametri ve En Küçük Kareler (EKK) yöntemiyle dengeleme, takip edilen hareketli obje olarak ise cerrahın kullandığı sondalar esas alınmıştır.

Konumlamanın sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için sondalar üzerinde uygun geometrik dağılıma sahip gümüş toprak bulunmaktadır ve bu gümüş toprakların gerçek zamanlı (anlık) ve otomatik tespitinin daha kolay yapılabilmesi için 850 nm kızılötesi (NIR) bantta alım yapan kameralar kullanılmaktadır. Söz konusu kameralar belirli bir baz aralığında eş zamanlı olarak ameliyat ortamını stereo olarak görüntülemektedir.

Stereo görüntüleme prensibine dayalı olarak, her iki kamera görüntüsü içerisine giren hareketli sonda üzerindeki gümüş toprakların görüntü koordinatlarını kullanarak bu toprakların ameliyat uzayında tanımlanan bir uzay koordinat sistemindeki 3B koordinatlarının hesaplanması için 3B benzerlik dönüşümü kullanılmaktadır. Söz konusu benzerlik dönüşümünün yapılabilmesi için öncelikle her iki kameranın obje uzay koordinat sistemindeki öteleme ve dönüklük parametrelerinin (dış yöneltme parametrelerinin) ileri dengeleme teknikleri ile gerçek zamanlı olarak hesaplanması gerekmektedir. Bu dengelemenin yapılabilmesi için ise uzay koordinat sistemindeki 3B koordinatları (X, Y, Z) hassas olarak önceden bilinen en az dört adet sabit referans noktasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için dört köşesinde gümüş toprak bulunan bir referans yüzey (düzlem) kullanılmaktadır.

Referans düzlem, operasyona başlamadan önce hasta ile birlikte sabitlenmekte ve ölçümlerin yapılacağı 3B obje uzay koordinat sistemi bu düzlem üzerinde tanımlanmaktadır. Dolayısıyla; cerrahi müdahale boyunca hasta, tanımlanan obje uzay koordinat sistemi içerisinde aynı konumda bulunmaktadır. Burada önemli olan nokta; dış yöneltme parametreleri sürekli ve gerçek zamanlı olarak çözüldüğünden, ihtiyaç halinde kamera platformunun stereo görüşün uygun olacağı farklı bir konuma çekilebilmesidir. Bu durum hastanın uzay koordinat sistemindeki konumunu değiştirmemekle birlikte sadece her iki kameraya ait referans yüzeyde tanımlı olan uzay koordinat sistemindeki öteleme ve dönüklük parametrelerini değiştirmektedir. Yukarıda da belirtildiği üzere söz konusu dış yöneltme parametrelerinin dengeleme ile hesaplanması gerçek zamanlı olarak saniyede çekilen her senkronize görüntü çifti için yapılmaktadır (Örn: Saniyede 120 kare çeken kameralar için saniyede 120 kez). Ölçümlerin bu yöntemle yapılmasının sağladığı avantaj ise; fark edilmeyecek kadar küçük fakat ölçüm doğruluklarını etkileyecek kadar önemli olan olası istem dışı kamera platformu hareketlerinin olumsuz etkilerinin önüne geçilerek konumlama hassasiyeti için ilave bir kontrol mekanizması oluşturulması ve operasyon esnasında isteğe bağlı kamera platformu hareketinin de mümkün hale getirilmesidir.

Cerrahın elindeki hareketli sondanın 3B konumunu gerçek zamanlı olarak takip edebilmek için ise; sonda üzerinde bulunan en az 4 adet gümüş topa ait sağ ve sol görüntü koordinatları gerçek zamanlı görüntü işleme ile tespit edilmekte ve yukarıda elde edilen dış yöneltme parametreleri ile uzaysal benzerlik dönüşümü (eş-doğrusallık) bağıntıları birlikte kullanılarak 3B koordinatları hesaplanmaktadır. Hareketli sonda üzerindeki gümüş toplar ile sonda ucunun kendi içerisinde lokal koordinatları ve birbirleri arasındaki çapraz mesafelerin hassas olarak önceden bilinmesinden yola çıkarak yine EKK yöntemiyle dolaylı model dengelemesi yardımıyla 3B benzerlik dönüşümü yapılarak sonda uç noktasının uzay koordinatları hesaplanmaktadır. Bu dengeleme esansında sonda üzerinde bulunan gümüş topların eş-düzlemselliği ve önceden bilinen çapraz mesafeleri kullanılarak konum doğruluğu iyileştirilmektedir.

Hastanın cerrahi müdahale öncesinde oluşturulmuş 3B modelinin (MR, CT, vb.) uzay koordinat sistemine bağlanması için ise, cerrahın elindeki hareketli sondanın hasta üzerinde hassas bir şekilde gezdirilmesi suretiyle yüzeyi temsil edebilecek yeterli sayıda noktanın toplanmasını müteakip otomatik yüzey çakıştırma algoritmaları yardımıyla yapılmaktadır. Bundan sonrası ise cerrahın elindeki sondanın anlık olarak hesaplanan uzay koordinatlarının yine aynı uzaya bağlanmış olan 3B model üzerinde hangi noktaya düştüğünün ekran üzerinde gösterilmesi ve istenilen noktaya yönlendirilmesidir. Müdahalenin yapılacağı bölgeye ulaşmak için ise uygun bir noktadan giriş yapılarak cerrahi müdahale yapılabilmektedir.

Ölçüm doğruluklarının hayati öneme sahip olduğu cerrahi navigasyon uygulamalarında yukarıda özet olarak anlatılan işlem adımlarının yüksek konum doğrulukları ile yapılabilmesi için uzayın merkezi izdüşümü ve uzaysal benzerlik dönüşümünü esas alan stereo fotogrametrik altyapının sağlıklı bir şekilde kurulması gerekmektedir. Söz konusu geometri ne kadar sağlıklı oluşturulursa o nispette doğru ve güvenilir konum doğrulukları elde edilmektedir. Bu geometriyi sağlıklı olarak ortaya koymanın yolu ise kamera kalibrasyonundan geçmektedir. Dolayısıyla bu doktora çalışmasında; cerrahi navigasyon ölçümlerinin yanı sıra kamera ve sistem kalibrasyonu konuları da detaylı ve uygulamalı olarak ele alınmıştır. Cerrahi Navigasyon Sistemi kapsamında ortaya konulan yazılımlar tezin yazarı tarafından hiçbir açık kaynak kodu kullanılmadan C++ ve C# dillerinde geliştirilmiştir. Söz konusu sistem kullanılarak operasyon uzayında kullanılan sondaların gerçek zamanlı ve 3B konumları  $\pm 0,2$  mm duyarlılığında tespit edilebilmektedir.

## **2. FOTOGRAMETRİ**

### **2.1. Fotogrametrinin Tanımı**

Fotogrametri kelimesi eski Yunancada; fotos (ışık), gramma (çizim) ve metron (ölçme) kelimelerinin birleşmesinden meydana gelmiş olup, "ışık yardımıyla çizerek ölçme" anlamına gelmektedir.

Fotogrametri; kameralar veya çeşitli algılayıcılarla, elektromanyetik enerji yardımıyla yerden, havadan veya uydudan alınan, fotoğrafik veya başka şekildeki görüntülerinden, Analog (aletsel), Analitik (yarı-sayısal) veya Dijital (sayısal) yöntemlerle güvenilir ölçüler alarak ve/veya yorumlar yaparak, fiziksel objelerin şekil, boyut ve konumu ile çevrenin çeşitli özelliklerini belirleme ve güvenilir bilgiler elde etme bilimi ve sanatıdır.

### **2.2. Fotogrametrinin Görev ve Kapsamı**

Fotogrametrinin görevi; görüntüler alarak geometrik, semantik ve fiziksel bilgilerin toplanması, değerlendirilmesi ve bunların uygun biçimde kaydedilmesidir. Söz konusu objelerin duran ya da hareketli olması, çok küçük veya çok büyük olması, dokunulamayan veya yanına varılamayan olması görüntü alımı için engel oluşturmadığından bu durumlardaki objeler de fotogrametri yöntemi ile değerlendirilir. Fotogrametrinin uygulama alanları;

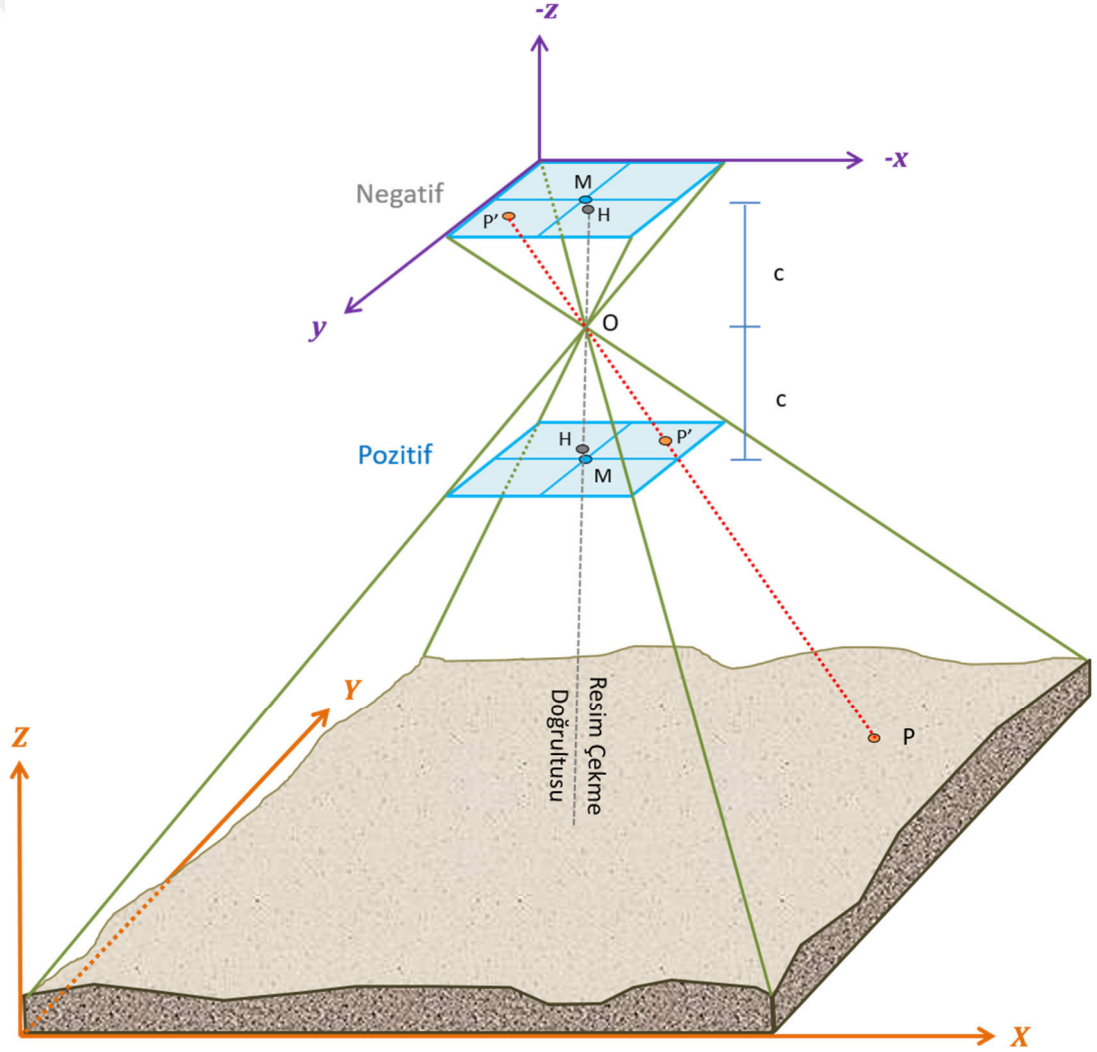
- Haritacılık
- Üç boyutlu modelleme ve sanal gerçeklik
- Mobil ölçme ve harita yapımı
- Endüstri ve mühendislik ölçmeleri
- Karmaşık endüstriyel yapıların modellenmesi
- Mimarlık ve arkeoloji uygulamaları
- Yasal sorunların incelenmesine ilişkin uygulamalar
- Yerötesi fotogrametri uygulamaları
- Tıbbi ve cerrahi uygulamalar

Olarak ana başlıklar halinde sınıflandırılabilir.

### 2.3. Fotogrametrinin Matematiksel Temelleri

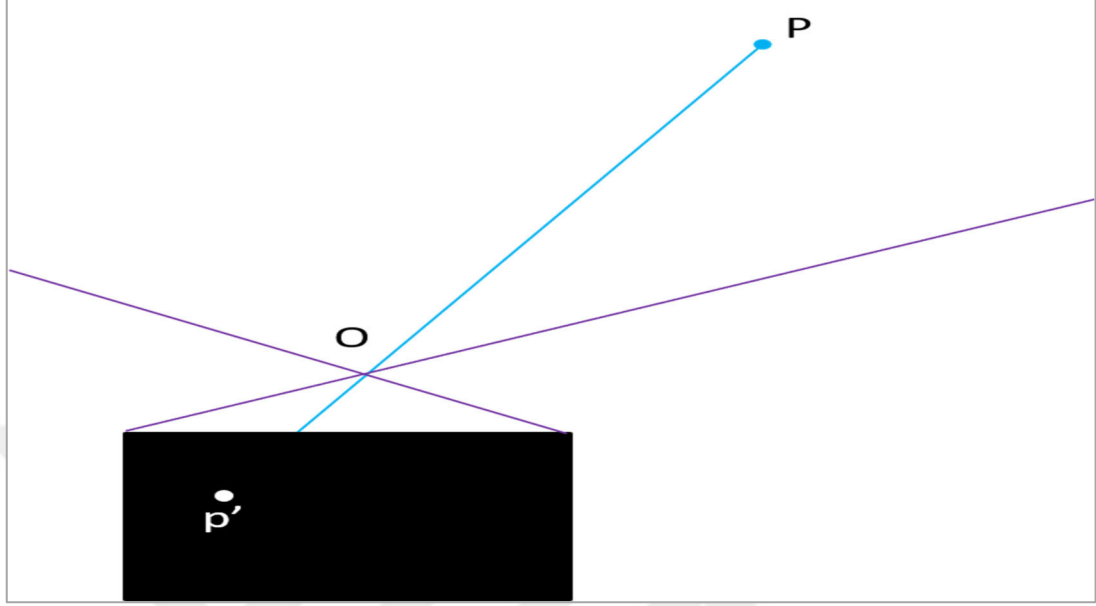
Fotogrametrinin matematik modeli merkezsiz izdüşümdür. Merkezi izdüşüm; uzaydaki noktaların izdüşüm merkezi adı verilen bir noktadan geçen doğrularla, bir düzlem üzerine veya başka bir uzay bölümüne izdüşürülmesidir (Gürbüz, 2006).

Fotogrametrinin temelini oluşturan fotoğraf; uzaydaki noktaların, bir düzlem üzerine, o düzlem dışındaki bir noktadan geçen ışınlarla (doğrularla) Şekil 2.1'de gösterildiği gibi izdüşürülmesidir. Merkezi izdüşüm; izdüşüm merkezinin konumu ve izdüşüm düzlemlerinin birbirlerine göre konumu bakımından farklılıklar gösterir. İzdüşüm merkezi, izdüşüm düzlemlerinin dışında olursa pozitif görüntü, arasında olursa negatif görüntü elde edilir.



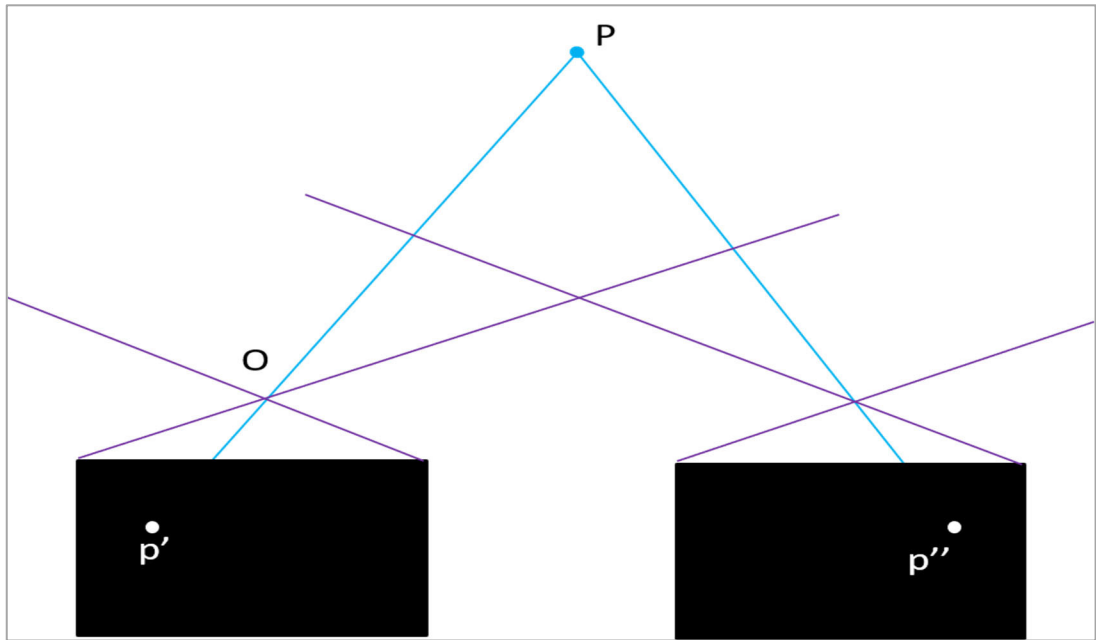
Şekil 2.1. Uzayın merkezi izdüşümü

Uzaydaki her  $P$  noktasına görüntü üzerinde tek bir  $p'$  noktası karşılık gelir. Ancak görüntü düzlemindeki bir  $p'$  noktasına ise, uzayda  $OP$  üzerinde bulunan bütün uzay noktaları karşılık gelir (Şekil 2.2).



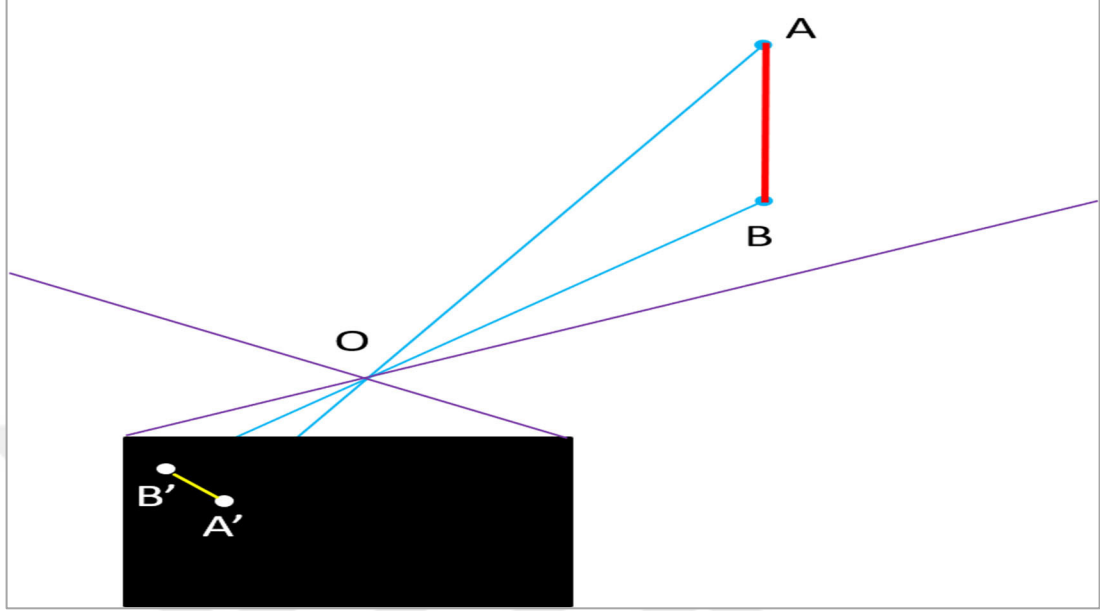
Şekil 2.2. Noktaların uzayda merkezi izdüşümü (mono)

Aynı  $P$  noktasına ait farklı konumdan bir görüntü daha olması durumunda stereo koşul sağlanmış olur ve ışınların kesişimi ile görüntüler üzerindeki  $p'$  ve  $p''$  eş-doğrusal (kolineer) noktalar uzayda sadece  $P$  noktasına karşılık gelir (Şekil 2.3).



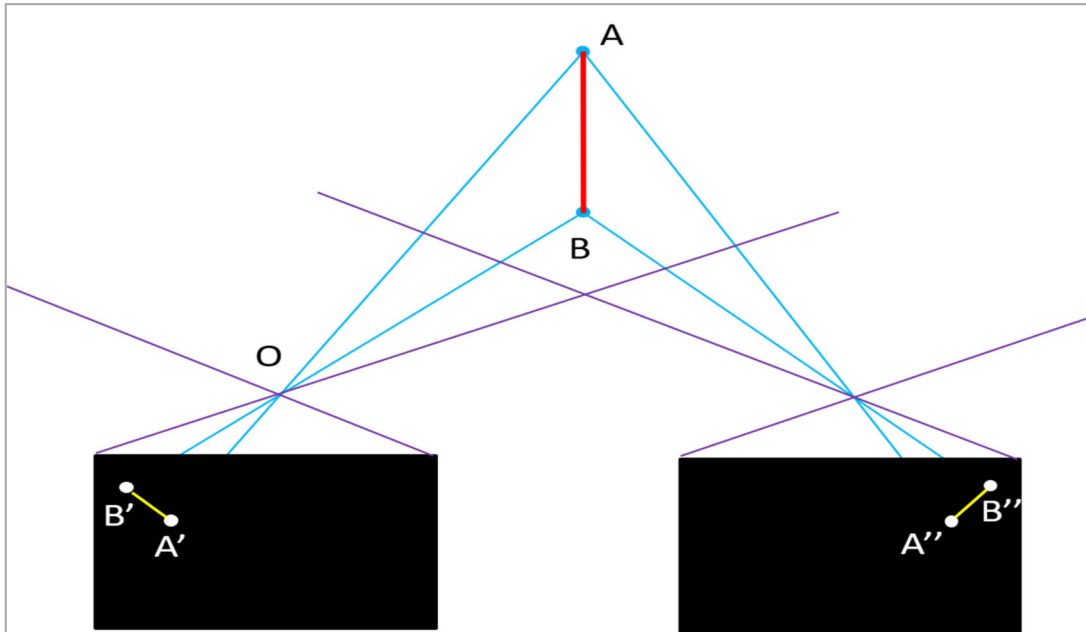
Şekil 2.3. Noktaların uzayda merkezi izdüşümü (stereo)

Uzaydaki bir AB doğrusuna, görüntü üzerinde bir tek A'B' doğrultusu karşılık gelirken, görüntü üzerindeki A'B' doğrusu, uzayda OAB düzlemi içindeki bütün doğruların izdüşümüdür (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Doğruların uzayda merkezi izdüşümü (mono)

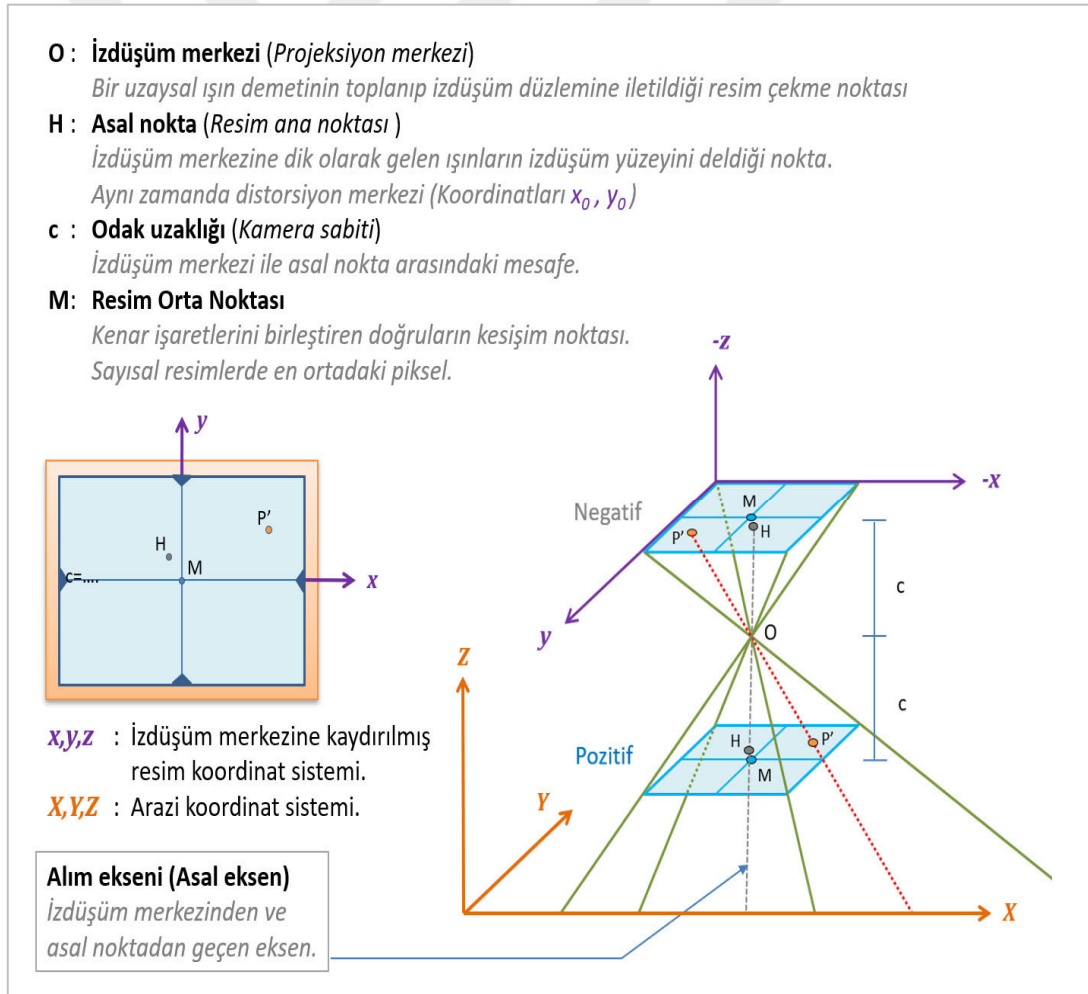
Aynı AB doğrusuna ait farklı konumdan bir görüntü daha olması durumunda stereo koşul sağlanmış olur ve ışınların kesişimi ile görüntüler üzerindeki A'B' ve A''B'' kolinear doğrular uzayda sadece AB doğrusuna karşılık gelir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Doğruların uzayda merkezi izdüşümü (stereo)

3B bir uzay cisminin tek bir düzlem üzerine düşürülmüş merkezsel izdüşümü yardımıyla yeniden elde edilmesine olanak yoktur. Bu işlem ancak düzlem cisimler için yapılabilir. Tek (mono) görüntüden üç boyutlu görüş yani uzaydaki derinlik farkları elde edilemez. Derinlik farkları ancak aynı yerin iki ayrı merkeze göre elde edilmiş görüntüleri (izdüşümleri) yardımıyla yeniden belirlenebilir.

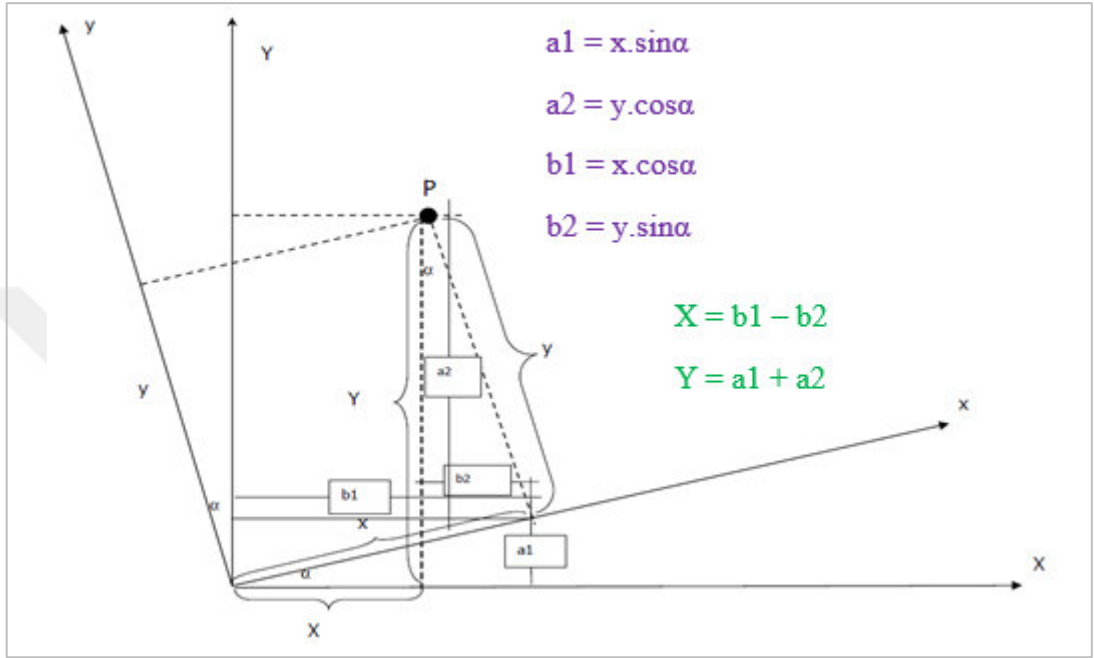
Nesnelerin fotogrametrik yöntemlerle uzayda, 3 boyutlu olarak, yüksek konum doğruluklarıyla elde edilebilmesi için her görüntüye ait uzayın merkezi izdüşümünün ideale en yakın şekilde ifade edilmesi gerekmektedir. Bu en doğru ifadenin yolu ise; ilerleyen bölümlerde anlatılan kamera iç yönelmesi, görüntülerin dış yönelmeleri, referans nokta veya diğer bir tabirle YKN doğrulukları gibi birçok bileşenin sağlıklı olarak ortaya konmasından geçmektedir. Merkezsel izdüşüme ait önemli önemli nokta ve doğrular Şekil 2.6'da sunulmuştur.



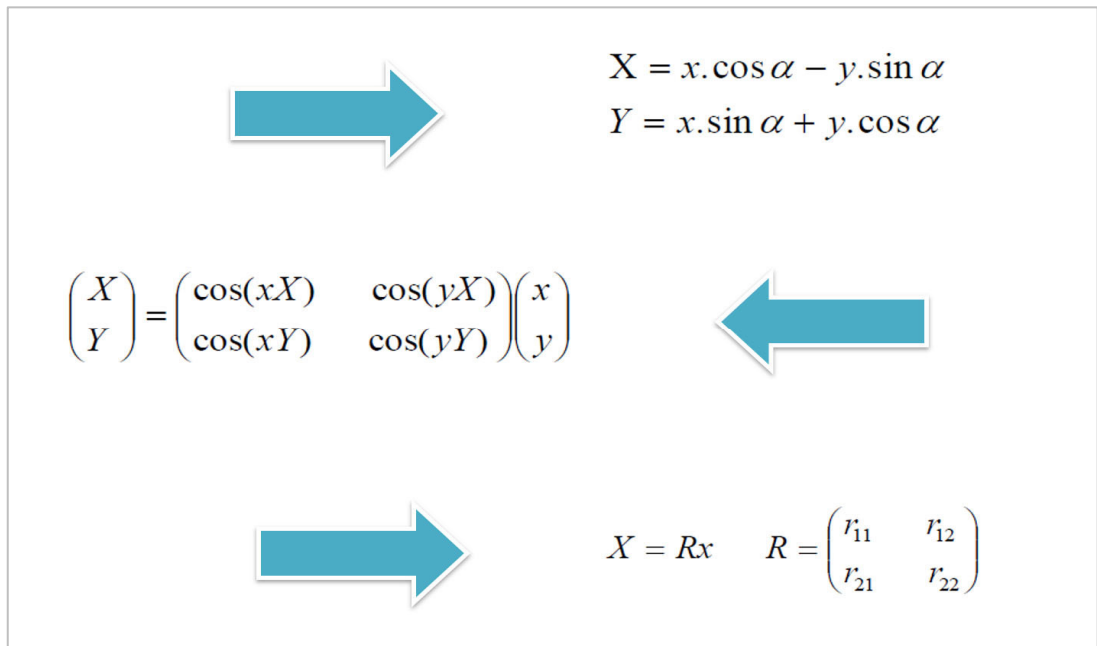
Şekil 2.6. Merkezi izdüşümde önemli nokta ve doğrular

### 2.3.1. Düzlemde 2 Boyutlu Benzerlik ve Afın Dönüşümü

En basit haliyle; aralarında herhangi bir ölçek farkı bulunmayan, koordinat merkezleri çakışık ve aralarında sadece alfa açısı kadar dönüklük bulunan iki koordinat sistemi Şekil 2.7’de görüldüğü gibi ele alınırsa, Şekil 2.8’deki gibi matrisyel olarak ifade edilebilmektedir.



Şekil 2.7. Düzlem koordinat sistemleri arasında dönüşüm



Şekil 2.8. İki boyutlu düzlemsel dönmenin matrisyel gösterimi

Koordinatları  $x, y$  olan bir P noktasının diğere bir üst  $X, Y$  koordinat sistemine uzaysal dönmesi, koordinat eksenleri arasındaki açının kosinüs değerleriyle çarpılarak Şekil 2.8’de gösterilen eşitlikler ile elde edilmektedir.

Nihai olarak; koordinat eksenleri arasındaki ötelemeler de dahil edilerek ortogonal olmayan bir A matrisi ile yapılacak afin dönüşümü ve ortogonal olmayan A matrisi yerine ortogonal R matrisi ve ölçek faktörü kullanılarak yapılacak benzerlik dönüşümü matrisyel olarak Şekil 2.9’da gösterilmektedir.

### Düzlemde Afin Dönüşümü (2B)

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}}_{\text{Ortogonal olmayan A matrisi}} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad X = X_0 + Ax$$

**Ortogonal olmayan A matrisi**

Ölçek Faktörü **Ortogonal R Matrisi**

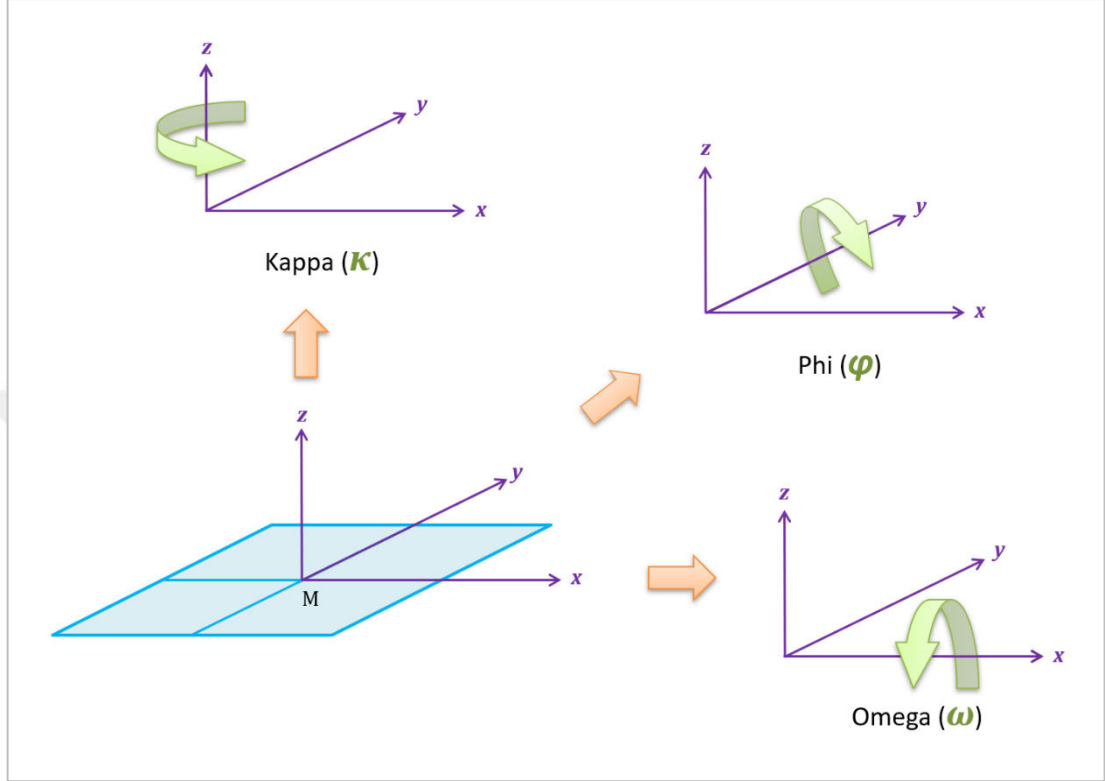
$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} + m \underbrace{\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix}}_{\text{Ortogonal R Matrisi}} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad X = X_0 + mRx$$

### Düzlemde Benzerlik Dönüşümü (2B)

Şekil 2.9. Düzlemde 2B benzerlik ve afin dönüşümünün matrisyel gösterimi

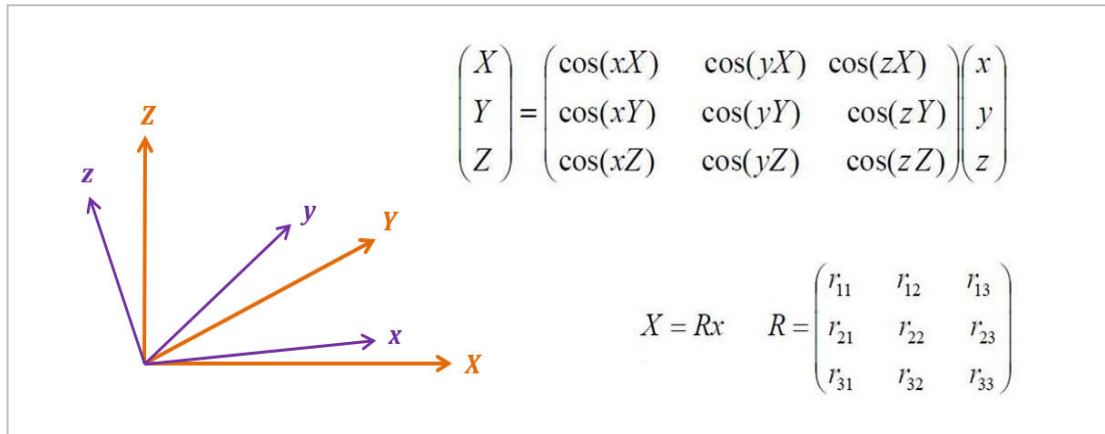
### 2.3.2. Uzayda 3 Boyutlu Benzerlik ve Afın Dönüşümü

Uzayda dönme bağımsız 3 parametre ile bellidir. Bunlar Şekil 2.10’da gösterilen koordinat eksenleri arasındaki Omega ( $\omega$ ), Phi ( $\varphi$ ) ve Kappa ( $\kappa$ ) açılarıdır.



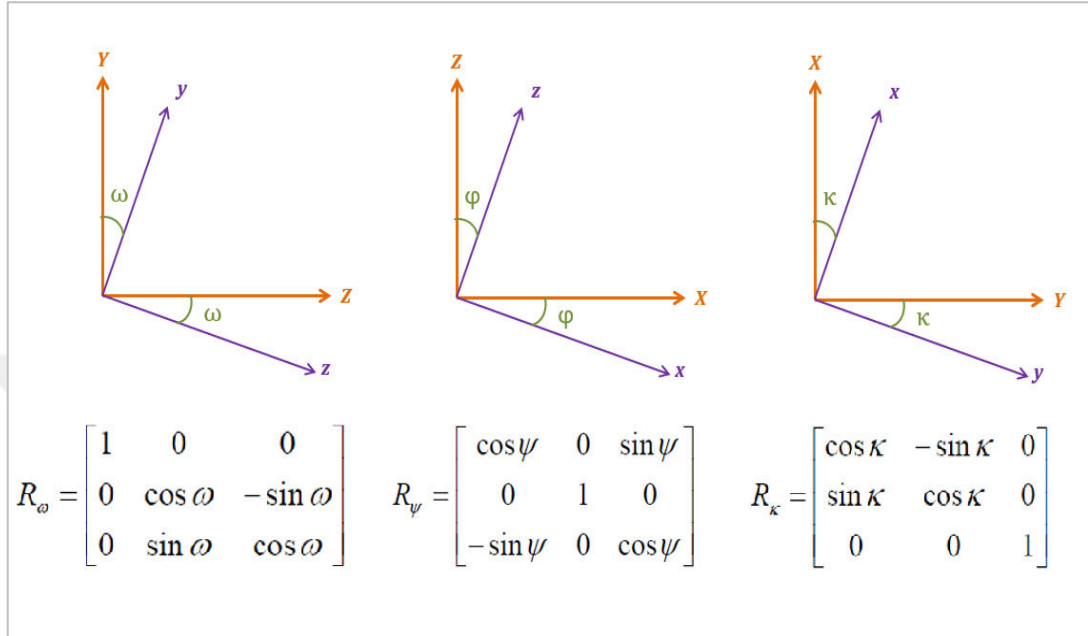
Şekil 2.10. Koordinat eksenleri arasındaki dönüklük açıları

Koordinatları  $x, y, z$  olan bir P noktasının diğer bir üst  $X, Y, Z$  koordinat sistemine uzaysal dönmesi, koordinat eksenleri arasındaki açıların kosinüs değerleriyle çarpılarak Şekil 2.11’de gösterilen eşitlikler ile elde edilmektedir.



Şekil 2.11. Üç boyutlu uzaysal dönmenin matrisyel gösterimi

Uzaysal dönme matrisini oluşturabilmek için öncelikle uzaysal dönmeyi ifade eden Omega ( $\omega$ ), Phi ( $\varphi$ ) ve Kappa ( $\kappa$ ) açılarının her birinin etki ettiği düzlemsel dönmelerin matrisyel olarak Şekil 2.12’de gösterildiği gibi, uzaysal formda (3x3) ifade edilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.12. Uzaysal dönmenin 3 eksende matrisyel gösterimi

Her bir açığa ait 3 farklı düzlem için ifade edilen ve uzaysal dönme etkilerini içeren matrislerin çarpımı ise nihai olarak Şekil 2.13’de gösterilen uzaysal dönme matrisini verecektir.

$$R = R_{\omega} R_{\psi} R_{\kappa}$$

$$R_{\omega\psi\kappa} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \kappa & -\cos \psi \sin \kappa & \sin \psi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \psi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \psi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \psi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \psi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \psi \sin \kappa & \cos \omega \cos \psi \end{pmatrix}$$

Şekil 2.13. Uzaysal dönme matrisi

Uzayda benzerlik ve afin dönüşümünün temeli ise koordinat sistemleri arasındaki öteleme, dönüklük ve varsa ölçek faktörünün birlikte ifade edilmesidir. Bu bağlamda; koordinat eksenleri arasındaki ötelemeler de dahil edilerek ortogonal olmayan bir A matrisi ile yapılacak afin dönüşümü ve ortogonal olmayan A matrisi yerine ortogonal R matrisi ve ölçek faktörü kullanılarak yapılacak benzerlik dönüşümü matrisyel olarak Şekil 2.14’de gösterilmektedir.

### Uzayda Afin Dönüşümü (3B)

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad X = X_0 + Ax$$

Ortogonal olmayan A matrisi

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + m \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad X = X_0 + mRx$$

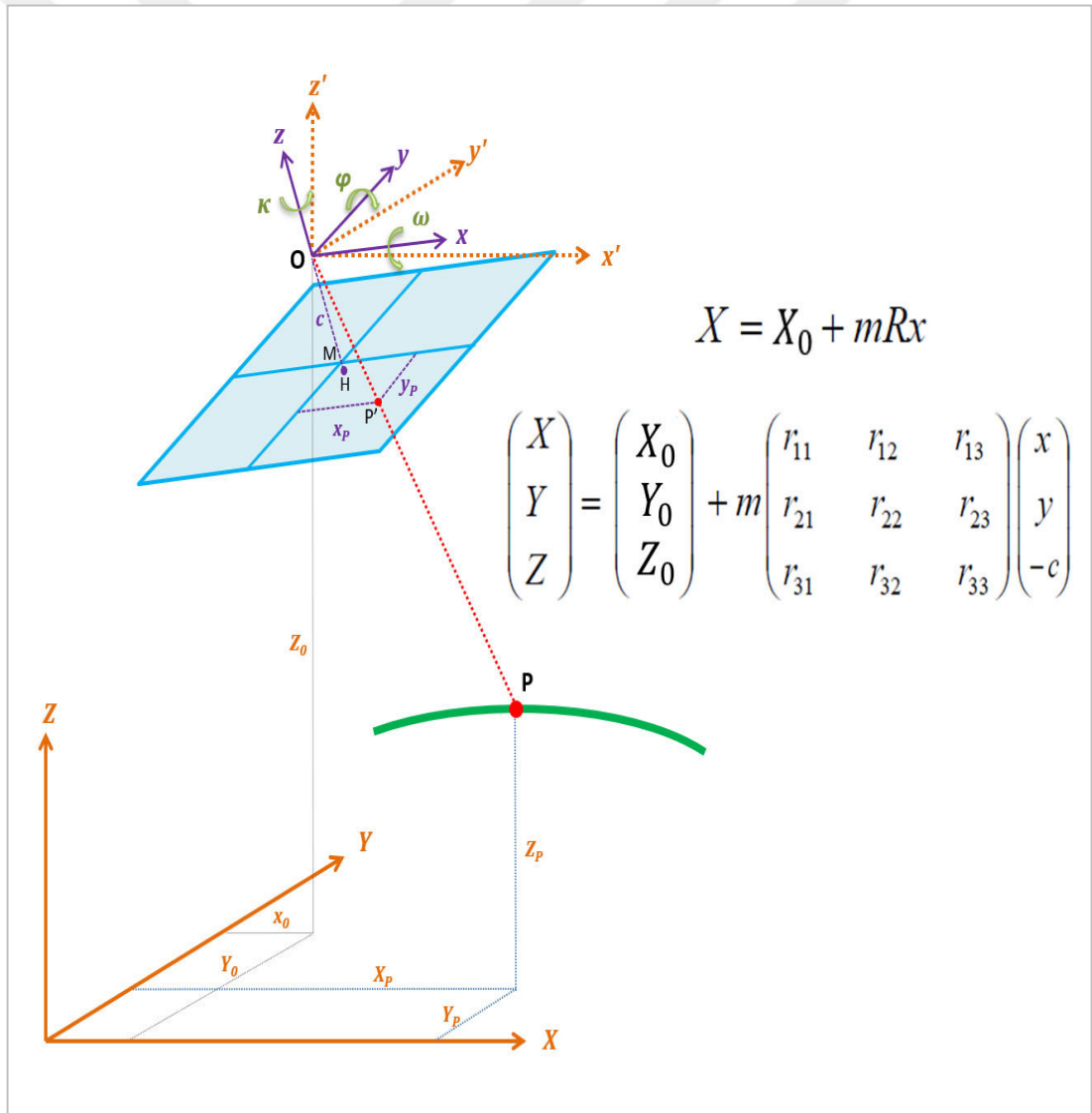
Ölçek Faktörü      Ortogonal R Matrisi

### Uzayda Benzerlik Dönüşümü (3B)

Şekil 2.14. Uzayda 3B benzerlik ve afin dönüşümünün matrisyel gösterimi

Afin dönüşümünde;  $X_0, Y_0, Z_0$  üç adet ötelemeyi ( $xyz$  koordinat sistemi başlangıcının  $XYZ$  koordinatlarını) ve  $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{33}$  matris elemanları ise ortogonal olmayan ve açıl dönüklük etkilerinden oluşan A matrisinin 9 elemanını ifade etmektedir. Söz konusu bu 12 adet parametrenin belirlenmesi için en az 12 denkleme, yani her iki koordinat sisteminde eşlenik olan en az dört özdeş noktaya ihtiyaç vardır. Her bir noktaya ait 3 adet  $XYZ$  koordinatının bilinmesi sebebiyle ancak bu durumda  $4 \times 3 = 12$  denklem ile minimum çözüm şartı sağlanmış olacaktır.

Benzerlik dönüşümünde ise;  $X_0, Y_0, Z_0$  üç adet ötelemeyi ( $xyz$  koordinat sistemi başlangıcının  $XYZ$  koordinatlarını), “ $m$ ” ölçek faktörünü ve  $r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33}$  matris elemanları ise ortogonalite şartını sağlayan ve açısal dönüklük etkilerinden oluşan  $R$  matrisinin 9 elemanını ifade etmektedir. Ortogonal olması sebebiyle  $R$  matrisini 3 adet dönüklük açısı ile ifade etmek mümkün olacaktır. Bu durumda; söz konusu 7 adet parametrenin (3 öteleme, 1 ölçek ve  $R$  matrisinin 3 dönme açısı  $\omega, \varphi, \kappa$ ) belirlenebilmesi için en az 7 denkleme ihtiyaç vardır. Örn:  $2X, 2Y, 3Z$  veya  $3X, 3Y, 1Z$  (özdeş 2 adet tam kontrol, 1 adet yükseklik kontrol noktası vb.). Ancak bu durumda minimum çözüm şartı sağlanmış olacaktır. Görüntü koordinatlarından obje uzayı (arazi) koordinatlarına uzaysal benzerlik dönüşümünün grafik olarak gösterimi Şekil 2.15’de sunulmuştur.



Şekil 2.15. Görüntü ve obje uzay koordinatları arasında benzerlik dönüşümü

### 2.3.3. Eş-Doğrusallık (Kolinearite) Koşulu

Uzayın merkezi izdüşümü ve uzayda 3B benzerlik dönüşümü esas alındığında, oluşturulan fotogrametrik modelin elemanları arasındaki karşılıklı ilişkiyi belirten eş-doğrusallık (kolinearite) koşulu Şekil 2.15’de ifade edildiği gibidir. Buna göre; distorsiyon ve atmosferik etkiler yok sayıldığında uzaydaki bir P noktası, izdüşüm merkezi ve P noktasının görüntü düzlemindeki izdüşümünü ifade eden P’ noktasının aynı doğru üzerinde bulunması gerekmektedir. Burada önemli olan husus; mercek distorsiyonları ve atmosferik etkiler fiziksel olarak bu durumun oluşmasını etkilemektedir. Bu düzenli hataların mevcudiyeti durumunda etkileri modellenerek görüntü koordinatlarına gerekli düzeltmeler getirilmelidir. Böylelikle uzayın merkezi izdüşümü olması gereken forma kavuşturulmakta ve eş-doğrusallık (kolinearite) koşulu sağlanabilmektedir.

Uzayda benzerlik dönüşümünün matrisyel gösterimi eşitlikler halinde açılacak olursa, eş-doğrusallık denklemleri obje uzay koordinatları cinsinden (2.1) ve (2.2) numaralı eşitliklerle Şekil 2.16’da görüldüğü gibi, görüntü koordinatları cinsinden ise (2.3) ve (2.4) numaralı eşitliklerle Şekil 2.17’de görüldüğü gibi ifade edilebilmektedir. Bu eşitliklerde;  $x, y$  iki boyutlu görüntü koordinatları  $x, y, -c$  üç boyutlu görüntü koordinatları ve  $X, Y, Z$  ise üç boyutlu kartezyen obje uzayı (arazi) koordinat sistemindeki koordinatlardır.

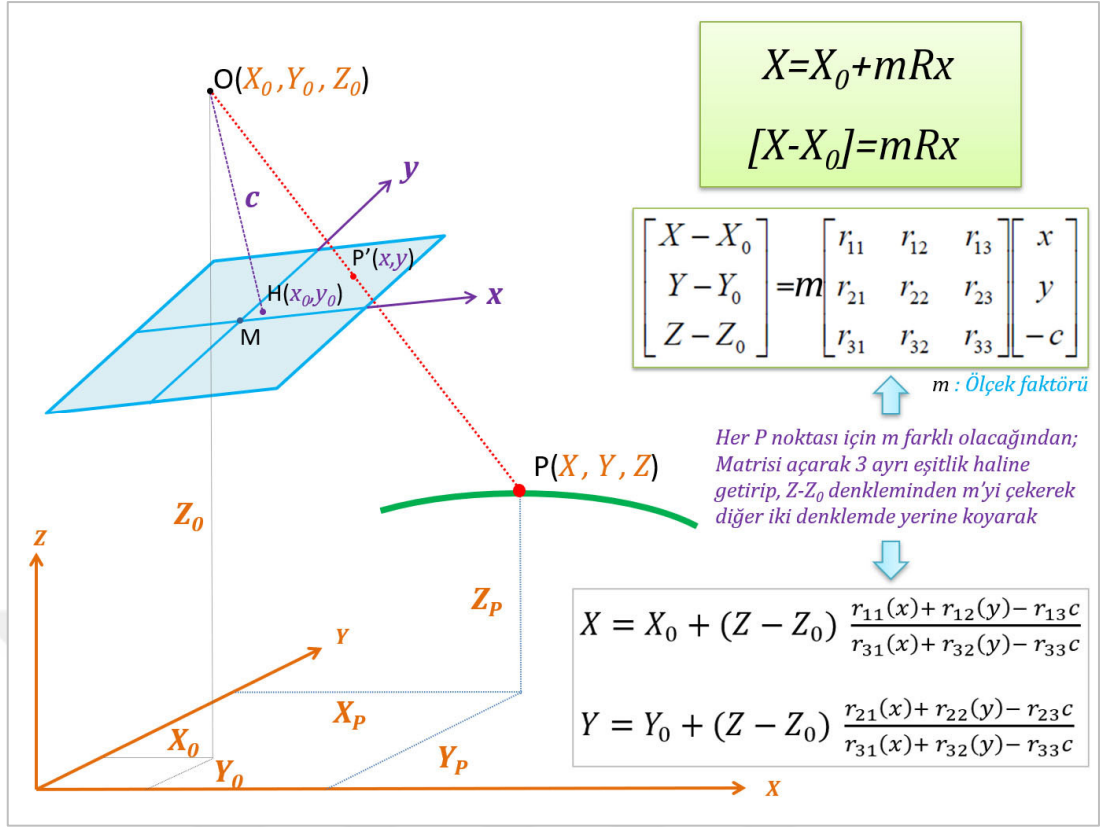
$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(x) + r_{12}(y) - r_{13}c}{r_{31}(x) + r_{32}(y) - r_{33}c} \quad (2.1)$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(x) + r_{22}(y) - r_{23}c}{r_{31}(x) + r_{32}(y) - r_{33}c} \quad (2.2)$$

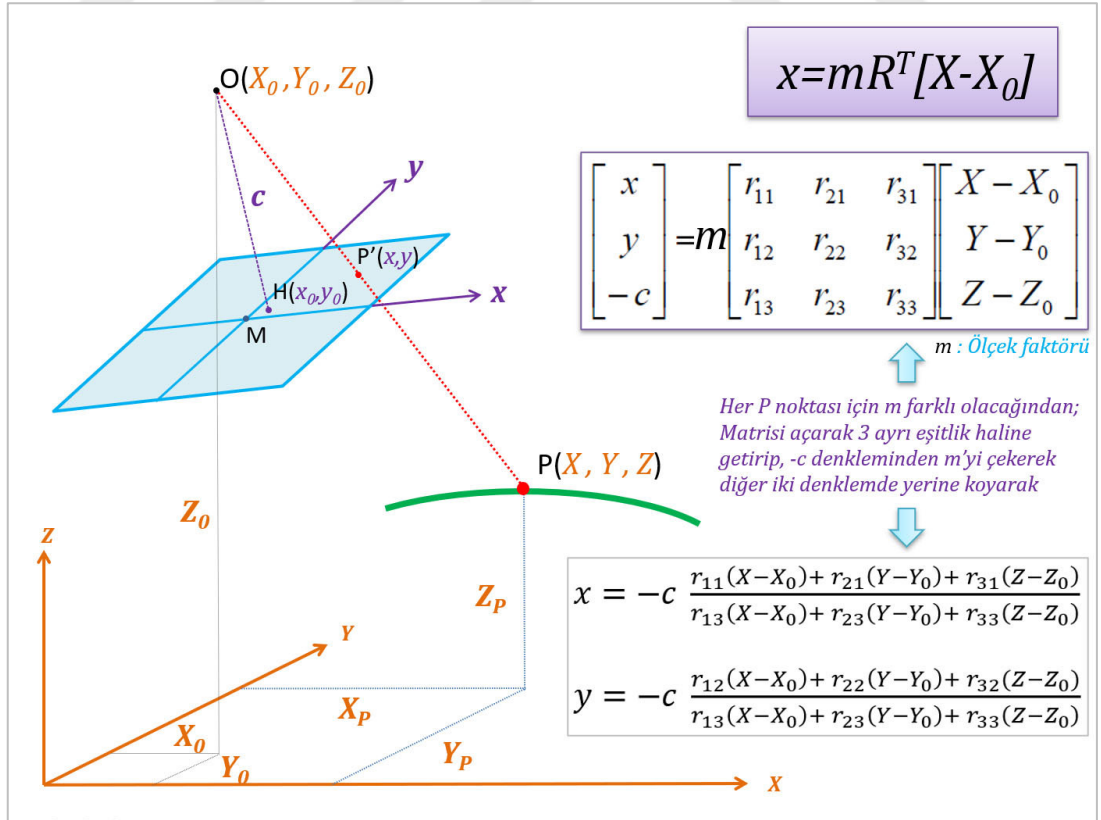
$$x = -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.3)$$

$$y = -c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.4)$$

Eşitliklerdeki  $x_0$  ve  $y_0$  asal nokta H’nin görüntü koordinatları,  $c$  odak uzaklığı (kamera sabiti),  $X_0, Y_0, Z_0$  izdüşüm merkezinin obje uzayı koordinatları,  $\omega, \varphi, \kappa$  ise üç eksenindeki dönme açılarıdır. İç yöneltme ( $x_0, y_0, c$ ) ve dış yöneltme ( $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$ ) elemanları merkezi izdüşürülmüş görüntüyü tanımlamaktadır.



Şekil 2.16. Eş-doğrusallık koşulunun obje uzay koordinatları cinsinden ifadesi



Şekil 2.17. Eş-doğrusallık koşulunun görüntü koordinatları cinsinden ifadesi

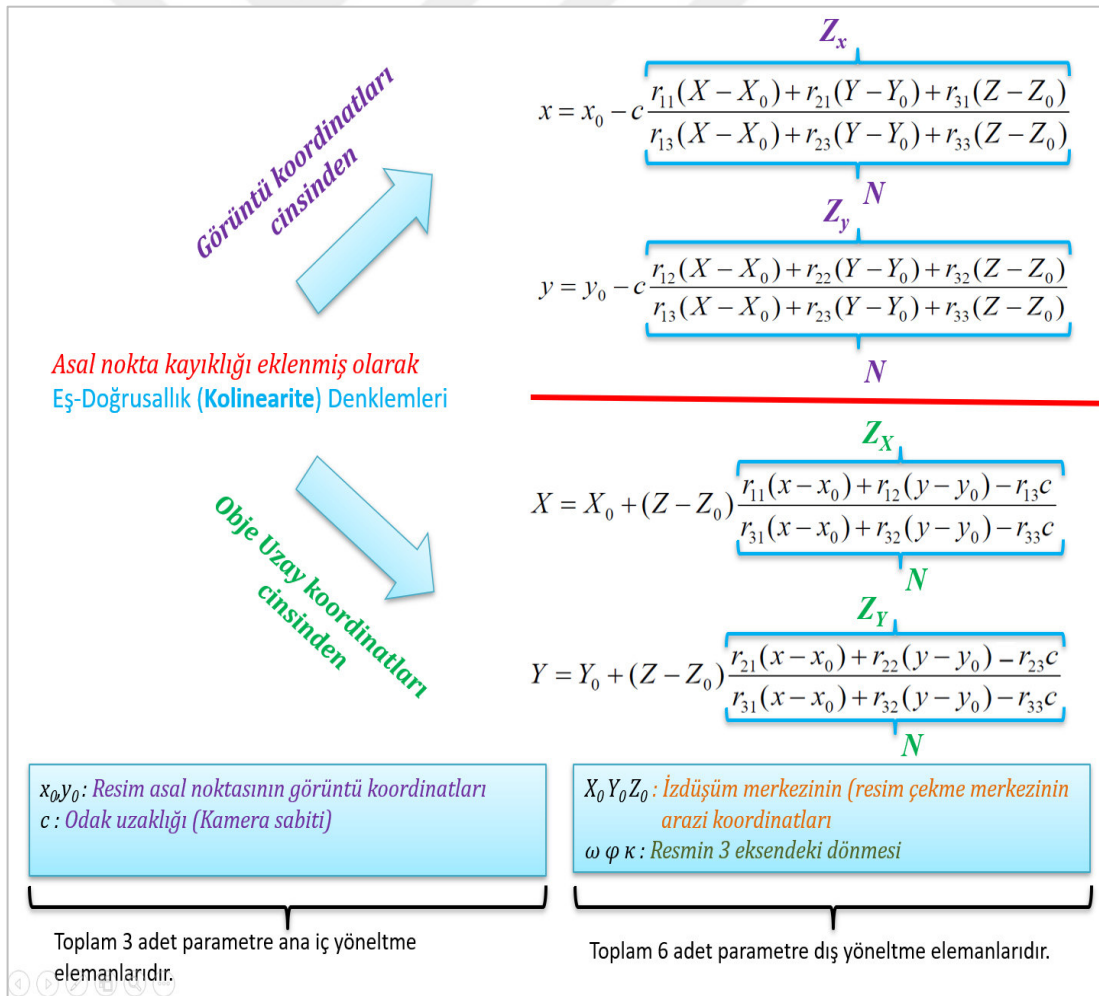
Asal nokta (H) kayıklığı da hesaba katılacak olursa eş-doğrusallık denklemleri aşağıdaki (2.5), (2.6), (2.7) ve (2.8) numaralı eşitliklerle ve özet olarak Şekil 2.18'de görüldüğü gibi ifade edilebilmektedir.

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(x-x_0) + r_{12}(y-y_0) - r_{13}c}{r_{31}(x-x_0) + r_{32}(y-y_0) - r_{33}c} \quad (2.5)$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(x-x_0) + r_{22}(y-y_0) - r_{23}c}{r_{31}(x-x_0) + r_{32}(y-y_0) - r_{33}c} \quad (2.6)$$

$$x = x_0 - c \frac{r_{11}(X-X_0) + r_{21}(Y-Y_0) + r_{31}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0) + r_{23}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} \quad (2.7)$$

$$y = y_0 - c \frac{r_{12}(X-X_0) + r_{22}(Y-Y_0) + r_{32}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0) + r_{23}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} \quad (2.8)$$

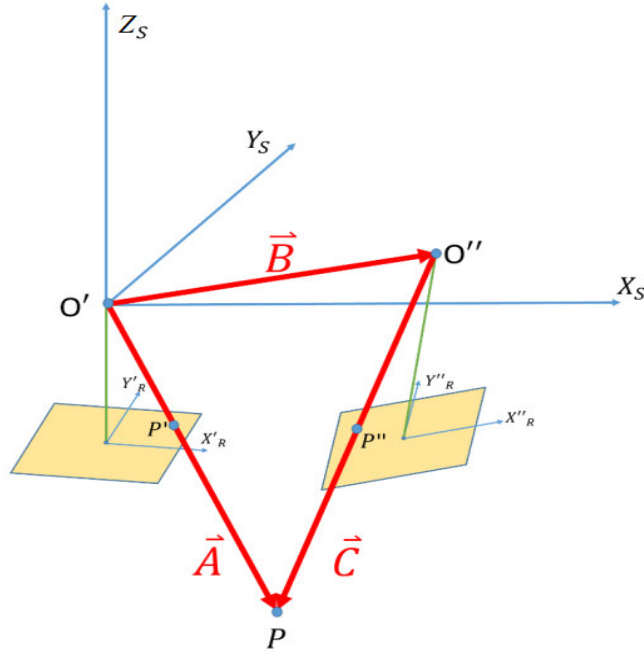


Şekil 2.18. Eş-doğrusallık (kolinearite) denklemleri

### 2.3.4. Eş-Düzlemsellik (Koplanarite) Koşulu

Stereo görüntü çiftleri üzerinden fotogrametrik yöntemlerle 3B konum bilgisi elde edebilmek için eş-doğrusallık (kolinearite) veya eş-düzlemsellik (koplanarite) koşulları kullanılmaktadır. Eş-doğrusallık koşuluna göre çözüm yapıldığında görüntülenen uzayda konumları bilinen referans noktalar (YKN) veya görüntülere ait söz konusu koordinat sisteminde tanımlı olan dönüklük ve ötelemeler kullanılmaktadır. Dolayısıyla, 3B olarak elde edilen mekânsal veri aynı zamanda referans noktaların veya öteleme ve dönüklüklerin tanımlı olduğu koordinat sisteminde üretilmektedir.

Eş-düzlemsellik koşulu ile çözüm yapıldığında ise; üretilen 3B veri kendi içerisinde metrik ve tutarlı iken herhangi bir referans koordinat sistemine dayanmamaktadır. Stereo görüntü çiftinin veya birden çok görüntü çiftinin ortak oluşturduğu keyfi model veya blok koordinat sisteminde tanımlı olmaktadır.



Şekil 2.19. Eş-düzlemsellik koşulunun vektörel gösterimi

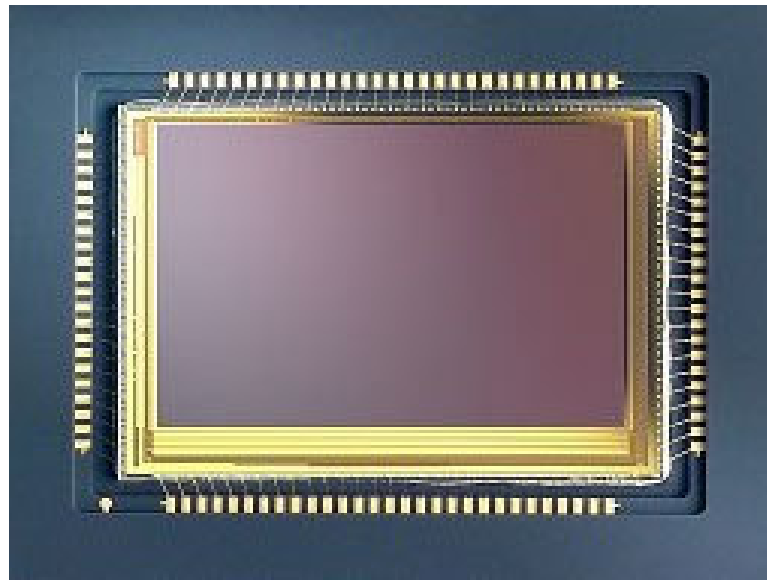
Eş-düzlemsellik (koplanarite) prensibine göre; aynı cisim noktası P'yi gören iki görüntü arasındaki B bazı ve bu görüntülerin çekim noktasından P görüntü noktasına giden doğrular (vektörler) A ve C olsun. Bir görüntü çiftinde herhangi bir cisim noktasının iki görüntüdeki vektörü A ve C ile her iki görüntünün B baz vektörünün aynı düzlemde olması gereklidir. Bu koşul her üç vektörden oluşan şeklin hacminin sıfır olması durumunu (Şekil 2.19) ifade edilmektedir (Kraus, 2008; Gürbüz, 2006).

## 2.4. Sayısal Fotogrametri

Sayısal fotogrametriden bahsetmeden önce fotoğraf ve görüntü terimleri arasındaki farklılığın açıklanması gerekmektedir. Fotoğraf terimi, genellikle fotoğrafik teknikler kullanılarak film (emülsiyon) üzerine yapılan kaydı ifade eder. Görüntü ise bir algılama sistemi kullanılarak kayıt işleminin doğrudan sayısal olarak yapıldığını, ya da analog fotoğrafın hassas tarayıcılar ile taranarak sayısal ortama aktarılmış halini ifade eder (Gürbüz, 2006).

Sayısal görüntüler; temel olarak klasik hava fotoğraflarının hassas fotoğraf tarayıcılar ile taranarak sayısal forma dönüştürülmesine veya doğrudan sayısal formda elde edilmesine dayanır. Bu durumda elde edilen sayısal görüntünün radyometrik ve geometrik doğruluğu büyük önem kazanmaktadır. Mevcut teknolojik gelişmeler göz önüne alındığı zaman; görüntülerin birçok ara işleme ihtiyaç duyulmadan doğrudan sayısal olarak elde edilmesi en mantıklı sonuç olarak ortaya çıkmaktadır.

Sayısal kamera kullanımı ile birlikte film kullanımı, foto-laboratuvar işlemleri ve fotoğraf tarama işlemleri gibi zaman alan ve maliyet oluşturan işlemler ortadan kalkmıştır. Görüntü alımını müteakip verilerin doğrudan kullanıma hazır hale gelmesi ve görüntü kalitesindeki önemli ölçüdeki artış sayısal kameraları çok cazip hale getirmiştir. Bunlara ek olarak, sayısal kameraların geometrik doğrulukları filmlerden elde edilen sayısal görüntülere göre oldukça yüksektir. Örnek bir sayısal algılayıcı düzlem Şekil 2.20'de görülmektedir (DPReview, 2002).

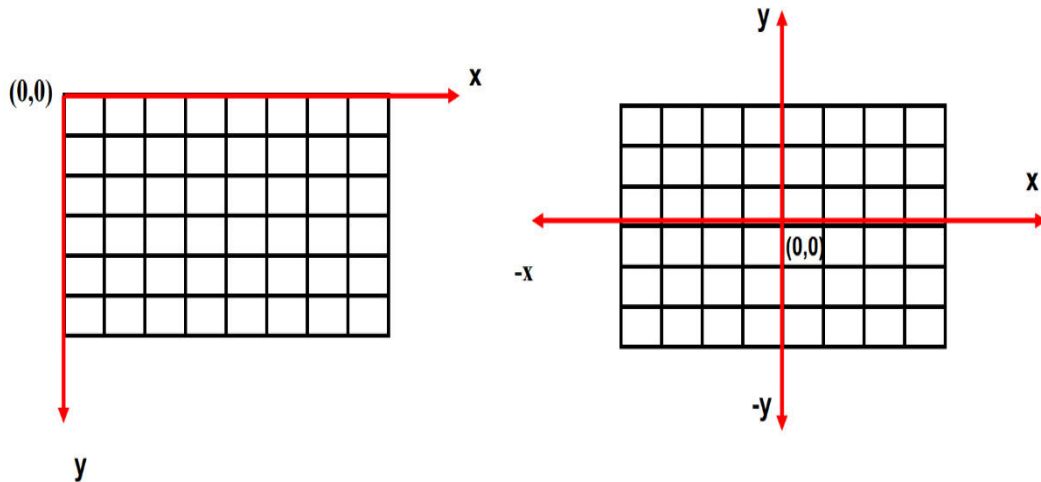


Şekil 2.20. Sayısal algılayıcı izdüşüm düzlemi

Sayısal Fotogrametri, sayısal görüntülerin kullanıldığı fotogrametri alanıdır. Fotogrametrinin matematiksel temellerinin kullanılması açısından herhangi bir değişiklik arz etmemekle birlikte fotogrametrik işlemlerde birtakım ek parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Uzayın merkezi izdüşümü göz önüne alındığında, uzayda 3B benzerlik dönüşümü için izdüşüm düzlemi tarafındaki görüntü koordinatlarını metrik olarak bilme zorunluluğu karşımıza çıkmaktadır. Analog görüntülerde emülsiyon (film) üzerine izdüşüm yapılması sebebiyle elle tutulur ve gözle görülür bu film üzerinden izdüşüm düzlemine ait fiziksel boyutları elde etmek mümkündür. Ancak sayısal kameralar tarafından oluşturulan görüntüler, kameranın içerisine dışarıdan görülmeyecek şekilde yerleştirilmiş mikron seviyelerindeki CCD veya CMOS algılayıcıların elde ettiği sayısal kayıtlardan ibarettir yani izdüşüm düzlemine ait fiziksel olarak ölçülebilir herhangi bir şey mevcut değildir.

Dolayısıyla; kamera kalibrasyonlarıyla belirlenen parametreler kapsamında hem analog hem de sayısal kameralar için hesaplanan birçok parametrenin (odak uzaklığı, mercek distorsiyonları, asal nokta vb.) belirlenme yöntemi aynı iken, sayısal kameralarda izdüşüm düzleminin de yüksek doğruluklarla tanımlanması yani görüntüleyici boyutlarının ve her bir piksele ait fiziksel büyüklüklerin ilave tekniklerle belirlenmesi gerekmektedir. Ancak bu durumda Şekil 2.21’de solda görülen piksel koordinat sisteminden, sağda görülen fotogrametrik işlemler için gerekli metrik görüntü koordinat sistemine sağlıklı bir şekilde geçiş yapılabilmektedir.



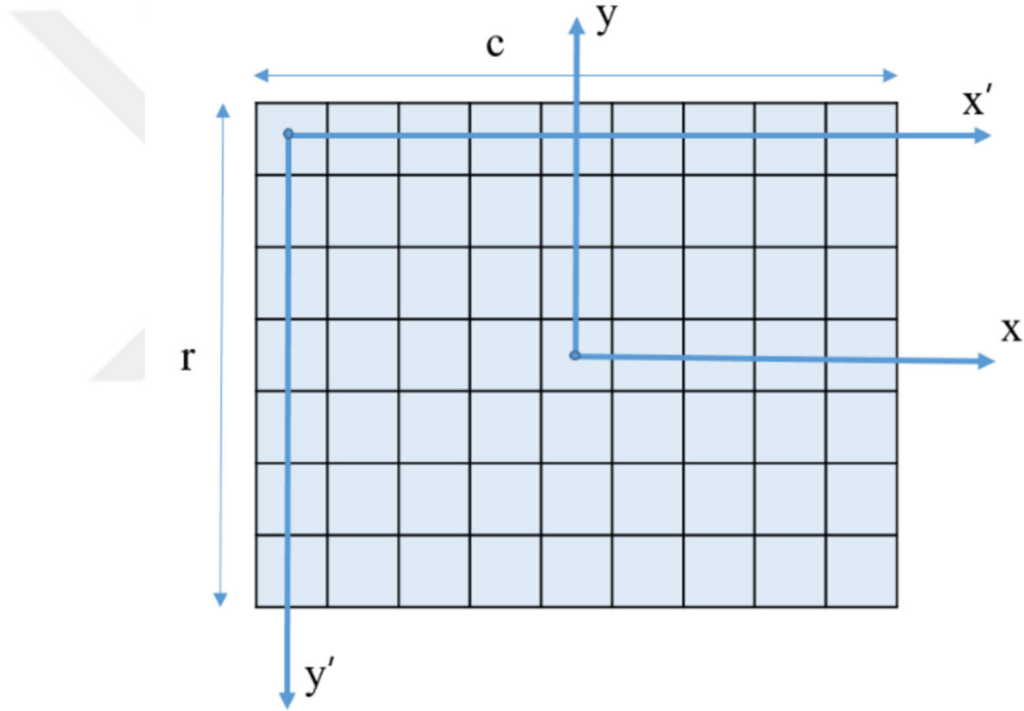
Şekil 2.21. Piksel ve metrik görüntü koordinat sistemi

Piksellerle ifade edilen piksel koordinat sisteminden (2.9) ve (2.10) eşitlikleri ile metrik görüntü koordinatlarına dönüşüm gerçekleştirilir (Linder, 2009).

$$x = \left(x' - \frac{c}{2}\right) dx \quad (2.9)$$

$$y = \left(\frac{r}{2} - y'\right) dy \quad (2.10)$$

Burada  $dx$  ve  $dy$  bir pikselin fiziksel boyutlarını,  $r$  ve  $c$  ise çerçeve boyutlarını (sıra ve sütun) ifade etmektedir. Piksel ve metrik görüntü koordinat sistemleri arasındaki ilişki Şekil 2.22'de görülmektedir.



Şekil 2.22. Piksel ve metrik görüntü koordinat sistemleri arasındaki ilişki

Günümüzde sayısal görüntü sağlayan kameraların gelişmesi ve yaygınlaşması, yüksek çözünürlük ve düşük distorsiyonlu görüntülere erişimin önünü açmış ve kullanılabilirliğini artırmıştır. Bu noktada sayısal fotogrametri, raster görüntülerin yüksek çözünürlükte elde edilebilmesi sayesinde, artan bir hızda gelişim göstermektedir. Bunların yanı sıra bilgisayar sistemlerindeki bellek ve işlemci performanslarının artması ve kolay ulaşılabilir olması sayısal fotogrametriye olan ilgiyi gün geçtikçe artırmaktadır (Gürbüz, 2006).

## 2.5. Kamera Kalibrasyonu

Fotogrametrik olarak obje uzayında 3B mekânsal veri elde edebilmek için uzayda 3B benzerlik dönüşümü yapılmaktadır. Bu benzerlik dönüşümü için ise uzayın merkezi izdüşümünün en sağlıklı formda ifade edilmesi gerekmektedir. Projeksiyon merkezini (resim çekme noktasını) referans alacak olursak, merkezi izdüşümü obje uzay tarafı ve kamera tarafı olmak üzere ana iki kısma ayırmak mümkündür. Objeye uzay tarafının sağlıklı olarak ifadesi için uzayda tanımlı referans noktaların (YKN, vb.) yüksek doğruluklarla bilinmesi gerekmektedir. Kamera tarafının sağlıklı olarak bilinmesi için ise, odak uzaklığı, mercek distorsiyonu (çapsal ve teğetsel), algılayıcı deformasyonu ve asal noktanın konumunun yani kamera iç yönelme parametrelerinin yüksek doğruluklarla belirlenmesi gerekmektedir. Bu sayede; merkezi izdüşüm ve benzerlik dönüşümü ile teorik olarak kurulan eş-doğrusallık (kolinearite) koşulu sağlıklı bir şekilde sağlanmış olmakta ve uzaya ait elde edilen mekânsal verilerin doğruluğu bu oranda artmaktadır.

Günümüzde sıklıkla kullanılan sayısal kameraların büyük çoğunluğunda, kısmen veya tamamen iç yönelme elemanlarının bilinmemesi ve tamamında görüntü üzerinde çerçeve işaretlerinin olmaması nedeniyle fotogrametrik açıdan metrik olmayan kameralar olarak sınıflandırılmaktadır. Bu kameralarda; mercek distorsiyonu, algılayıcı deformasyonu ve elektronik transfer hataları gibi sonuç görüntü kalitesini etkileyen sistematik bozulmalar ile sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bu kameralarla çalışma yapılacaksa bahse konu hataların belirlenmesi ve düzeltilmesi gereklidir. Sayısal kamera ile ölçü doğruluğunun tespiti için distorsiyon ve diğer parametrelerin modellenerek hesaplanması ve uygulamada dikkate alınması gerekir. Bu dezavantajlarına rağmen görüntülerin doğrudan bilgisayar ortamına aktarılabilmesi, veri depolama, transfer ve taşıma kolaylığı dijital kameraların yaygın olarak tercih edilme sebebi olarak görülmektedir (Karlı ve Ayhan 2005; Yıldız vd., 2005).

Kamera kalibrasyonu, kamera sistemini en iyi şekilde ifade eden parametrelerin, konumları uzayda yüksek doğruluklarla bilinen ölçüler yardımıyla tespit edilmesi esasına dayanmaktadır. Farklı bir bakış açısı ile kamera kalibrasyonu, fotogrametrik nokta belirleme işlemlerinin tersi olarak da tanımlanabilir. Fotogrametrik nokta belirlenmesinde iç yönelme elemanları bilinir ve uzay noktalarının koordinatları hesaplanır. Kalibrasyonda ise uzay noktalarının koordinatları bilinir ve iç yönelme elemanları hesaplanır.

Kalibrasyon yöntemleri iki grup altında toplanabilir. Bunlardan birincisi yaklaşık teknikler olarak da adlandırılabilen direkt lineer dönüşümdür. Bu teknik genellikle fazla hassasiyet beklenmeyen işlerde kullanılır ve nispeten hızlı sonuç alınan bir yöntemdir. Özellikle iteratif işlemler için gerekli değerlerin hesaplanmasında da bu yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. İkinci yöntem ise nokta tabanlı yöntemler olarak adlandırılır. Bu yöntem, aynı doğru üzerinde bulunma eş-doğrusallık (kolinearite) veya aynı düzlem üzerinde bulunmayı eş-düzlemsellik (koplanarite) koşullarını kullanmaktadır (Khalil, 2002).

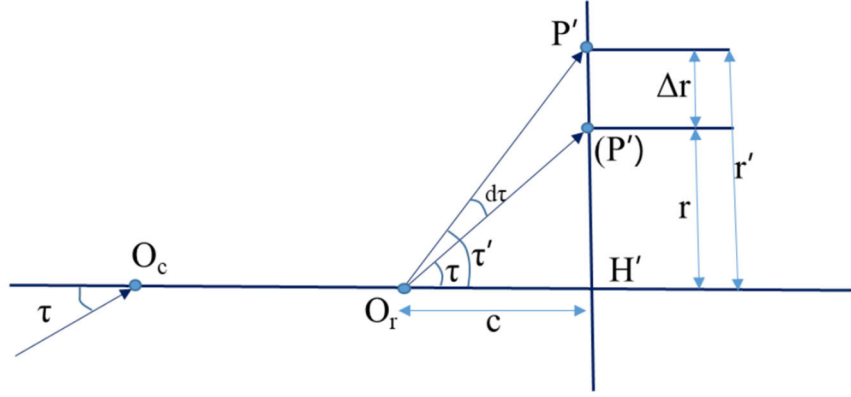
Stereo görüntüler yardımıyla üç boyutlu model oluşturabilmek için dış yöneltme parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. İç ve dış yöneltme parametreleri ayrı ayrı belirlenebileceği gibi, aynı zamanda da (ışın demeti dengelemesi) belirlendiği çok sayıda teknik vardır (Khalil, 2002). En etkin yöntemlerden biri olan demet dengelemesi 1950'li yıllarda geliştirilmiş ve 1970'li yıllarda self-kalibrasyon olarak genişletilmiştir (Beyer, 1991). Geometrik kamera kalibrasyonunun amacı, kameranın iç yöneltme elemanlarını belirlemek ve perspektif geometriden, sistematik sapmaları modellemektir (Dörstel vd., 2003). Kamera kalibrasyonunda stereo görüntü çiftleri kullanılabilirdiği gibi tek (mono) görüntüler kullanarak da iç yöneltme parametrelerini hesaplamak mümkündür.

Metrik olmayan amatör kameralar kullanıldığında, iç yöneltme elemanları varsayılan üretim değerleri olarak bilinmektedir. Son yıllarda kullanıma sunulan yazılımlar ile geleneksel fotogrametrik yöntemlerin aksine çok sayıda YKN kullanmak suretiyle çekilen her fotoğrafı ayrı değerlendirerek iç ve dış yöneltme elemanlarını aynı anda belirlenebilmektedir. Bu yazılımlar ile uzaysal bir modelleme için metrik bir kamera ihtiyacı ortadan kalmakta ve birçok işlem adımı otomatik olarak yapılmaktadır.

Kamera iç geometrisi odaklanılan mesafeye göre değişim arz etmektedir. Otomatik odaklanma yapan amatör kameralarda odak uzaklığındaki değişikliğin hesaplanan koordinatlara etkisi (2.5) ve (2.6) eşitliklerinde verilen kolinearite eşitliklerinde açıkça görülmektedir. Bu sebeple; metrik olmayan ve çoğunlukla İnsansız Hava Araçları (İHA) üzerinde kullanılan amatör kameralar ile yapılan fotogrametrik görüntü alım uçuşlarında otomatik odaklanma (auto-focus) özelliği kapatılmalı ve netlik sonsuza ayarlanmalıdır.

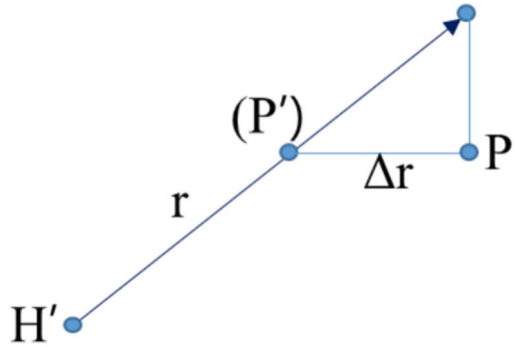
### 2.5.1. Görüntü Bozulmaları (Distorsiyonları)

Kameralarda kullanılan mercek sistemleri tek bir mercek yerine çok sayıda merceğin bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Mercek sistemindeki hatalar nedeni ile obje üzerindeki bir P noktasının görüntü üzerindeki izdüşümü olması gereken yerden farklı bir yerde oluşmaktadır. Bu P noktasından gelen ışın, kamera eksenini ile  $\tau$  açısı yaparak objektif sisteminin sahip olduğu kusurlardan dolayı görüntü uzayında  $\tau'$  açısı yaparak çıkacaktır. Sonuç olarak P noktasının görüntüsü (P') noktası yerine olması gerekenden  $\Delta r$  kadar farklı bir konumda P' noktasında oluşacaktır. Bu farka kamera distorsiyon hatası denir. Oluşan bu hata çap ve teğet yönünde iki bileşene ayrılabilir. Çap yönünde yani r yönünde olan bileşenine çapsal (radyal) distorsiyon, diğerine de teğetsel distorsiyon denir.



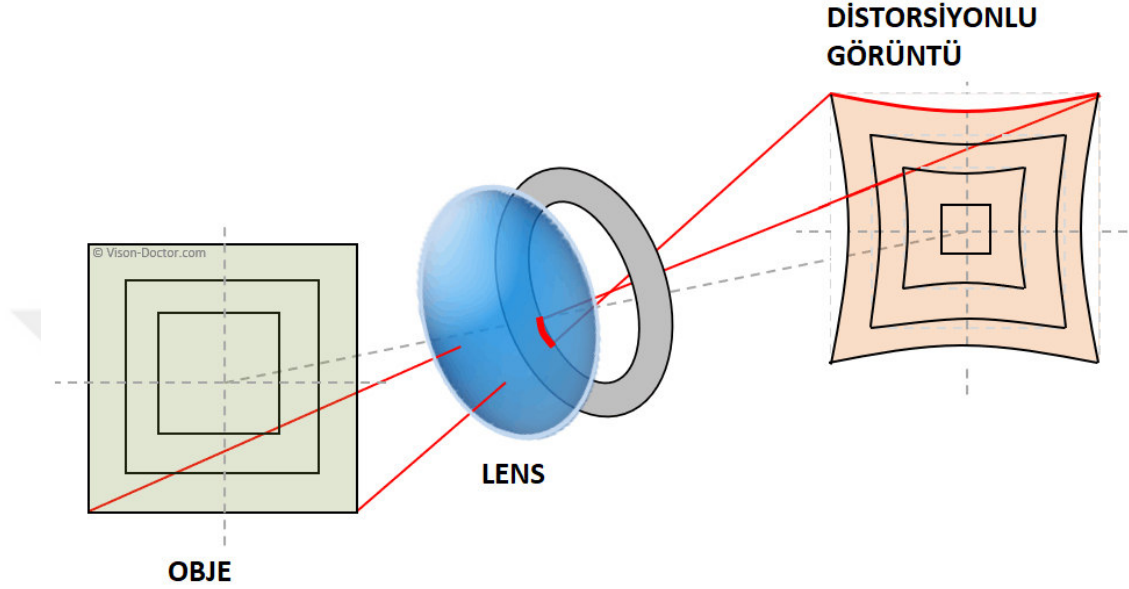
Şekil 2.23. Çapsal (Radyal) distorsiyon

Distorsiyonun görüntü üzerindeki etkisi kamera kalibrasyonu ile belirlenir. Kalibrasyonu ile belirlenen distorsiyon parametreleri kullanılarak görüntü koordinatları düzeltilir. (P') ve P' noktasını birleştiren  $\Delta r$  doğrusu (çapsal distorsiyon) Şekil 2.23'de, teğetsel distorsiyon ise Şekil 2.24'de sunulmuştur (Luhmann vd., 2014).



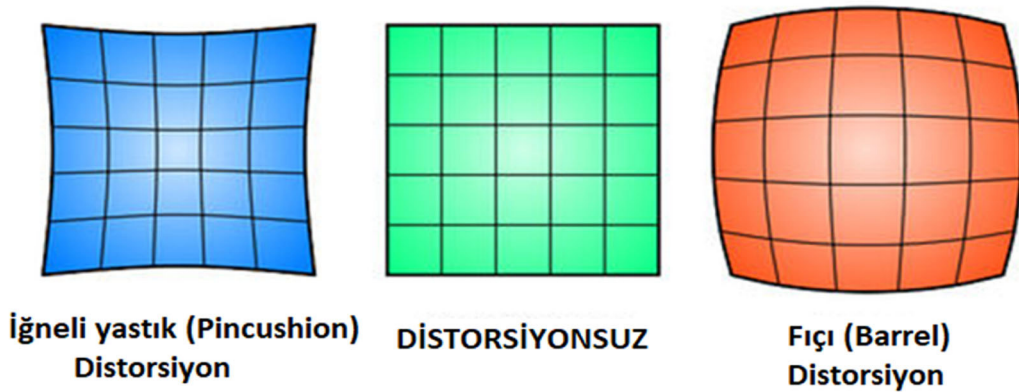
Şekil 2.24. Teğetsel (Tangential) distorsiyon

Çapsal distorsiyon; mercekten kaynaklı açısal büyütme sonucu farklı açılarla merceğe gelen ışınların, açısal değişikliğe uğrayarak izdüşüm düzlemi önünde veya arkasında odaklanacak şekilde izdüşümlerinden kaynaklı görüntü kaymasıdır (Şekil 2.25). Özellikle sayısal görüntülerde çapsal distorsiyonun sonuçlara etkisi göz ardı edilemeyecek büyüklükte olduğu için yüksek doğrulukla modellenmesi gerekir.



Şekil 2.25. Çapsal distorsiyonun oluşumu

Bir nesnenin görüntüsü asal noktadan çapsal olarak uzak ya da yakın olacak şekilde yer değiştirmişse, görüntü çapsal olarak distorsiyona uğramıştır. Asal noktadan uzak olarak distorsiyona uğramış ise pozitif (iğneli yastık), yakın olarak distorsiyona uğramış ise negatif (fıçı) distorsiyon olarak adlandırılır. Farklı çapsal distorsiyonların görüntü üzerindeki etkileri Şekil 2.26’da gösterilmektedir.



Şekil 2.26. Çapsal distorsiyon etkileri

Çapsal distorsiyon etkisi;  $x$ ,  $y$  görüntü koordinatları için aşağıdaki (2.11) ve (2.12) eşitlikleri ile hesaplanabilmektedir. Buradaki  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ , ... ile ifade edilen katsayılar çapsal distorsiyon katsayılarıdır. Bu katsayıların etkileri asal noktaya olan mesafenin kuvvetleri ile orantılıdır.

$$\delta x_1 = (x - x_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \quad (2.11)$$

$$\delta y_1 = (y - y_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \quad (2.12)$$

Asal nokta aynı zamanda distorsiyon merkezidir ve dolayısıyla eşitlikteki mesafenin başlangıç noktası asal noktadır. Asal noktadan görüntü çevresine doğru mesafe ile doğru orantılı olarak distorsiyon etkisi pozitif veya negatif yönde artar. Asal noktaya olan uzaklık (2.13) eşitliği ile hesaplanır. Eşitlikteki  $r$  çapsal uzaklığı,  $x$ ,  $y$  ham görüntü koordinatlarını ve  $x_0$ ,  $y_0$  ise asal noktanın görüntü koordinatlarını ifade etmektedir.

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (2.13)$$

Kameralardaki mercekler aynı doğru üzerinde yerleştirilmiş şekilde üretilmesi gerekirken bu durum uygulamada gerçekleşmemektedir. Merceklerin olması gereken doğrultudan sapmaları nedeniyle teğetsel (tanjant) distorsiyon olarak tanımlanan geometrik yer değiştirme meydana gelmektedir. Teğetsel distorsiyon; aşağıdaki (2.14) ve (2.15) eşitlikleri ile hesaplanabilmektedir. Burada  $\delta x_2$  ve  $\delta y_2$  görüntü noktasının  $x$  ve  $y$  görüntü koordinatlarındaki teğetsel distorsiyon etkisini,  $p_1$  ve  $p_2$  teğetsel distorsiyon katsayılarını,  $r$  çapsal mesafeyi ifade etmektedir.

$$\delta x_2 = p_1(r^2 + 2(x - x_0)^2) + 2p_2(x - x_0)(y - y_0) \quad (2.14)$$

$$\delta y_2 = p_2(r^2 + 2(y - y_0)^2) + 2p_1(x - x_0)(y - y_0) \quad (2.15)$$

Sonuç olarak; asal nokta kayıklığı ve izdüşüm düzleminden kaynaklı (2.16) eşitliği ile gösterilen diferansiyel ölçek distorsiyonu da eklenmiş olarak düzeltilmiş görüntü koordinatları yani bozulma ve kayıklık etkilerinin giderildiği  $\ddot{x}$  ve  $\ddot{y}$  görüntü koordinatları (2.17) ve (2.18) eşitlikleri ile hesaplanabilmektedir.

$$\delta x_3 = b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) \quad (2.16)$$

$$\ddot{x} = (x - x_0) + \delta x_1 + \delta x_2 + \delta x_3 \quad (2.17)$$

$$\ddot{y} = (y - y_0) + \delta y_1 + \delta y_2 \quad (2.18)$$

### 2.5.2. Işın Demetleri ile Blok Dengeleme

Işın demetleri dengelemesi çok yönlü, yüksek doğruluklu ve esnek bir çözüm tekniğidir. Bu teknik temel olarak ışın demetlerinin ortak noktalarda kesiştirilmesi esasına dayanır. Bu yöntemin en büyük özelliği, matematiksel modelin genişletilebilir olmasıdır. Bu olanak sayesinde, denklemlere bazı ek parametreler ve yardımcı ölçüler katılabilir. Dengelemenin matematiksel modeli eş-doğrusallık (kolinearite) eşitlikleri ile ifade edilir. Eş-doğrusallık şartı; bir görüntü noktasının, izdüşüm merkezinin ve aynı görüntü noktasının obje uzayındaki karşılığının aynı ışın üzerinde olması gerekliliğinin matematiksel ifadesidir.

Eş-doğrusallık şartı ideal görüntüleme geometrisini tanımlar ancak kameraların sahip olduğu sistematik hatalardan dolayı uygulamada gerçekleşmesi imkânsızdır. Bu şartın uygulamada gerçekleştirilebilmesi için söz konusu kamera sistematik hatalarının kalibrasyon ile yüksek doğruluklarla modellenmesi ve bu doğrultuda gerekli düzeltmelerin getirilmesi gerekmektedir. Kolinearite eşitlikleri Bölüm 2.3.3'de ayrıntılı olarak anlatıldığı üzere hem görüntü koordinatları hem de obje uzay koordinatları cinsinden yazılabilmektedir.

Işın demetleri dengelemesinde ölçülerin (gözlemlerin) görüntü koordinatları olması sebebiyle görüntü koordinatları cinsinden yazılan aşağıdaki (2.19) ve (2.20) kolinearite eşitlikleri kullanılmaktadır. Eşitliklerdeki  $x_0$ ,  $y_0$  asal noktanın görüntü koordinatlarını,  $c$  odak uzaklığını,  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  izdüşüm merkezinin obje uzay koordinatlarını,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  ise aynı görüntü noktasının obje uzay koordinatlarını ifade etmektedir.

$$x = x_0 - c \frac{r_{11}(X-X_0) + r_{21}(Y-Y_0) + r_{31}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0) + r_{23}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} = x_0 - c \frac{Z_x}{N} \quad (2.19)$$

$$y = y_0 - c \frac{r_{12}(X-X_0) + r_{22}(Y-Y_0) + r_{32}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0) + r_{23}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} = y_0 - c \frac{Z_y}{N} \quad (2.20)$$

Kameraların sistematik hataları sebebiyle ideal görüntüleme geometrisinde meydana gelen fiziksel sapmalar, aynı şekilde kolinearite eşitliklerinde de sistematik hatalara neden olurlar. Bu durumda; söz konusu hataları ortadan kaldıracak olan düzeltmelerin yani (2.17) ve (2.18) eşitliklerinde görüntü koordinatlarına getirilen düzeltmelerin kolinearite eşitliklerine eklenmesi gerekmektedir.

Böylelikle uzayın merkezi izdüşüm geometrisinin fiziksel gerçekliği artırılmaktadır. Bu kapsamda kolinearite eşitlikleri aşağıdaki (2.21) ve (2.22) eşitlikleri ile genişletilebilmektedir.

$$x = x_0 - c \frac{z_x}{N} - \delta x_1 - \delta x_2 - \delta x_3 \quad (2.21)$$

$$y = y_0 - c \frac{z_y}{N} - \delta y_1 - \delta y_2 \quad (2.22)$$

Işın demetleri dengelemesi ile; eşitliklerin ihtiva ettiği bilinmeyenler en küçük kareler yöntemine göre çözülebilmektedir. Bu işlem, eşitliklerin bilinmeyenlere göre türevleri alınarak Taylor serilerine açılmak suretiyle gerçekleştirilmektedir. Işın demetleri dengelemesi, uygulamada oldukça başarılı sonuçlar verebilen ve matematiksel modeli geliştirilebilen bir hesaplama tekniğidir. Bu yöntemin doğruluğu, kullanılan referans noktalarının (YKN) doğruluğu, dağılımı ve sayısı ile ilişkilidir. Referans noktası veya YKN sayılarının artırılması yapılan dengelemenin serbestlik derecesini artırarak dengeleme sonuçlarının iyileşmesine katkı sağlamaktadır.

Işın demetleri dengelemesinde önemli olan diğer bir nokta ise; dengeleme neticesinde hesaplanan ve dengelemenin sağlığını gösteren aposteriori (sonsal) varyans faktörünün (AVF) irdelenmesi ihtiyacıdır. Bu durumda;

- Eğer AVF >1 ise ya bazı gözlemlerde kaba hata mevcuttur, ya da ölçülerin gerçek varyansları dengelemeye alınan değerlerinden büyüktür. Bu ise ölçümlerin gereken hassasiyetle yapılmamış olduğunu gösterir.
- Eğer AVF <1 ise ölçülerin hassasiyetinin dengelemeye alınan değerlerinden daha iyi olduğunu yani kovaryans matrisinin kötümser şekilde kurulduğunu gösterir.
- Eğer AVF =1 ise ölçümlerin kaba hata içermediğini ve ölçümlere ait dengelemeye sokulan kovaryans matrisinin ölçümlerin gerçek hassasiyetini yansıttığını gösterir.

Buradaki kritik durum >1 halidir. Bu durumda problem eğer kaba hatalı ölçülerden kaynaklanıyorsa bunlar belirlenir ve gözlemlerden ayıklanır ve dengeleme tekrar edilir. Eğer kaba hata olmamasına rağmen >1 ise bunun için dengelemeyi tekrar etmeye gerek yoktur, ancak bütün kovaryans matrislerinin sonsal varyans ile çarpılarak büyütülmesi gerekmektedir.

### 2.5.3. Kolinearite Eşitliklerinin Doğrusallaştırılması

Eş-doğrusallık denklemlerinin bilinmeyenlere göre birinci dereceden türevleri alınarak Taylor serisine açılmak suretiyle doğrusallaştırılması yapılabilmektedir. Bu doğrusallaştırma işlemi, yapılacak dengelemelerde katsayılar (dizayn) matrisinin oluşturulmasında kullanılmaktadır.

$$Z_x = r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0) \quad (2.23)$$

$$Z_y = r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0) \quad (2.24)$$

$$N = r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0) \quad (2.25)$$

Eş-doğrusallık denklemlerinin pay ve paydalarını yukarıdaki (2.23), (2.24) ve (2.25) eşitliklerdeki gibi isimlendirilecek olursak; aşağıdaki (2.26) ve (2.27) eşitlikleri ile düzeltilmiş görüntü koordinatları cinsinden, (2.28) ve (2.29) eşitlikleri ile ise ham (hatalı) görüntü koordinatları cinsinden yeniden ifade edilebilmektedir.

$$\ddot{x} = -c \frac{Z_x}{N} \quad (2.26)$$

$$\ddot{y} = -c \frac{Z_y}{N} \quad (2.27)$$

$$x = x_0 - c \frac{Z_x}{N} - \delta x_1 - \delta x_2 - \delta x_3 \quad (2.28)$$

$$y = y_0 - c \frac{Z_y}{N} - \delta y_1 - \delta y_2 \quad (2.29)$$

Yalnızca dış yöneltme parametrelerinin belirlenmesi için yapılacak dengelemelerde gözlemler (ölçümler) olarak, kamera kalibrasyon parametreleri yardımıyla düzeltilen görüntü koordinatları kullanılmakta ve dolayısıyla da bu koordinatları ifade eden (2.26) ve (2.27) eşitlikleri ile ele alınmaktadır.

Kamera kalibrasyonu için yapılacak dengelemelerde ise; gözlemler (ölçümler) olarak, belirlenmek istenen bütün kamera iç yöneltme bilinmeyenlerini ihtiva eden ham (hatalı) görüntü koordinatları kullanılmakta ve dolayısıyla da bu koordinatları ifade eden (2.28) ve (2.29) eşitlikleri ile ele alınmaktadır.

Bu kapsamda yapılacak olan dengelemelerin katsayılar (dizayn) matrislerini oluşturan eş doğrusallık (kolinearite) denklemlerinin bilinmeyenlere göre birinci dereceden türevleri **EK-1**'de sunulmuştur.

#### 2.5.4. Direkt Lineer Dönüşüm (Direct Linear Transformation - DLT)

Direkt lineer dönüşüm (Direct Linear Transformation – DLT) metrik olmayan kameraların kullanıldığı çalışmalara oldukça uygun bir yöntemdir. Bunun en önemli sebebi dönüşüm parametrelerinin yaklaşık değerlerinin bilinmediği durumlarda bu yöntem ile çözüm yapılabilir olmasıdır. Direkt lineer dönüşümün matematiksel modeli, kolinearite eşitliklerinden elde edilen, görüntü ve nesne koordinatları arasındaki direkt lineer ilişkidir. Bu model (2.30) ve (2.31) eşitlikleri ile ifade edilmektedir.

$$x - \delta x = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \quad (2.30)$$

$$y - \delta y = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \quad (2.31)$$

Burada  $x$  ve  $y$  görüntü koordinatları,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  obje uzay koordinatları  $\delta x$  ve  $\delta y$  kamera sistematik hatalarıdır (mercek distorsiyonları). Eşitliklerdeki bilinmeyen 11 parametre ( $L_i$ ), en az 6 referans noktasıyla iteratif olarak çözülebilir (Khalil, 2002).  $\delta x$  ve  $\delta y$  parametrelerinin de hesaplanması durumunda ilave 5 parametre (mercek distorsiyonları) daha eklenerek bilinmeyen sayısı 16 ya yükselmektedir. Bu durumda da çözüm için aynı düzlem üzerinde olmayan en az 8 referans noktası gerekmektedir.

#### 2.6. Yersel Fotogrametri

Yakın mesafe fotogrametrisi olarak da isimlendirilen yersel fotogrametri; matematik, optik ve fotogrametrik temeller açısından hava fotogrametrisi ile aynı esasları kullanmaktadır. Yersel fotogrametriyi hava fotogrametrisinden ayıran ana özellik ise kullanım alanlarının ve görüntü alım metodunun çeşitliliğidir.

Hava fotogrametrisinin asıl amacının coğrafi veri üretimi olması sebebiyle her zaman dik görüntü alımı yapılırken, yersel fotogrametrinin amacının çoğunlukla obje modelleme, deformasyon analizi ve cerrahi ölçümler olması sebebiyle bir bölge veya nesneye veya alana odaklı eğik görüntü alımları ön plana çıkmaktadır. Hava fotogrametrisinde veri üretimi yapılacak alan birçok stereo modelle kapatılırken, yersel fotogrametride büyük çoğunlukla her görüntü ve her stereo model veri üretimi veya ölçümü yapılan objeyi kapatacak şekilde alım yapılmaktadır. Bu doktora ve tez çalışması ile hayata geçirilen ve ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılan Cerrahi Navigasyon Sistemi bir yersel fotogrametri uygulamasıdır.

### 3. CERRAHİ NAVİGASYON SİSTEMLERİ

Cerrahi navigasyon uygulamalarında amaç, ameliyat öncesi elde edilen bilgisayarlı tomografi (CT veya MR) görüntüleri ile ameliyat bölgesi anatomisi arasında bağlantı kurarak, cerrahi aletlerin tutma, kesme gibi fonksiyona sahip uç kısımlarını ilgili vücut bölgesinin karmaşık anatomisi içinde takip etmektir. Bu teknoloji ile kritik yapı ve organların bölgeleri kolaylıkla ve çok az yanılma ile belirlenmekte ve mevcut hastalık bu yapılara zarar vermeden hassas bir şekilde ve tam olarak temizlenebilmektedir.

Cerrahi navigasyonda en önemli unsur “doğruluk” yani monitörde tomografi üzerinde gösterilen nokta ile anatomi içinde bulunan gerçek noktanın birbiri ile örtüşme derecesidir. Görüntüleme (tomografi tekniği) hatası, üç boyutlu yapılandırma hatası, hastanın hareket etmesine bağlı hatalar ve izleme sistemi hatası gibi sebepler doğruluğu etkileyebilmektedir.

#### 3.1. Cerrahi Navigasyonun Başlıca Avantajları

Klasik yöntemler ile yapılan cerrahi müdahaleler ile karşılaştırıldıklarında cerrahi navigasyon sistemlerinin öne çıkan avantajlarını aşağıdaki ana maddeler ile sıralamak mümkündür (Dal, 2021);

- İki boyutlu endoskopik görüntüde üç boyutlu yol haritası sağlaması,
- Ulaşılması zor olan anatomik bölgelere güvenli yaklaşım sağlaması,
- Daha az travma ile hassas cerrahi yapılabilmesi,
- Ameliyat süresinin kısalması,
- Komplikasyon ihtimalinin önemli oranda azalması,
- Ameliyat başarı oranının artması,
- Nüks (hastalığın tekrarlaması) ihtimalinin azalması,
- İlgili vücut dokusuna giriş için minimum düzeyde kesi yapılması,
- En etkin işlem için ameliyat öncesi simülasyon yapılabilmesi,
- Yapılan cerrahi işlemlerin detaylı olarak kayıt altına alınabilmesi,
- Daha az insan gücüne ihtiyaç duyulması.

### 3.2. Cerrahi Navigasyonun Faydalı Olduğu Durumlar

Günümüzde sağladığı güvenlik nedeni ile standart endoskopik cerrahi vakalarında bile kullanılmakta olan cerrahi navigasyon sistemleri özellikle;

- Kafatasının açılmasının yüksek enfeksiyon riski oluşturduğu beyin tümörlerinin biyopsi işlemlerinde,
- Sinüs ve kafa tabanındaki tümörlerin ameliyatlarında,
- Doğumsal olarak anatomisi bozuk olan (anomalili) hastaların ameliyatlarında,
- Daha önce geçirilmiş ameliyat ya da travmaya bağlı olarak sinüs anatomisi değişmiş hastalarda,
- Kritik anatomik organ komşulukları olan alın sinüsü, arka etmoid ve sfenoid sinüs hastalıklarında,
- Mantarların neden olduğu sinüzitlerde,
- Yaygın polip nedeni ile anatomik yapıların tanınması güç olan hastalarda,
- Beyin içerisindeki hipofiz bezi ve kafa tabanı girişimlerinde,
- Göz çukurunu ve göz yaşı kesesini ilgilendiren ameliyatlarda,
- Beyin omurilik sıvısı kaçaqlarının onarılmasında,
- Yüksek doğruluk gerektiren sinir bölgelerinin ameliyatlarında,
- Mikro cerrahi işlem gerektiren bölgelerin ameliyatlarında,

Ameliyatın başarı oranını artırması ve ameliyat sırasında istenmeyen problemlerin (komplikasyonların) oluşma riskini belirgin olarak azaltmalarından dolayı çok önemli faydalar sağlamaktadırlar (Dal, 2021).

Cerrahi navigasyon sistemleri; günümüz teknolojilerine bağlı olarak birçok bilim dalının ve bu bilimlere esas alan birçok disiplinin birlikte ve uyum içerisinde çalıştığı gelişmiş bütünlük sistemlerdir. Söz konusu cerrahi navigasyon işlemlerinin çeşitliliğine ve gerekliliklerine bağlı olarak sistemsel anlamda farklılık arz etmektedirler. Günümüzde yaygın olarak kullanılan cerrahi navigasyon sistemleri **Haptik (Dokunsal) Robotik Sistemler** ve **Optik Sistemler** olarak iki farklı başlık altında ele alınmaktadır.





## 4. SİSTEM TASARIMI

### 4.1. Sistemin Genel Tasarımı

Bu tez çalışması kapsamında hayata geçirilen fotogrametrik cerrahi navigasyon ölçümü yazılımına ait detaylı sistem tasarımı yapılmış ve ölçümlerde kullanılacak referans yüzey, sonda ve diğer donanımların prototipleri hazırlanarak iki adet kızılötesi (IR) kamera temin edilmiştir. Yazılımın dayanağı olan bilimsel temeller kapsamlı bir şekilde yeniden irdelenerek sistemin ana algoritma omurgası oluşturulmuştur.

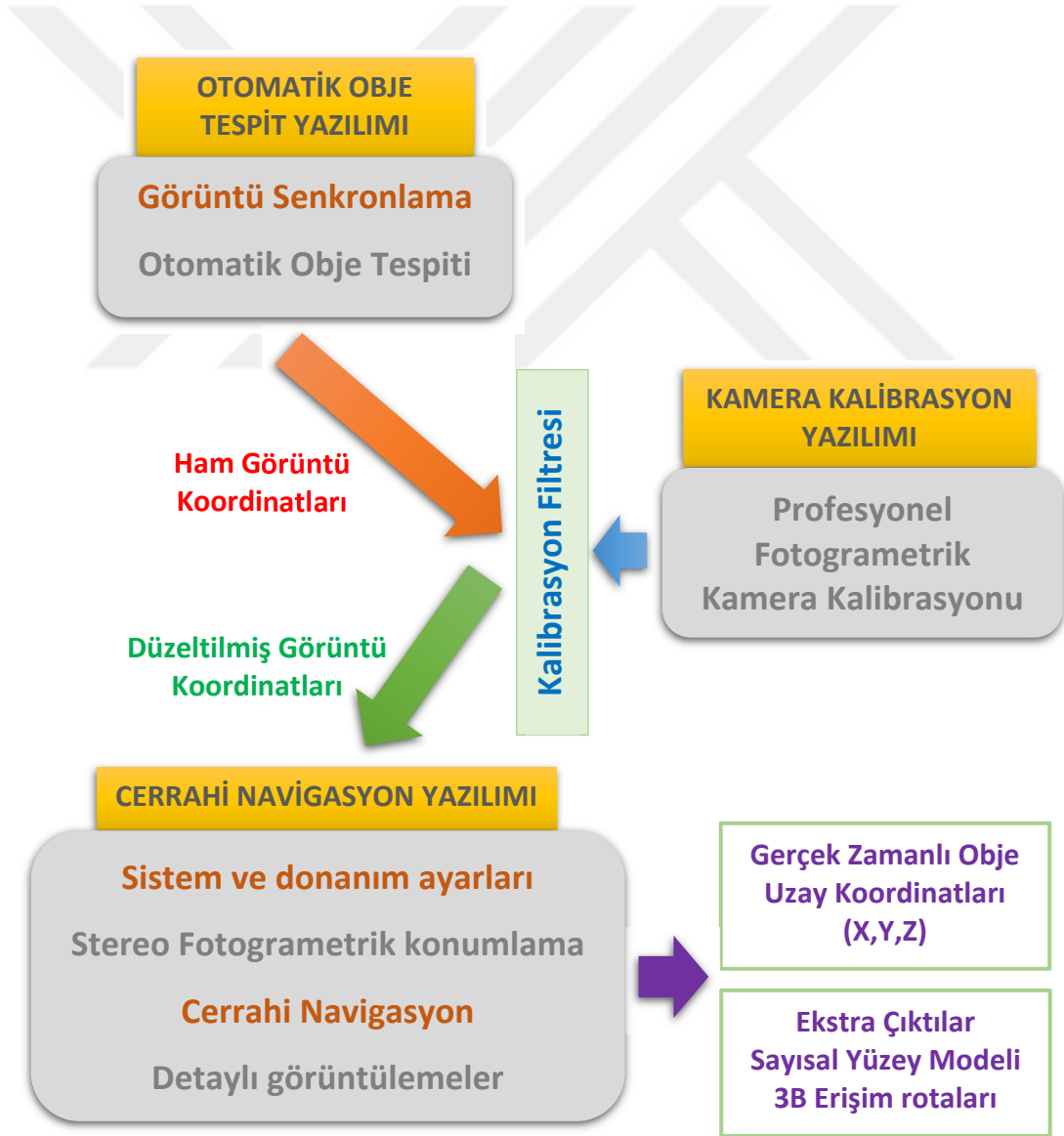
Sistem genel olarak üç yazılım üzerine inşa edilmiştir. Bunlardan birincisi NIR olarak elde edilen siyah beyaz görüntüleri işleyerek ortamdaki gümüş topların görüntü koordinatlarını saniyede 120 kareye kadar tespit eden **Video Görüntülerden Otomatik Obje Tespit Yazılımı**'dır. Söz konusu yazılım, akışkan görüntülerle (streaming video) daha iyi çalışma imkânı sağladığı için C++ dilinde yazılmıştır. Yazılım, her iki kameradan gelen akışkan video görüntüleri zamansal olarak aralarında kayıklık (offset) olmayacak şekilde stereo karelere (çiftlere) ayırıp her bir kare içerisindeki gümüş topun (kürenin) merkezinin izdüşüm düzlemi üzerindeki görüntü koordinatlarını  $\pm 0,4$  piksel, diğer bir deyişle  $\pm 2,4$  mikron hassasiyetle belirlemektedir (görüntü çözünürlüğü 640 x 480 ve bir piksel boyutu 6 mikron olan bir kamera için).

İkinci ve ana yazılım olan, fotogrametrik ölçüm, dengeleme ve hareketli obje konumlama işlemlerini yapan **Cerrahi Navigasyon Sistemi Yazılımı** ile yüksek konum doğruluğu için geliştirilen ve üçüncü yazılım olan **Kamera Kalibrasyon Yazılımı** ise yoğun dengeleme algoritmalarının ve matris çarpımlarının daha pratik hızlı olarak yapılabilirdiği C# dilinde geliştirilmiştir. Her üç yazılım da Visual Studio platformunda geliştirildiğinden aralarındaki bağlantı algoritmaları tesis edilerek birbirleri ile senkronize olarak çalışmaları sağlanmıştır. Söz konusu ana ölçüm yazılımı obje tespit yazılımından gelen görüntü koordinatlarından 3B obje uzayı koordinatlarına dönüşümü ardışık olarak yapmakta ve bu sayede hareketin konumu hassas olarak takip edilebilmektedir.

Yazılım; uzayın merkezi izdüşümü, eş-doğrusallık (kolinearite) eşitlikleri ve uzayda 3B benzerlik dönüşümünü esas alarak bu temeller üzerinde ardışık olarak çoklu iterasyona sahip dengeleme ve hesaplamalar ile nihai sonuca ulaşmaktadır. Bunun yanı sıra, sistem çalışırken oluşabilecek nokta tespit ve konumlama hatalarının önüne geçebilmek adına yazılımda gerekli yerlere kontrol algoritmaları eklenmiştir.

## 4.2. Sistem Mimarisi ve İş Akışı

Bu tez çalışması ile ortaya konulan sistemin özellikle beyin tümörlerinin biyopsi işlemlerinde kullanılması planlanmaktadır. Bu sebeple; geliştirilen yazılım ve kullanılan bilimsel teknikler fotogrametrik olarak yüksek doğruluklu ölçüm ihtiyacı duyulan farklı cerrahi alanlara, mühendislik ölçümlerine ve modelleme uygulamalarına altlık olabilecek sonuçlar üretmektedir. Özellikle; Kamera Kalibrasyonu Yazılımı kullanılarak yersel veya havai fotogrametrik uygulamalarda kullanılan bütün metrik kameraların profesyonel fotogrametrik kalibrasyonu yapılabilmekte ve böylelikle daha yüksek konum doğrulukları elde edilebilmektedir. Geliştirilen yazılımlara ait tasarım grafiği Şekil 4.1’de, iş akış grafiği ise Şekil 4.2’de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Geliştirilen yazılımlara ait tasarım grafiği



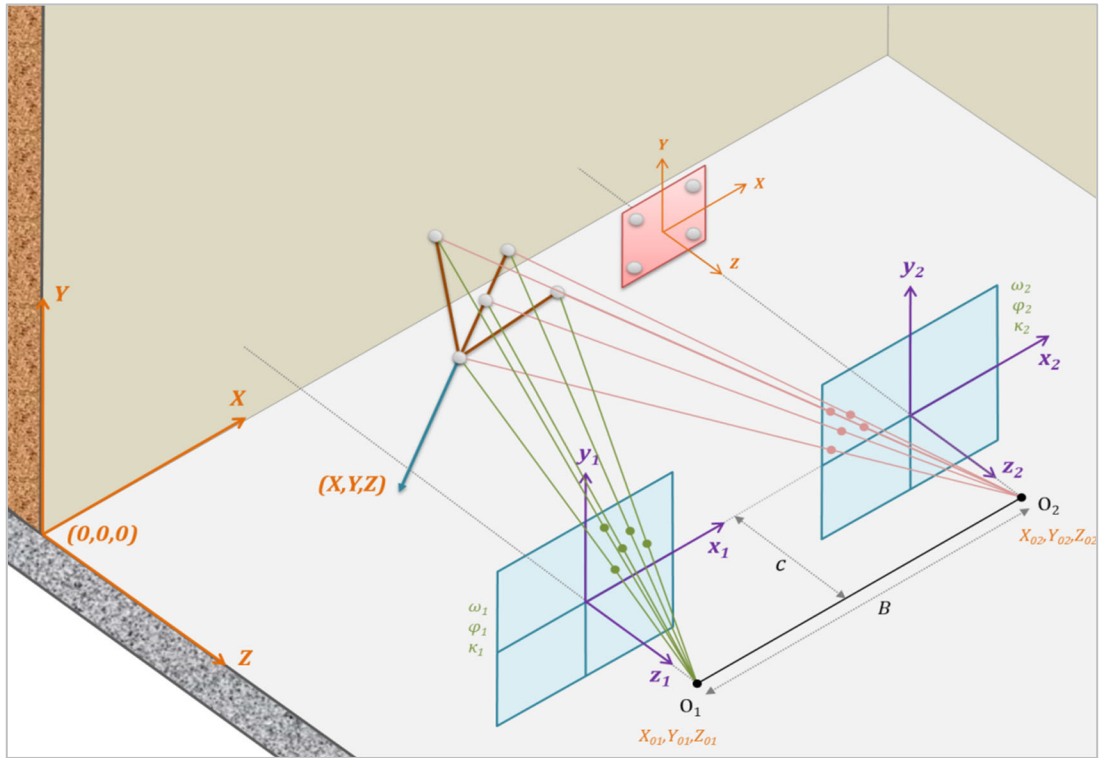
Şekil 4.2. Geliştirilen yazılımlara ait iş akış grafiği

Cerrahi navigasyon sistemi kapsamında geliştirilen yazılımlar ve bütün alt modülleri genel olarak Şekil 4.2’de özet olarak gösterilen iş akış döngüsünü farklı kombinasyonlarda çalıştırmaktadırlar. Döngü içerisindeki her bir ana işlem bölümü, yapılan ölçüm veya operasyonun özelliklerine bağlı birçok kontrol algoritması içermekte ve sağlanması gereken kriterler karşılanmadan, özellikle de doğruluk ve tutarlılık kapsamında belirlenen eşik değerleri sağlanmadan diğer adımlara geçilmemektedir. Uygulama bölümünde detaylı ve kapsamlı bir şekilde anlatılacak olan adımlar içerisindeki söz konusu kontroller esnasında çıkan sonuçlar ve varsa sorunların çözümü için yapılması gerekenler yazılımın arayüzleri üzerinden gerçek zamanlı ve görsel olarak kullanıcıya/operatöre iletilmektedir.

### 4.3. Ölçüm Tekniği ve Sistem Bileşenleri

Bu tez çalışmasında tasarımı yapılarak hayata geçirilen sistem ile elde edilen yüksek doğruluklu yakın mesafe ölçümleri optik esaslara dayanan yersel fotogrametrik teknikler üzerine inşa edilmiştir. Diğer bölümlerde anlatılan bütün donanımlar ve yazılımlar bu teknik üzerinde uyumlu ve etkin çalışacak şekilde tasarlanmış ve seçilmiştir. Şekil 4.3’de temsili olarak gösterildiği üzere sistem;

- Kameraların kendilerini anlık olarak konumlandırabileceği bir koordinat sistemini tanımlayan bir referans yüzey (Bölüm 4.4.2),
- Belirli bir baz aralığında ve belirli bir açıda içe dönük olarak tasarlanmış stereo kamera seti (buradaki parametrelerin belirlenmesi Bölüm 4.5’de ayrıntılı olarak ele alınmıştır),
- Kameraların stereo görüş alanı içerisinde olmak şartıyla bütün nokta ve mesafe ölçümleri için kullanılan hareketli bir sonda (Bölüm 4.4.3),
- Bütün bu donanımları kullanarak gerçek zamanlı obje tespiti ve konum bilgisi üreten cerrahi navigasyon yazılımı ve yüksek konum doğruluğu için geliştirilen alt modüllerinden oluşmaktadır.



Şekil 4.3. Ölçüm tekniğinin yersel fotogrametrik olarak gösterimi

## 4.4. Donanım Gereksinimleri

### 4.4.1. Kamera

Tez çalışması kapsamında tasarlanan sistemin görüntüleme donanımı, OptiTrack marka Slim3U mono kamera ve iki adet Slim3U kameradan oluşan V120 Duo stereo kamera setidir. OptiTrack Slim3U kamera, 800 nm IR (Kızılötesi) filtresi ve farklı görüntüleme seçenekleri ile küçük alanlarda takip ve izleme imkânı sunmaktadır. Kameraların genel görünümü Şekil 4.4'de, teknik özellikleri ise Tablo 4.1'de sunulmuştur (OptiTrack, 2016).



Şekil 4.4. OptiTrack Slim3U ve V120 Duo Kamera

Tablo 4.1. OptiTrack Slim3U kameranın teknik özellikleri

| Özellikler                             | Değerler                       |
|--|--------------------------------|
| Görüntüleyici Boyutu (İzdüşüm Düzlemi) | 3,84 mm x 2,88 mm              |
| Görüntü Çözünürlüğü                    | 640 x 480                      |
| Piksel Fiziksel Boyutu                 | 6µm                            |
| Odak Uzaklığı                          | 3,5 mm                         |
| Çerçeve Hızı (Frame Rate)              | Saniyede 30/60/120 kare (fps)  |
| Görüntü İşleme Modları                 | Kızılötesi ve Gri Tonlamalı    |
| Filtre                                 | 800 nm IR filtre (Kızılötesi)  |
| Led Halka                              | 26 adet 850 nm IR (Kızılötesi) |

#### 4.4.2. Referans Yüzey

Stereo olarak görüntülenen bir bölgede eş-düzlemsellik (koplanarite) koşulu yardımı ile herhangi bir koordinat sistemine bağlanmadan ve referans noktalar kullanmadan yani hava fotogrametrisinde kullandığımız Yer Kontrol Noktaları (YKN) kullanmadan konum bilgisi elde edebilmek mümkündür. Bu durumda; koordinat sistemi eş-düzlemsel olan stereo görüntü koordinat sisteminde tanımlı olduğundan, kameraların konumları bilerek ya da bilmeyerek değiştiği anda yeni bir koordinat sistemi oluşmakta ve ölçülen mesafeler teorik olarak aynı kalsa da ölçülen noktaların görüntü koordinatlarının değişmesi sebebiyle uzay koordinatları da değişmektedir. Oysa ki; bu tez çalışmasında tasarlanan sistemde görüntülenen alanda tanımlanmış bir obje uzay koordinat sistemi ve bu koordinat sisteminde sabitlenmiş bir hasta üzerinde çalışma yapılması yani kamera platformu oynatılsa bile ölçülen nokta konumlarının aynı kalması arzu edilmektedir. Bu sebeple aşağıdaki kriterleri sağlayan bir referans yüzeyin kullanılması gerekmektedir;

- Objeye uzay koordinat sistemine referans teşkil edecek sayıda yeterli referans nokta (YKN) yani gümüş top içermelidir,
- Sağ ve sol görüntüler üzerinde mümkün olduğu kadar geniş alana yayılabilecek ve referanslama doğruluk kriterimizi karşılayacak kadar büyük olmalıdır,
- Operasyon esnasında her zaman stereo görüntüleme alanı içerisine kalacak ve görünür olacak kadar küçük olmalıdır,
- Kendi içerisinde gümüş topların lokal koordinatları yüksek doğrulukla bilinmelidir.

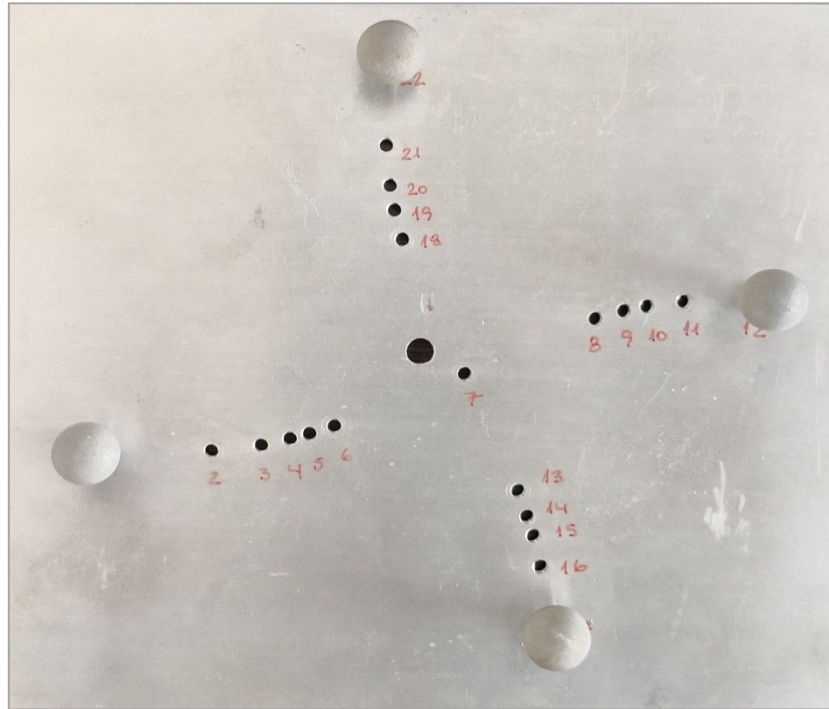
Bu referans yüzey sayesinde saniyede çekilen her senkronize görüntü çifti için kameraların anlık dış yöneltme parametreleri (referans yüzeyin tanımladığı obje uzay koordinat sistemindeki 3B öteleme ve dönüklük parametreleri) hesaplanmaktadır. Dolayısıyla, kamera platformunun hareketinden bağımsız olarak stereo görüntüleme alanı içerisindeki bütün ölçümler sabit bir koordinat sisteminde yapılmaktadır. Burada önemli olan nokta; ölçümü yapılacak hasta veya objelerin ölçüme başlamadan önce sabitlenmesidir. Bu sabitleme referans yüzey ile ilgili objelerin birbirlerine sıkıca sabitlenmesi şeklinde olmaktadır.

Kameraların dış yöneltme parametreleri anlık ve gerçek zamanlı olarak hesaplanırken eş-doğrusallık (kolinearite) denklemleri kullanılmaktadır ve referans

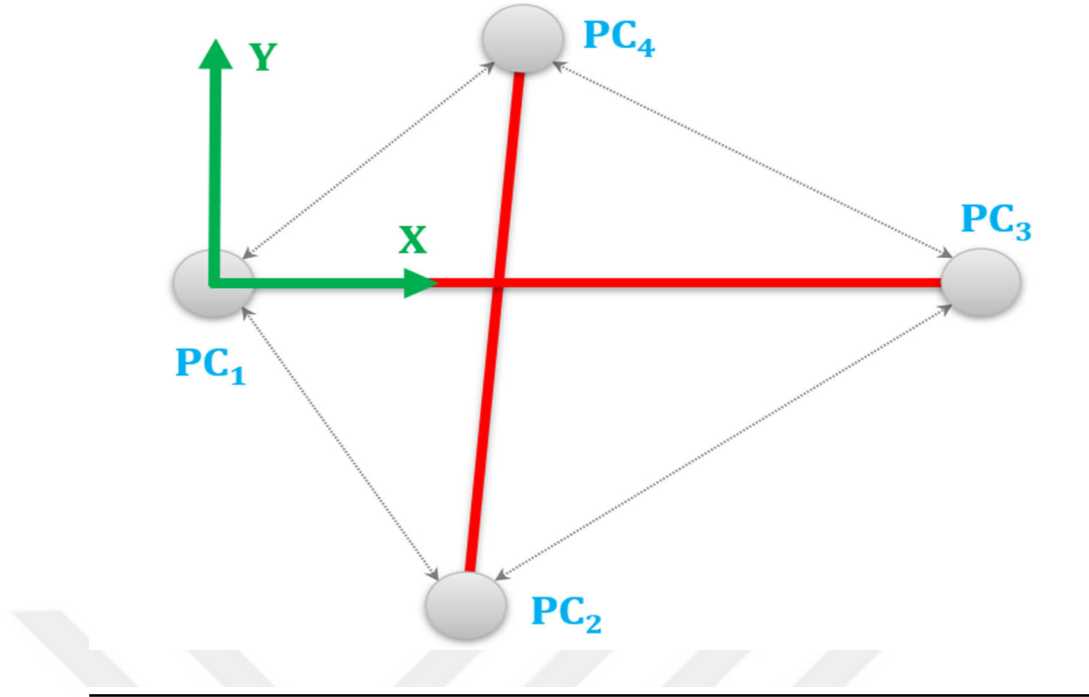
yüzey üzerinde bulunması gereken nokta sayısı bu dengelemeye serbestlik derecesi kazandıracak sayıda yeterli ve minimum olarak belirlenmiştir. Bu durumu Tablo 4.2’de sunulan parametreler ışığında açıklayacak olursak; 12 adet dış yöneltme parametresinin (öteleme ve dönüklük) çözümü için teorik olarak 3 adet referans noktası yeterlidir fakat bu durumda  $n = u$  olması sebebiyle dengelemenin serbestlik derecesi  $s = 0$  (sıfır) olacağından, söz konusu çözümün dengeleme olabilmesi için 1 nokta daha ilave edilerek çözüme gidildiğinde  $n = 4 \times 4 = 16$ ,  $u = 12$  ve  $s = 16 - 12 = 4$  (serbestlik derecesi) olacağından toplam 4 nokta yeterli kabul edilmiştir. Tasarımı yapılan ve önceden temin edilerek hâlihazırda kullanılan referans yüzeylere ait görseller Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da sunulmuştur.

Tablo 4.2. Gerçek zamanlı EKK dengeleme karakteristiği

| Sembol | Açıklama  |
|--------|---|
| $n$    | Her bir referans noktasına ait her görüntüde 2 adet olmak üzere $x$ ve $y$ görüntü koordinatlarından oluşan gözlem (ölçüm) sayısı |
| $u$    | Her görüntü için 6 adet olmak üzere toplam 12 dış yöneltme parametresi.   |
| $s$    | Dengelemenin serbestlik derecesi ( $n - u$ )  |



Şekil 4.5. Tasarımı yapılan referans yüzey



| NO  | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) |
|-----|--------|--------|--------|
| PC1 | 0,00   | 0,00   | 0,00   |
| PC2 | 28,99  | -47,38 | 0,00   |
| PC3 | 89,10  | 0,00   | 0,00   |
| PC4 | 35,36  | 35,36  | 0,00   |



Şekil 4.6. Çalışmalarda kullanılan NDI marka referans yüzey

#### 4.4.3. Hareketli Sonda

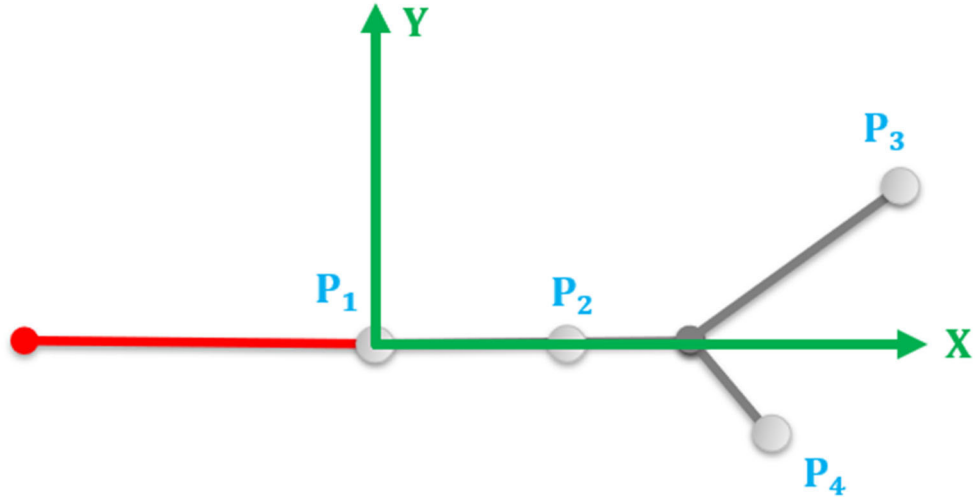
Hareketli sonda; gerçek zamanlı ölçümler esnasında ölçüm uzayında keyfi olarak kullanılan ve 3B ölçümlerin hassas ve yüksek doğrulukla yapılmasını sağlayan bileşendir. Dolayısıyla referans yüzeydekine benzer aşağıdaki önemli kriterleri sağlaması gerekmektedir;

- IR kamera görüntülerinden kolaylıkla tespit edilebilen yeterli sayıda ve doğruluğu artırmak için aynı düzlemde olan gümüş toplar içermelidir,
- Hareketli olması ve uzayda herhangi bir yöne keyfi olarak çevrilebilmesi sebebiyle gümüş topların otomatik tespitinin ve numaralandırılmasının kolay olması için özgün bir geometride olmalıdır,
- Kendi içerisinde gümüş topların lokal koordinatları yüksek doğrulukla bilinmelidir,
- Kullanıcıya kolaylık sağlayan ve her zaman stereo görüntüleme alanı içerisine kalarak görünür olan, küçük ve ergonomik bir yapıda olmalıdır.

Bu sayede sonda üzerindeki gümüş toplara ait gerçek zamanlı stereo görüntü koordinatları yine anlık olarak hesaplanan dış yöneltme parametreleri ile hesaba sokularak önce gümüş topların obje uzay koordinatları, sonra ise benzerlik dönüşümü yardımıyla sonda ucunun anlık koordinatı üretilmektedir. Bu konu uygulama bölümünde detaylı olarak ele alınmaktadır. Tasarımı yapılan ve önceden temin edilerek kullanılan sondalara ait görseller Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de sunulmuştur.



Şekil 4.7. Tasarımı yapılan hareketli sonda



| NO | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) |
|----|--------|--------|--------|
| P1 | 0,00   | 0,00   | 0,00   |
| P2 | 50,00  | 0,00   | 0,00   |
| P3 | 135,00 | 25,00  | 0,00   |
| P4 | 100,00 | -25,00 | 0,00   |



Şekil 4.8. Çalışmalarda kullanılan NDI marka sonda

#### 4.4.4. Gümüş (Küre) Toplar

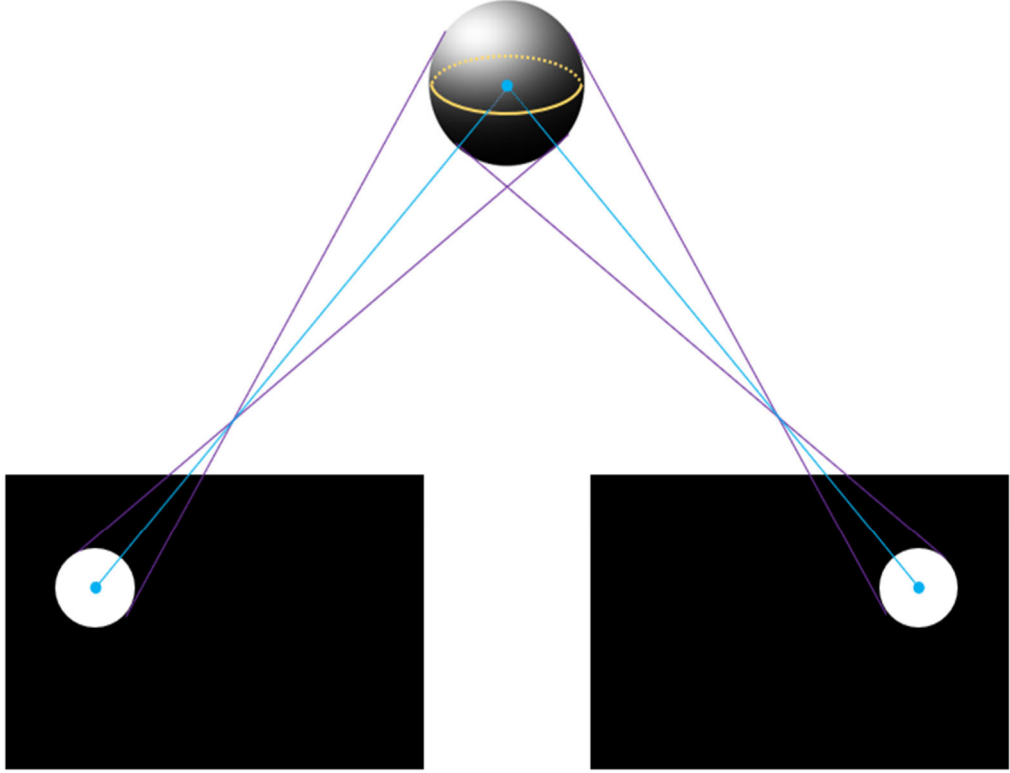
Geleneksel hava fotogrametrisi yönteminde görüntüler alındıktan sonra bütün üretim işlemleri post proses ile daha sonra ofis ortamında yapılmaktadır. Bu post proses işleminin en önemli ayağı ise konumsal veri üretimine geçmeden bütün görüntülerin dış yöneltme parametrelerini yüksek doğruluk ve duyarlılıkla belirlemektir. Bu ise konumları yüksek doğrulukla bilinen YKN'ler veya GPS/IMU çözümleri ile mümkün olmaktadır.

Bu tez çalışmasında hayata geçirilen yersel fotogrametrik ölçüm tekniğinde ise geleneksel hava fotogrametrisinin aksine GPS/IMU gibi bir destek olmadan YKN mantığı ile aynı kabul edilen ve konumları yüksek doğrulukla bilinen referans noktalarının gerçek zamanlı ve anlık olarak (saniyede çekilen her stereo görüntü çifti için) tespit edilmesi ve aynı zamanda bu tespite bağlı olarak bütün dengeleme ve sonda hareketinin hassas olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple; öncelikli olarak kızılötesi bantta çok net olarak kendini belli eden gümüş yüzeylerin referans noktalarının tespitinde kullanılmasına karar verilmiştir. Kullanılacak olan referans noktalarının geometrik şekline gelince; kameraların görüntüleme ve bakış açısından bağımsız olarak izdüşüm düzlemlerinde hep aynı geometrik şeklin çıkması ve otomatik görüntü işleme algoritmaları tarafından tespitinin daha kolay ve daha hızlı yapılması açısından Şekil 4.9'da gösterilen 12,7 mm çapındaki gümüş kaplamalı topların referans nokta (YKN) olarak referans yüzeyler üzerinde ve hareket tespiti için sondalar üzerinde kullanılmasına karar verilmiştir.



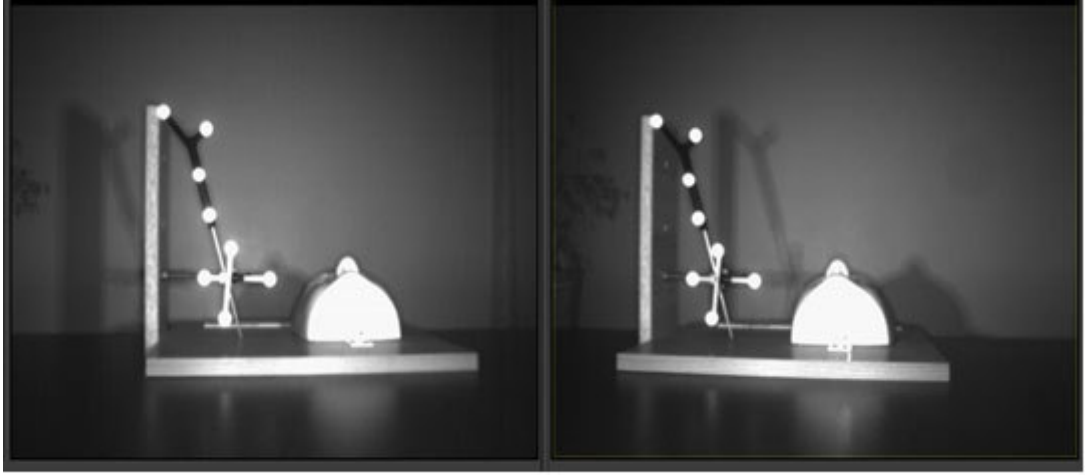
Şekil 4.9. Gümüş kaplı (küre) toplar

Bu durumu daha net açıklamak adına; sadece anlık bir stereo görüntü çifti ele alınacak olursa, gümüş bir topun sağ ve sol görüntü düzlemleri üzerine izdüşümleri her zaman tam bir daire şeklinde olmakta ve bu dairelerin tam orta noktalarına ait görüntü koordinatları işleme sokulduğunda, obje uzay koordinat sisteminde hesaplanan 3B kartezyen koordinatlar ilgili gümüş topun (kürenin) tam merkezini ifade etmektedir. Uzayın merkezi izdüşümünü esas alan söz konusu ışın demeti geometrisi Şekil 4.10'da kolaylıkla görülmektedir.

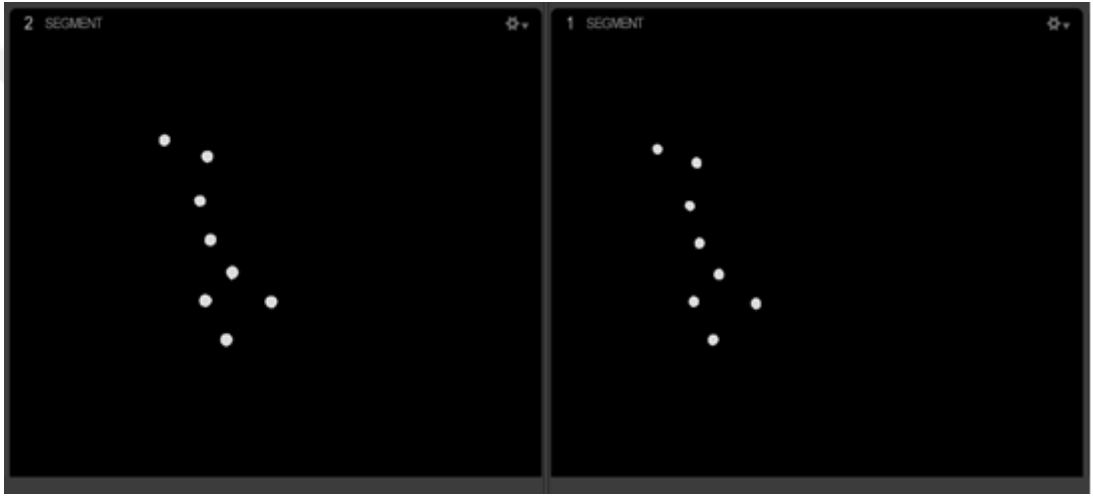


Şekil 4.10. Kürenin izdüşümü ve ışınların uzayda kesişim noktası

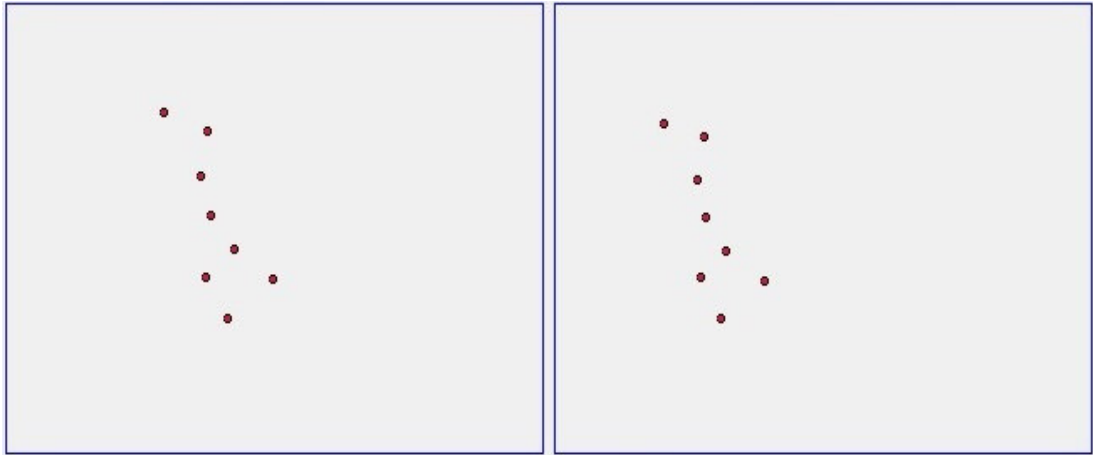
Sadece referans yüzey ve hareketli sonda üzerinde olacak şekilde ve operasyon ortamında aynı yansımayı yapacak diğer materyallerden kaçınmak şartıyla söz konusu gümüş topların 800 nm IR filtre kullanılarak siyah beyaz olarak görüntülenmesi çok net olarak gümüş topları ortaya çıkarmakta ve bütün gümüş topların anlık görüntü koordinatları uygulama bölümünde detaylı olarak bahsedilecek olan obje tespit yazılımı tarafından gerçek zamanlı ve anlık olarak saniyede 120 kareye kadar başarıyla elde edilebilmektedir. Şekil 4.11'de ölçüm ortamına ait gri tonlamalı görüntüler (a), 800 nm kızılötesi (InfraRed) filtrelenmiş görüntüler (b) ve otomatik olarak tespit edilmiş objelere (gümüş toplara) ait ekran görüntüsü (c) sunulmuştur.



(a) Gri tonlamalı



(b) Kızılötesi (InfraRed)



(c) Otomatik tespit

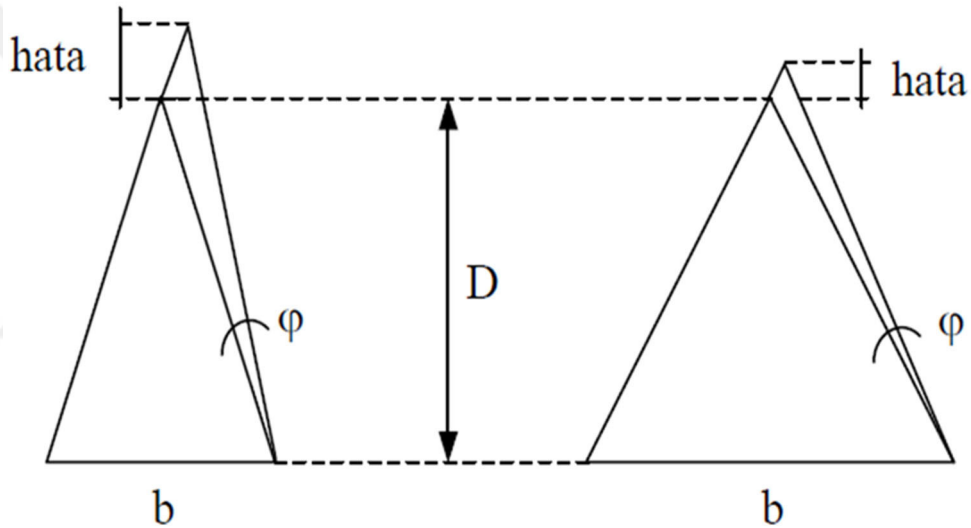
Şekil 4.11. Ölçüm ortamına ait örnek stereo görüntüler

#### 4.5. Görüntüleme Geometrisinin Tasarımı

Yersel fotogrametrik tekniklerle ölçüm yapılacak olan alanın büyüklüğü, kameralara olan mesafesi ve elde edilmek istenen konum doğruluğu kapsamında öncelikli olarak stereo kamera sisteminin yapısına ilişkin birtakım parametrelerin irdelenmesi ve belirlenmesi gerekmektedir.

##### 4.5.1. Stereo Baz Aralığının Belirlenmesi

Yersel fotogrametride derinlik belirlemede %0,1'lik oransal doğruluk için baz oranı  $1/4 \geq b/D \geq 1/20$  aralığında bulunmalıdır. Ortalama değer olarak %0,1'lik bir hassasiyet için  $b/D \geq 1/10$  şartı sağlanmalıdır. Yani sonuç olarak baz oranı  $1/4 \geq b/D \geq 1/10$  aralığında bulunmalıdır.

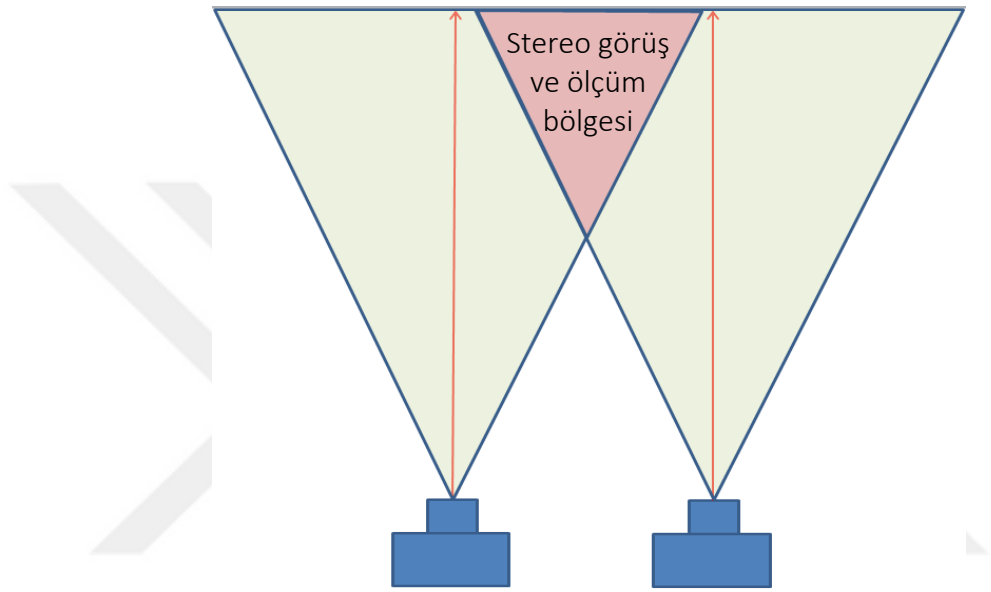


Şekil 4.12. Aynı mesafede baza bağlı olarak derinlik belirleme hatası

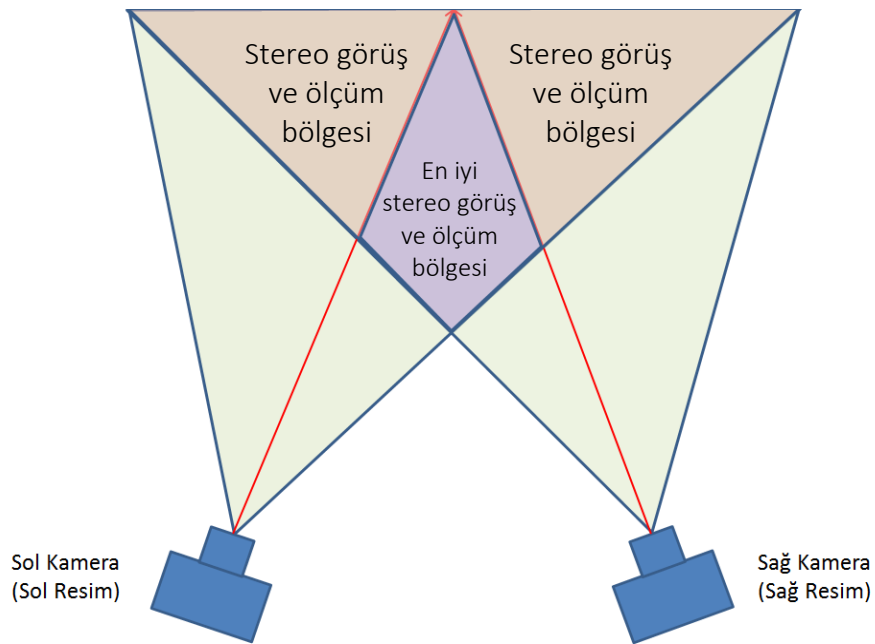
Yapılan testler sonucunda OptiTrack Slim3U kameralar ile maksimum sağlıklı obje (gümüş top) tespit mesafesi 3 m olarak belirlenmiştir. Yukarıdaki esaslardan da anlaşıldığı üzere baz aralığının artırılması derinlik belirlemedeki hassasiyeti artırmaktadır. Şekil 4.12'de kolaylıkla görüldüğü üzere  $\alpha$  birim kadar bir  $\phi$  açısı hatası daha büyük bir baz aralığında daha küçük bir derinlik (Z) hatasına neden olmaktadır. Yukarıda değinilen esaslar dikkate alındığında stereo kameraların minimum 30 cm, maksimum ise 75 cm baz aralığına sahip olması gerekmektedir. Derinlik hassasiyeti açısından stereo baz aralığı, üst sınır olan 75 cm veya buna yakın bir değer olması gerekse de bunu kısıtlayan hususlar aşağıdaki stereo görüntüleme alanı ile ilgili bölümde irdelenerek nihai sonuca ulaşılmıştır.

#### 4.5.2. Etkili Kullanım Alanının Belirlenmesi

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 dikkate alındığında kameraların içe dönük olarak tasarlanması daha geniş bir stereo alan imkânı sağlamaktadır. Fakat bu dönüklüğü kısıtlayan şey ise, kameraların optik eksenlerinin her zaman stereo ölçüm yapılan bölgeden daha uzakta kesişmesi kuralıdır. Geliştirilen sistemde cerrahi işlem ve ölçümlerin yapılacağı bölgenin kamera setine olan maksimum mesafesi dikkate alındığında optik eksenlerin 3 m ve daha uzakta kesişmesi uygun bulunmuştur.

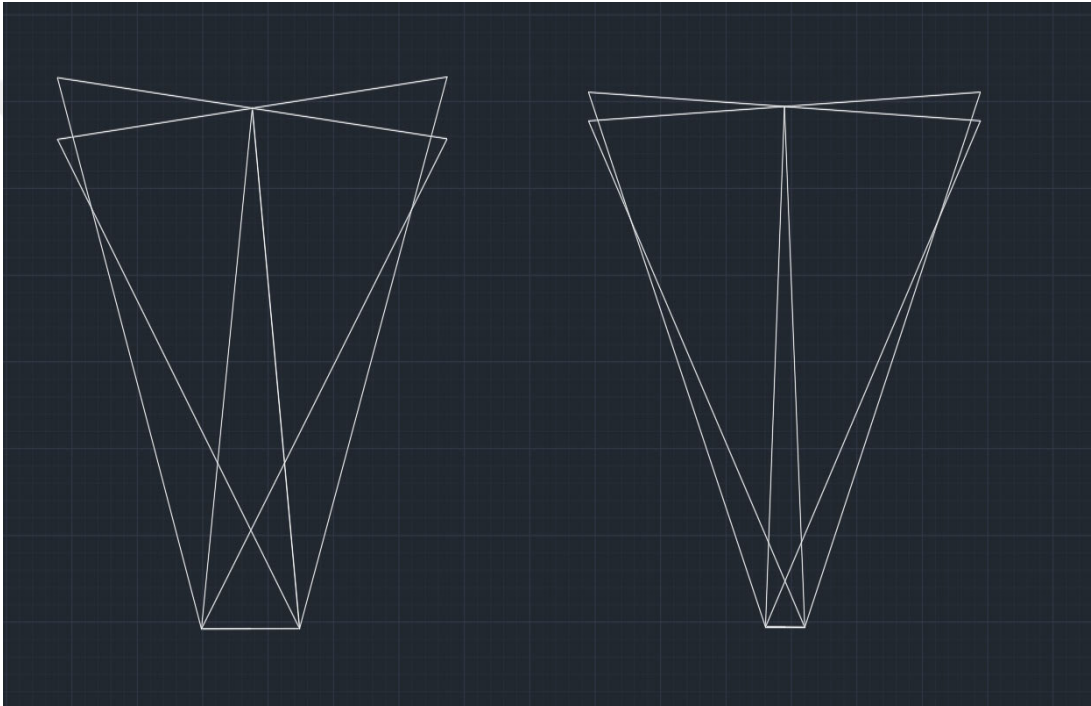


Şekil 4.13. Kamera optik eksenlerinin birbirine paralel olması durumu



Şekil 4.14. Kamera optik eksenlerinin çakışık (içe dönük) olması durumu

Sonuç olarak; derinlik belirleme hatasını azaltmak maksadıyla baz aralığını artırdıkça, stereo ölçüm alanını artırmak için mecburen kameralar daha da içe dönük hale gelmekte ve stereo görüş ve ölçüm bölgesi Z eksenini yani derinlik boyunca kısalmaktadır yani stereo ölçüm alanının baz hattına olan mesafesi artmaktadır. Odak uzaklıkları 4,5 mm ve 3,5 mm olmak üzere iki farklı OptiTrack kamera seçeneği dikkate alındığında aynı baz mesafesinde 4,5 mm odak uzaklıklı kameralar daha az stereo alan oluşturacağından bu kameralar esas alınacak olursa, stereo görüş ve ölçüm bölgesinin derinliği minimum ve maksimum baz aralığı için hesaplanabilmekte ve yorum yapılabilmektedir.



Şekil 4.15. Optik eksenlerin 3 metre mesafede kesişimi ile oluşan stereo alanlar

Şekil 4.15’de solda gösterilen 75 cm baz aralığında kameralar 7 derece içe dönük ve stereo alan başlangıcının baz hattına olan uzaklığı 56,76 cm’dir. Sağda gösterilen 30 cm baz aralığında ise kameralar 3 derece içe dönük ve stereo alan başlangıcının baz hattına olan uzaklığı 26,49 cm’dir. 75 cm baz aralığının kullanılması daha yüksek doğruluklu derinlik yani Z koordinatı sunmaktadır fakat baz hattına 56,76 cm’den daha yakın olan ölçümler yapılamamaktadır. Baz hattından itibaren yapılabilen ölçüm mesafesi 50 cm olarak standardize edilecek olursa bu durumda;  $64,95 \text{ cm} \cong 65 \text{ cm}$  baz aralığında ve kameralar 6 derece içe dönük olarak tasarımın yapılması sistemin ölçüm doğruluğu açısından en uygun çözüm olarak ortaya çıkmaktadır.

#### 4.6. Yazılım Gereksinimleri

Bütün sistem tasarımı içerisindeki en önemli ve zaman alan bileşen yazılım bileşenidir. Sistem tasarımının önceki bölümlerinde anlatılan bütün bileşenleri birlikte ve sorunsuz bir şekilde çalıştırarak somut ölçümler üretebilmek için fotogrametri, uzaktan algılama, dengeleme, dengelemede ileri konular ve istatistik alanlarındaki bilimsel temellere kapsamlı bir şekilde hâkim olarak belirli bir yazılım mimarisi üzerine etkin bir yazılım yazılması ihtiyacı doğmuştur. Bu doktora çalışması; başlangıcından itibaren yoğun bir şekilde herhangi bir açık kaynak kodu kullanmadan algoritma ve yazılımın geliştirilmesi, elde edilen sonuçların belirli periyotlarla değerlendirilerek gereken yerlere yeni modüllerin eklenmesi ve doğrulukların araştırılması aşamaları ile geçmiştir.

Uygulama bölümünde detaylı olarak anlatılan yazılımların ve alt bileşenlerinin (modüllerinin) geliştirilmesi için Visual Studio platformunda tanımlı C++ ve özellikle C# yazılım dilleri kullanılmıştır. C++ ve C# modüllerinde kullanılan kütüphaneler Şekil 4.16’da sunulmuştur (C++ solda, C# sağda).

|   |   |
|---|---|
| <pre>#include &lt;windows.h&gt; #include &lt;stdio.h&gt; #include &lt;tchar.h&gt; #include &lt;conio.h&gt; #include &lt;string.h&gt; #include &lt;string&gt; #include &lt;sstream&gt; #include &lt;iostream&gt; #include &lt;stdlib.h&gt; #include &lt;ostream&gt; #include &lt;cstdlib&gt; #include "cameralibrary.h" #include &lt;fstream&gt; #include &lt;atlbase.h&gt; #include &lt;atlconv.h&gt;</pre> | <pre>using System; using System.Collections; using System.Collections.Generic; using System.ComponentModel; using System.Data; using System.Drawing; using System.Linq; using System.Text; using System.Threading.Tasks; using System.Windows.Forms; using System.IO; using System.IO.Pipes; using System.Threading; using System.Diagnostics; using System.Drawing.Drawing2D; using System.Security.Permissions; using System.Windows.Input; using System.Runtime.InteropServices;</pre> |
|---|---|

Şekil 4.16. Yazılımlarda kullanılan kütüphaneler

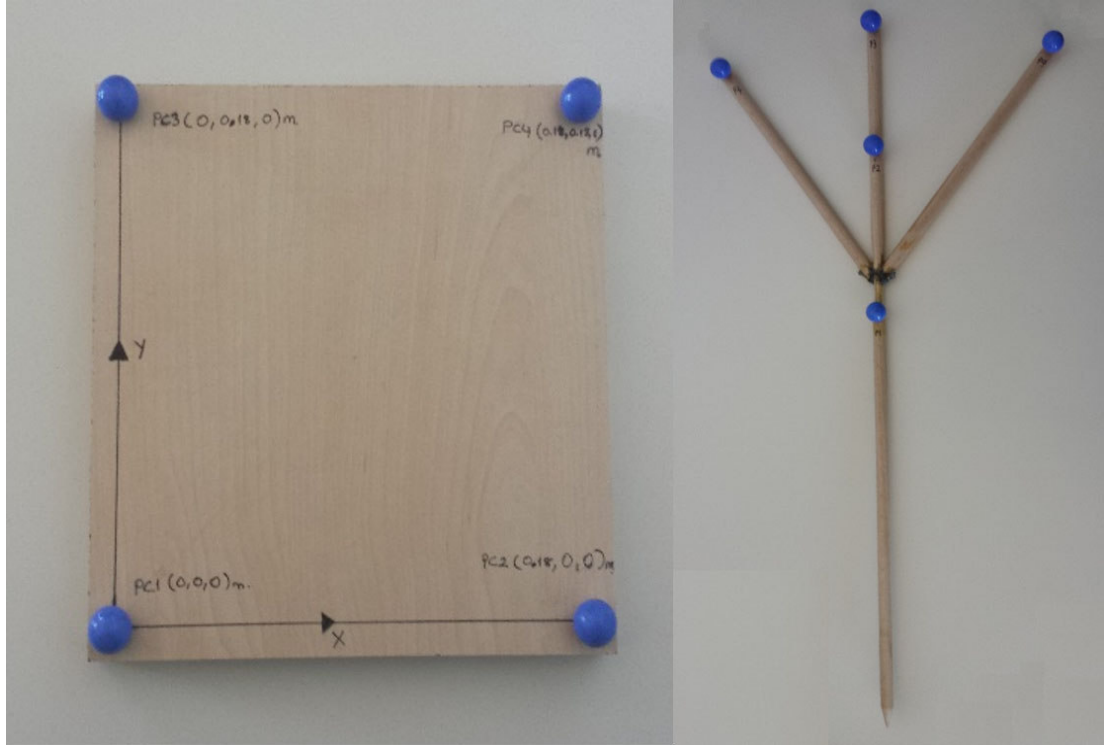
## 5. UYGULAMA

### 5.1. Uygulama Ekipmanları

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere yazılımın geliştirilmesine 2014 yılında başlanmıştır. Akışkan görüntülerden gerçek zamanlı olmasa da yazılımın ilk amatör fotogrametrik dengeleme ve hesaplama testleri ile ana algoritma testlerini yapabilmek ve toplam işlem sürelerini irdeleyebilmek amacıyla Şekil 5.2’de gösterilen ahşap referans yüzey ve ahşap sonda ile Şekil 5.1’de gösterilen Canon PowerShot SX220 HS fotoğraf makinası kullanılmıştır (Canon, 2011).



Şekil 5.1. Canon PowerShot SX220 HS fotoğraf makinası



Şekil 5.2. İlk çalışmalarda kullanılan amatör donanım ve ekipmanlar

Daha sonradan kızılötesi (IR) OptiTrack kameralar ile akışkan görüntüler üzerinden otomatik ölçümlere geçilince, geliştirilen sistemin test ve denemeleri için kullanımları kolay ve pratik olan Şekil 5.3’de görülen ekipmanların bir kısmı temin edilerek, bir kısmı da profesyonel olarak tasarlanarak prototip haline getirilmiş ve bütün ileri düzey denemeler ve testler bu ekipmanlar kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 5.3. İleri düzey çalışmalarda kullanılan donanım ve ekipmanlar

## 5.2. Yazılım Geliştirme

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen yazılımlar ve alt bileşenleri için Visual Studio platformunda tanımlı C++ ve C# yazılım dilleri kullanılmıştır. C# kullanılarak geliştirilen ana modül ve önemli alt bileşenlerinin tamamında yoğun bir şekilde fotogrametrik dengeleme ve optimizasyon algoritmaları çalışmaktadır. Yazılımın yetenekleri arasında bulunmayan büyük boyutlarda matris çarpım işlemleri (özellikle ters (invers) matris alma işlemleri) için bu tezin yazarı tarafından C# tabanlı bir matris işlemleri sınıfı 2014 yılında en baştan yazılarak diğer işlem adımlarına geçilmiş ve bunun yansısı söz konusu sınıf açık kaynak olarak C# tabanlı bilimsel çalışma yapmak isteyen bütün öğrenci ve akademisyenlerin kullanımına sunulmuştur.

Bilimsel bir doktora çalışması olması sebebiyle yazılımların kullanıcı ara yüzleri mümkün olduğunca bilgilendirici ve esnek hesaplamalar yapılabilecek şekilde ilave kullanıcı girişlerine müsait olarak tasarlanmıştır. Bu sayede, anlık obje tespitinden anlık dengelemelere kadar matematiksel hesaplamaları ve dengelemeleri etkileyen birçok parametreye müdahale etme imkânı sağlanmıştır.

Modüller üzerinde gösterimi yapılan veya girdi olarak istenen parametrelerin çok detaylı ve teknik seviyede olmasının diğer bir sebebi ise; sistemin sadece cerrahi navigasyon ve ölçüm sistemi olarak kullanımı değil aynı zamanda akademik anlamda ne yapıldığının gösterimi ve fotogrametri alanında çalışma yapmak, yazılım geliştirmek isteyen akademisyenlere ve öğrencilere somut referans teşkil etmesidir. Bu kapsamda hayata geçirilen yazılımlar ve alt modülleri Şekil 5.4'de görülmektedir.



Şekil 5.4. Geliştirilen yazılımlar ve alt modülleri

### 5.2.1. Video Görüntülerden Otomatik Obje Tespit Yazılımı

Sistem tasarımı bölümünde yer alan iş akışında detaylı olarak sunulduğu üzere; sistemin çalışması esnasında ilk olarak devreye giren, kameraların görüş alanında ve uygun yansıma değerindeki objelerin merkezlerine ait ham görüntü koordinatlarını otomatik olarak tespit ederek müteakip işlemler için ana modüle ileten yazılımdır. C++ dilinde geliştirilen yazılım için öncelikle OptiTrack kameralara ait SDK kütüphaneleri detaylı olarak incelenerek bu kütüphaneler yardımıyla zamansal olarak senkronize edilen stereo görüntüler üzerinden görüntü işleme ve obje tespit algoritmaları yardımıyla ilgili objelere ait görüntü koordinatları elde edilmektedir. Bu sayede sistem; OptiTrack firmasının yazılımına ve donanım kilidine gerek kalmadan her bilgisayarda kullanılabilir hale getirilmiştir.

Bu yazılım ile herhangi bir fotogrametrik işlem yapılmamakla birlikte sadece tespit edilen gümüş toplara ait ham görüntü koordinatları (piksel koordinatları) çıktı olarak sunulmaktadır. Asıl olarak amaçlanan navigasyon işlemleri için gerekli olan bütün fotogrametrik ölçüm, hesap ve dengelemeler ilerleyen bölümlerde detaylı olarak anlatılan **Cerrahi Navigasyon Yazılımı** ile **Kamera Kalibrasyon Yazılımı** ve ilgili alt modülleri tarafından yapılmaktadır.

Bu kapsamda ilk olarak, SDK kütüphanesi yardımıyla OptiTrack kameralardan görüntü alımı için Şekil 5.5’de sunulan bağlantı kod örneği yardımıyla, ileriki adımlarda detaylı olarak açıklanan obje tespitinin ilk adımı başarılı bir şekilde oluşturulmuştur.

```
#include "supportcode.h"
#include "cameralibrary.h"
...
Camera *camera = CameraManager::X().GetCamera();
    int cameraWidth = camera->Width();
    int cameraHeight = camera->Height();
...
Frame *frame = camera->GetFrame();
...
```

Şekil 5.5. OptiTrack kamera bağlantısı kod örneği

Bu uygulamada öncelikli olarak kameranın “Precision” ve “Segment” olarak isimlendirilen farklı iki görüntüleme modunda kamera bağlantısı ve veri akışı sağlanmıştır. Böylelikle görüntü üzerindeki işaretçiler otomatik olarak belirlenebilmiştir. Ayrıca yazılım, OptiHub cihazı ile birden fazla kameranın eşzamanlı çalışmasına olanak sağlayacak şekilde geliştirilmiştir. Çalışmada kullanılan kod örneği Şekil 5.6’da sunulmuştur.

```
#include <windows.h>
#include <stdio.h>
#include <tchar.h>
#include "cameralibrary.h"
...
CameraManager::X().WaitForInitialization();
...
class CLAPI HubList
{
public:
    HubList();
    ~HubList() {};

    CameraEntry& operator[](int index);
    int Count() { return mCameraCount; }
    void Refresh();

protected:
    friend class CameraManager;
    void SetCount(int Value) { mCameraCount = Value; }

private:
    int mCameraCount;
    CameraEntry mCameraEntry[kMaxCameras];
};
...
```

Şekil 5.6. Optitrack OptiHub kamera bağlantısı kod örneği

Cerrahi navigasyon ölçümleri esnasında çoğunlukla “Precision” modunda alınan görüntüler kullanılmıştır. Yazılıma eklenen özellik sayesinde kameralar saniyede 120 çerçeveye kadar aldığı her görüntüyü zamansal olarak birbirleri ile aynı anda almakta ve zaman etiketi ile birlikte işleme sokmaktadır. Bu sayede; sağ ve sol görüntülerden oluşan stereo görüntü çiftinin birbirleri arasında oluşabilecek zaman kayıklığının (ofsetinin) önüne geçilerek ölçümler esnasında hareketli olan sondanın konumlama hataları önlenmektedir.

OptiHub cihazı ile birden fazla kamera aynı anda sisteme bağlanabilmekte ve eşzamanlı olarak görüntü aktarabilmektedir. Ayrıca, SDK kütüphaneleri kullanılarak geliştirilen yazılım sayesinde OptiHub donanım kilidi olmadan her bilgisayarda işlem yapılabilmektedir. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında öncelikle kameralardan gelen her görüntü çifti eş-zamanlı (senkronize) hale getirilmekte, sonrasında hatasız olarak eşlenen (senkronlanan) her görüntü çifti içerisinde yakalanan gümüş top merkezlerinin piksel koordinatları yazdırılmaktadır. Kullanılan kameralardan saniyede 1-120 arasında eş-zamanlı görüntü çifti alınabilmektedir. Gerçekleştirilen uygulama kapsamında tespit için en uygun eşik değerleri farklı kameralar için belirlenerek her 2 görüntü çerçevesinden birisi alınmak suretiyle eş-zamanlama yapılmıştır. Uygulamada kullanılan kod örneği Şekil 5.7’de sunulmuştur.

```
for(int i=0; i<cameraCount; i++)
{
    camera[i]->Start();
    camera[i]->SetVideoType(PrecisionMode);
    camera[i]->SetEnableBlockingMask(TRUE);
    unsigned char * buffer = (unsigned char*)malloc(640 * 480);

    // v120 Duo için.
    camera[i]->SetBlockingMask(buffer, 1);
    camera[i]->SetExposure(10);
    camera[i]->SetThreshold(210);
    camera[i]->SetIntensity(15);
    camera[i]->SetFrameRate(120); //sonradan eklendi

    /// V120 slim 3U için.
    //camera[i]->SetBlockingMask(buffer, 1);
    //camera[i]->SetExposure(25);
    //camera[i]->SetThreshold(230);
    //camera[i]->SetIntensity(50);
    /// camera[i]->SetFrameRate(120); //sonradan eklendi
}
fclose(dosya);

//Frame gruplari olusturulup senkronlaniyor...
while(!_kbhit())
{
    FrameGroup *frameGroup = sync->GetFrameGroup();

    if(frameGroup)
    {
        static int FrameBlogu = 0;
        static int frameCount = 0;
        FrameBlogu = (FrameBlogu+1)%2; //2 her 2 frame grubu senkronlaniyor

        frameCount++;
    }
}
```

Şekil 5.7. Piksel koordinatlarını eş-zamanlı olarak alan kod örneği

Eş zamanlı olarak elde edilen görüntü koordinatları, sol ve sağ görüntü için ayrı ayrı gruplanarak baştan sona diğer bütün fotogrametrik işlemlerin yapılacağı asıl yazılım olan cerrahi navigasyon yazılımına (C++ tarafından C# tarafına) gönderilmektedir. Bu gönderim işlemi öncesinde C# tarafının kullandığı ve anlayacağı veri kalıbı formatına dönüşüm yapılmaktadır. Uygulamada kullanılan kod örneği Şekil 5.8’de sunulmuştur.

```

for(int i=0; i<frameGroup->Count(); i++)
{
    Frame * frame = frameGroup->GetFrame(i);
    printf("\n KameraNO #%d ... %d Adet Obje Yakanldi\n", i, frame->ObjectCount());
    //fprintf(dosya, "\n KameraNO #%d ... %d Adet Obje Yakanldi\n", i, frame-> ObjectCount());
    for (int j = 0; j < frame->ObjectCount(); j++)
    {
        cObject *obj = frame->Object(j);
        float x = obj->X();
        float y = obj->Y();

        ostringstream xstrs;
        ostringstream ystrs;
        xstrs << x;
        ystrs << y;

        stringstream istrs;
        stringstream jstrs;
        istrs << i + 1;
        jstrs << j;

        string xstr = xstrs.str();
        string ystr = ystrs.str();
        string istr = istrs.str();
        string jstr = jstrs.str();

        printf("\n ObjeNo: %i x: %.3f , y: %.3f\n", j, x, y);
        //fprintf(dosya, "\n ObjeNo: %i x: %.3f , y: %.3f\n", j, x, y);
        fprintf(dosya, "%.4f %.4f ", x, y);
        if (i == 0)
        {
            resimkoordinatcam1 += xstr + " " + ystr + " ";
        }
        if (i == 1)
        {
            resimkoordinatcam2 += xstr + " " + ystr + " ";
        }
    }
    fprintf(dosya, "\n");
    frame->Release();
}
printf("\n");
fclose(dosya);

```

Şekil 5.8. Her anlık görüntü çifti için C# tarafına aktarılan veriler

Verilerin Otomatik Obje Tespit Yazılımı'nın çalıştığı C++ ortamından Cerrahi Navigasyon Yazılımı'nın çalıştığı C# ortamına gönderimi ise aralarında Visual Studio tabanlı olarak tesis edilen senkronize veri aktarım bağlantısı (Pipe Connection) ile mümkün hale getirilmiştir. Bu sayede; çalışılan frekansa göre anlık olarak kullanıma hazır hale getirilen eş-zamanlı görüntü koordinatları C# tarafına sunulmakta, C# tarafında baştan sona bütün fotogrametrik ve matematiksel işlemler yapılarak sonda ucu koordinatının gerçek zamanlı olarak üretilmesinin ardından yeni konum için görüntü koordinatı isteği gönderilmekte ve bu isteğin ardından sıradaki eş zamanlı görüntü koordinatı seti hazırlanarak sunulmaktadır. Bu karşılıklı işlem silsilesi Cerrahi Navigasyon Yazılımı tarafından istek gönderildiği sürece, yani ölçüm yapıldığı sürece ardışık olarak tekrar edilmektedir. Tesis edilen senkronize bağlantıya ait C++ ve C# taraftaki kodlamalar Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da sunulmuştur.

```
//Sol ve Sağ kamera görüntülerinin birleştirilmesi
resimkoordinat = resimkoordinatcam1 + "/" + resimkoordinatcam2;

//Pipe bağlantı kuruluyor ve koordinatlar C# tarafına gönderiliyor...
HANDLE hPipe = ::CreateNamedPipe(_T("\\\\.\\pipe\\HyperPipe"),
    PIPE_ACCESS_DUPLEX,
    PIPE_TYPE_MESSAGE | PIPE_READMODE_MESSAGE,
    PIPE_UNLIMITED_INSTANCES,
    4096,
    4096,
    0,
    NULL);

ConnectNamedPipe(hPipe, NULL);

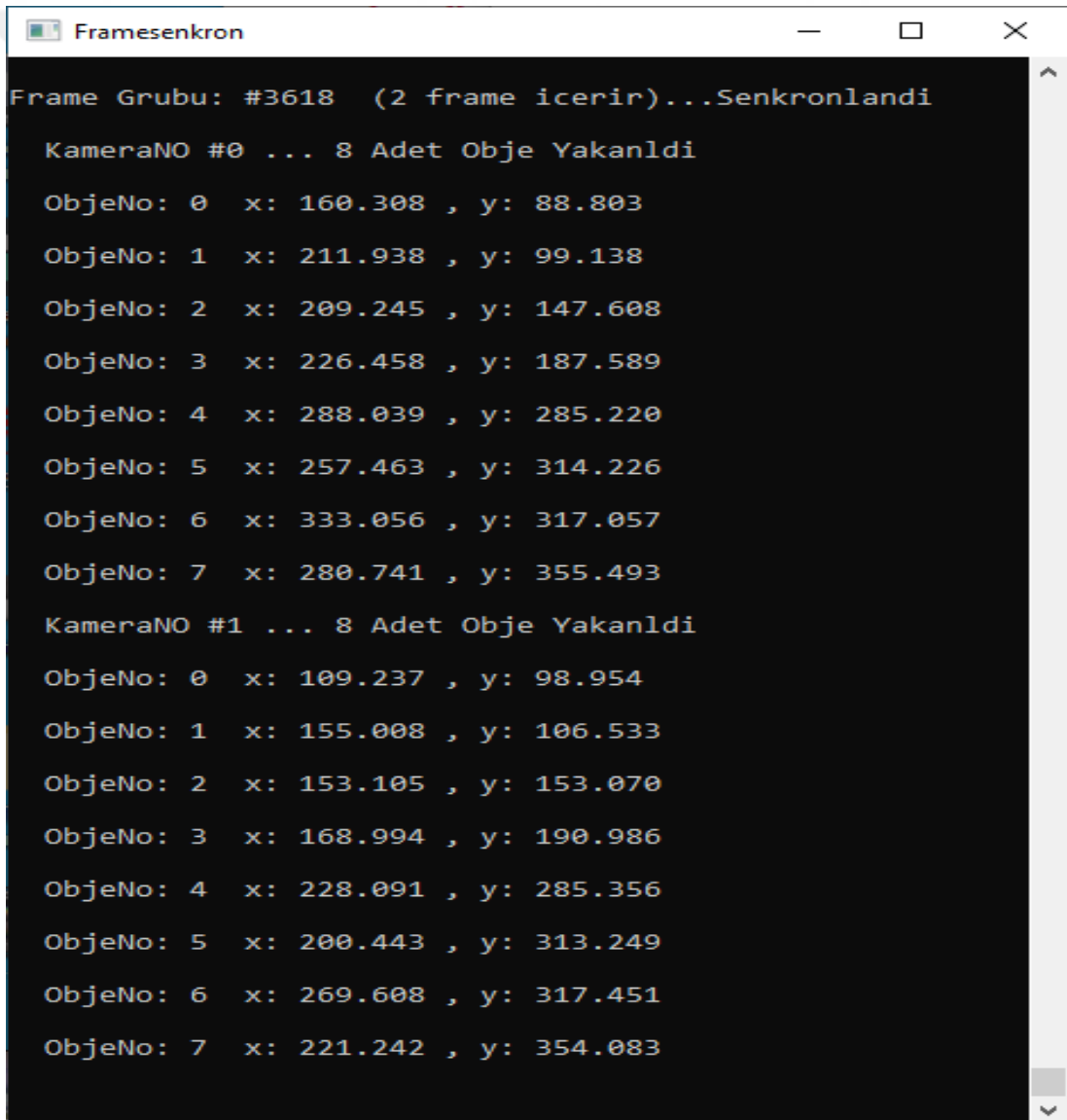
std::wstring rkWSTR(resimkoordinat.begin(), resimkoordinat.end());
LPCWSTR reskoords = rkWSTR.c_str();
DWORD bytesWritten = 0;
WriteFile(hPipe, reskoords, _tcslen(reskoords) * sizeof(TCHAR), &bytesWritten, NULL);
CloseHandle(hPipe);
```

Şekil 5.9. C++ taraftaki senkronize bağlantı kodu

```
NamedPipeClientStream pipe = new NamedPipeClientStream(".", "HyperPipe", PipeDirection.InOut);
pipe.Connect();
using (StreamReader rdr = new StreamReader(pipe, Encoding.Unicode)) //veya
//using (StreamReader rdr = new StreamReader(pipe, System.Text.Encoding.Unicode))
{
    gelenkoordinat = rdr.ReadToEnd();
}
```

Şekil 5.10. C# taraftaki senkronize bağlantı kodu

Bütün bu senkronize veri akışının yanı sıra, otomatik tespit algoritmaları ile elde edilen gümüş topların gerçek zamanlı görüntü koordinatları, sistemin çalışması esnasında görsel teyit ve kontrol amaçlı olarak ayrıca ekrana da yazdırılmaktadır. Test ölçümlerinde kullanılan, 4 adet gümüş toptan oluşan referans levhasına ve üzerinde 4 adet gümüş top bulunan hareketli sondaya ait gümüş top merkezlerinin eş-zamanlı görüntü çiftlerinden tespit edilmiş gerçek zamanlı görüntü koordinatları (piksel koordinatları) ekran görüntüsü olarak Şekil 5.11’de sunulmuştur. Buradaki sıralama her görüntü içerisinde yukarıdan aşağıya y piksel koordinatına göredir ve hangi gümüş topun nereye ait olduğu bilinmemektedir. Söz konusu tanımlama Cerrahi Navigasyon Yazılımı içerisinde yapılmaktadır.



```
Framesenkron
Frame Grubu: #3618 (2 frame icerir)...Senkronlandi
KameraNO #0 ... 8 Adet Obje Yakanldi
ObjeNo: 0 x: 160.308 , y: 88.803
ObjeNo: 1 x: 211.938 , y: 99.138
ObjeNo: 2 x: 209.245 , y: 147.608
ObjeNo: 3 x: 226.458 , y: 187.589
ObjeNo: 4 x: 288.039 , y: 285.220
ObjeNo: 5 x: 257.463 , y: 314.226
ObjeNo: 6 x: 333.056 , y: 317.057
ObjeNo: 7 x: 280.741 , y: 355.493
KameraNO #1 ... 8 Adet Obje Yakanldi
ObjeNo: 0 x: 109.237 , y: 98.954
ObjeNo: 1 x: 155.008 , y: 106.533
ObjeNo: 2 x: 153.105 , y: 153.070
ObjeNo: 3 x: 168.994 , y: 190.986
ObjeNo: 4 x: 228.091 , y: 285.356
ObjeNo: 5 x: 200.443 , y: 313.249
ObjeNo: 6 x: 269.608 , y: 317.451
ObjeNo: 7 x: 221.242 , y: 354.083
```

Şekil 5.11. Gerçek zamanlı ve dinamik olarak elde edilen görüntü koordinatları

## 5.2.2. Cerrahi Navigasyon Sistemi Yazılımı

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen ana yazılım Cerrahi Navigasyon Sistemi Yazılımı'dır. Açık kaynak kodu kullanılmadan C# ortamında geliştirilen yazılım, bütün alt modülleriyle birlikte toplamda yaklaşık 17.000 satırdan oluşmaktadır. Yazılımın kod içeriğinin büyük hacimde olması sebebiyle bu doktora tezi içerisinde sadece önemli olan kısımlara ve hesaplamalara ait algoritma ve kodlama örnekleri sunulmuştur.

Ana modülüne ait interaktif kullanıcı arayüzü Şekil 5.12'de sunulan Cerrahi Navigasyon Sistemi Yazılımı aşağıda sıralanan ana ve alt modüllerden oluşmaktadır;

- Ana Modül
- Görüntü Akış ve Tespit Kontrol Modülü
- Kamera Detay Görüntüleme Modülü
- Sonda Ucu Eksenleme (Pivot) Modülü
- Navigasyon Modülü
- Ayarlar Modülü

Şekil 5.12. Cerrahi Navigasyon Yazılımı Ana Modülü

### 5.2.2.1. Ana Modül

Kamera tanımlamasından başlayarak sonda ucunun obje uzay koordinat sistemindeki anlık koordinatlarının fotogrametrik esaslara dayalı olarak belirli bir sistematik içerisinde ardışık ölçümler halinde üretildiği ve ölçüm kontrollerinin de görsel olarak sunulduğu ana modül, Şekil 5.13'te gösterilen sistematige dayalı olarak çalışmaktadır.



Şekil 5.13. Ana modül sistematigi

Ana modül üzerindeki ölçüm ve diğer fonksiyonların aktif hale gelebilmesi için öncelikle kamera, referans yüzey ve sonda tanımlamalarının yapılması gerekmektedir. Bu tanımlamalar için ilgili donanımlara ait parametreleri içeren ve yazılımın ilgili klasörlerine önceden kopyalanan dosyalar arayüz üzerindeki açılır listelerden seçilerek kullanılmaktadır. Şekil 5.14'te bütün kalibrasyon parametrelerini içeren örnek bir kamera tanımlama dosyası (a), referans yüzey üzerindeki gümüş topların obje uzay koordinatlarını içeren referans yüzey tanımlama dosyası (b) ve sonda üzerindeki gümüş topların lokal koordinatlarını içeren sonda tanımlama dosyası (c) gösterilmektedir.

```
OptiTrack_640x480_V120Duo_Sol_ST_KL_c+PP+Dist_R+T+D-1_2x50 .txt X
0 10 20 30 40 50 60
1 V120_Duo_Sol_KL
2 0,0035688085
3 -0,0000824757
4 -0,0000062288
5 640
6 480
7 0,000006
8 0,00384
9 0,00288
10 9775,3941
11 -738323752,3913
12 23136707582172,7
13 -0,6906
14 0,4075
15 0,0012
16 0,0005
```

(a)

```
Referans_NDI_#8700449.txt X
0 10 20 30 40 50 60
1 0,00000 0,00000 0,00000
2 0,02899 -0,04738 0,00000
3 0,08910 0,00000 0,00000
4 0,03536 0,03536 0,00000
```

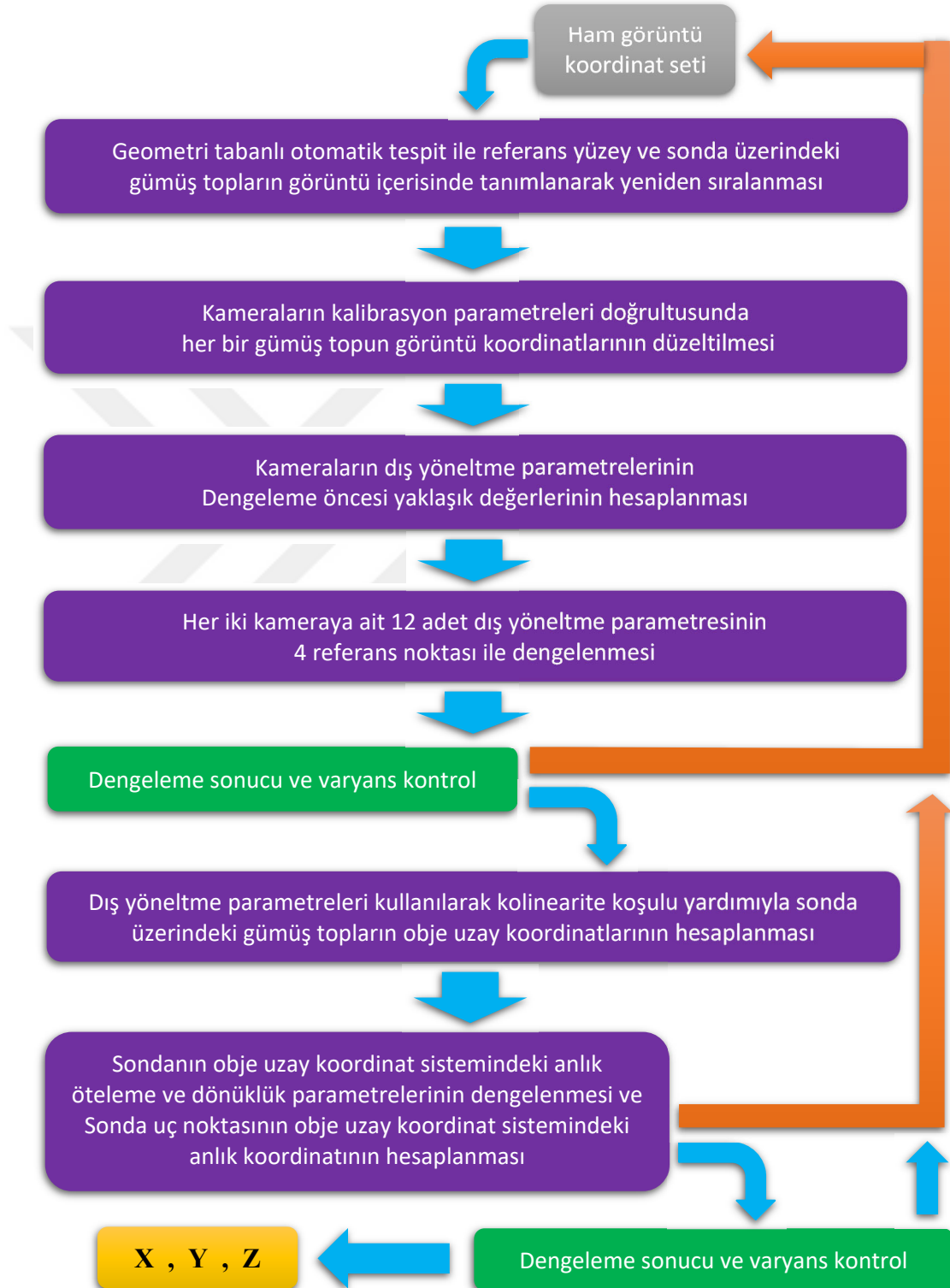
(b)

```
Probe_4T_NDI_#8700340_D.txt X
0 10 20 30 40 50 60
1 0,00000 0,00000 0,00000
2 0,05000 0,00000 0,00000
3 0,13500 0,02500 0,00000
4 0,10000 -0,02500 0,00000
5 -0,15700 0,00000 -0,01800
6 D
```

(c)

Şekil 5.14. Örnek donanım tanımlama dosyaları

Sistemde gerekli tanımlamalar yapıldıktan ve görüntü koordinat akışı kontrol edildikten sonra Şekil 5.15’de detaylı olarak gösterilen gerçek zamanlı ölçüm döngüsü çalıştırılabilmekte ve sistemin çalışma frekansına bağlı olarak her bir anlık konum tespiti için bu döngü tekrarlanmaktadır.

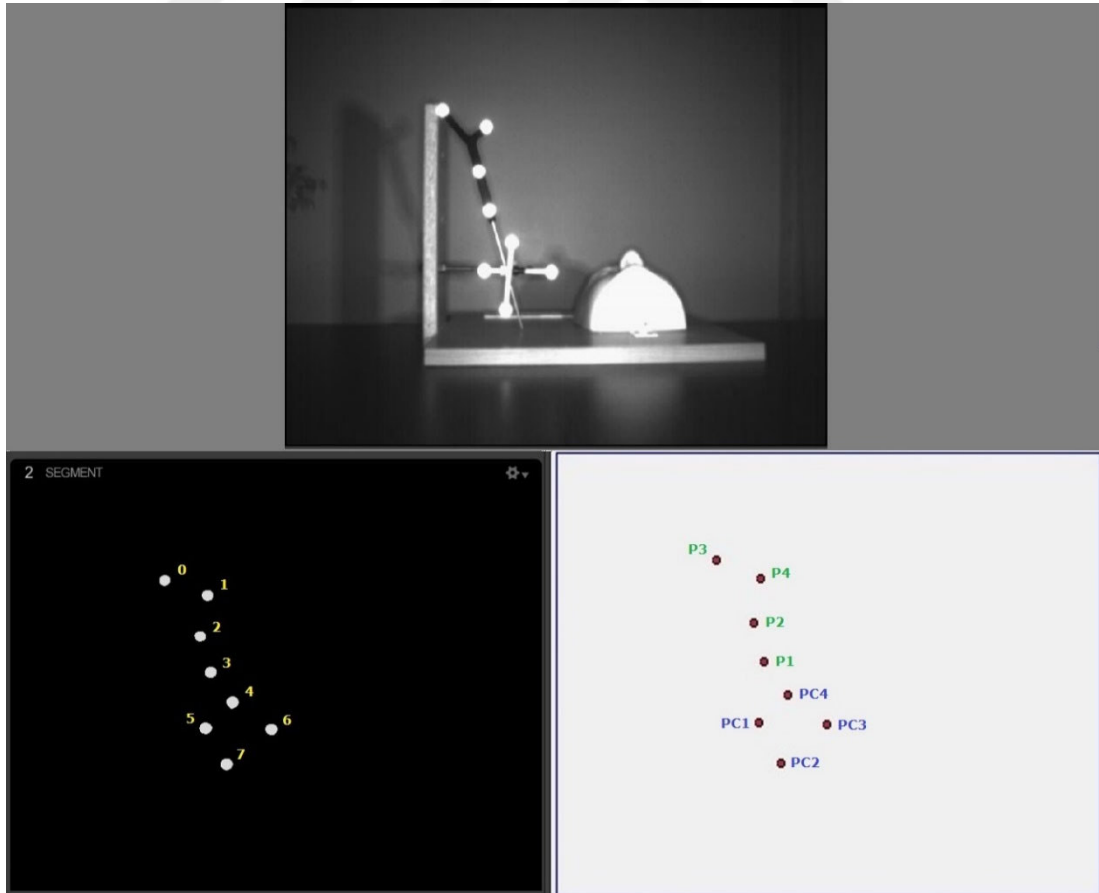


Şekil 5.15. Ana modül gerçek zamanlı ölçüm döngüsü

Şekil 5.15'teki gerçek zamanlı ölçüm döngüsünün çalışması esnasında;

- Anlık sonda hareketi (sonda ucunun anlık obje uzay koordinatları) navigasyon modülü ara yüzünde görüntülenebilmekte,
- Yüzey toplama seçeneği aktif hale getirilerek istenen yüzeyler, hatlar ve noktalar toplanarak ve dosyaya yazdırılabilmektedir.

Gerçek zamanlı ölçüm döngüsü içerisinde ilk çalışan algoritma ham olarak gelen görüntü koordinatlarını işleyerek referans yüzey ve sonda için geometri tanımlanması yapmakta ve hangi gümüş topun nereye ait olduğunu bulmaktadır. Zira bu işlem diğer adımlar için çok önemlidir. Yanlış bir tanımlama olması durumunda döngü içerisinde ileriki dengeleme ve hesaplamalar tutmayacağından, yeni bir görüntü koordinat seti için döngü başa alınmaktadır. Bu sebeple, ölçümler esnasında referans yüzey ve sonda düzlemleri mümkün olduğunca kameraların alım eksenine dik olmalıdır. Şekil 5.16'da otomatik tanımlama yapılmadan önceki (sol-alt) ve tanımlamadan sonraki numaralandırma (sağ-alt) gösterilmektedir.



Şekil 5.16. Geometri tabanlı otomatik obje tespit ve nokta tanımlama

Söz konusu otomatik nokta tanımlama işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirildikten sonra kameraların izdüşüm düzlemi parametreleri doğrultusunda ham stereo görüntü koordinatları piksel biriminden metrik birime çevrilerek (sağ ve sol görüntü için ayrı ayrı olmak üzere) Ana Modül üzerindeki ilgili alanlara Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de gösterildiği gibi dinamik olarak yazdırılmaktadır.

Referans\_NDI\_#8700449.txt

| REF. YÜZEY KONT. NOKTALARI<br>GÖRÜNTÜ KOORDİNATLARI (mm.) |        |         | REF. YÜZEY KONT. NOKTALARI<br>BİLİLEN UZAY KOORD. (m.) |          |   | REF. YÜZEY KONT. NOKTALARI<br>GÖRÜNTÜ KOORDİNATLARI (mm.) |         |         |
|---|--------|---------|--|----------|---|---|---------|---------|
|   | x      | y       | X  | Y        | Z | x   | y       |         |
| PC1   | 0,0203 | -0,3745 | 0  | 0        | 0 | PC1   | -0,4308 | -0,3935 |
| PC2   | 0,1773 | -0,6481 | 0,02899  | -0,04738 | 0 | PC2   | -0,2863 | -0,6686 |
| PC3   | 0,5258 | -0,3881 | 0,0891   | 0        | 0 | PC3   | 0,0495  | -0,4166 |
| PC4   | 0,2252 | -0,1814 | 0,03536  | 0,03536  | 0 | PC4   | -0,2381 | -0,2032 |

Şekil 5.17. Görüntü koordinatlarının ana modül üzerinde gösterimi (Referans)

SONDA ÜZERİNDEKİ GÜMÜŞ TOPLARIN GÖRÜNTÜ KOORDİNATLARI (mm.)

| KAMERA-1 |         | Probe_4T_NDI_#8700340_D.txt | KAMERA-2 |         |        |
|----------|---------|-----------------------------|----------|---------|--------|
|          | x       | y                           | x        | y       |        |
| P1       | 0,0621  | 0,0540                      | P1       | -0,3761 | 0,0309 |
| P2       | -0,0202 | 0,3199                      | P2       | -0,4499 | 0,2923 |
| P3       | -0,2906 | 0,7228                      | P3       | -0,6969 | 0,6786 |
| P4       | 0,0298  | 0,6198                      | P4       | -0,3963 | 0,5902 |
| P5       | --      | --                          | P5       | --      | --     |

SONDA GÜMÜŞ TOPLARININ  
UZAY KOORD. HESAPLA

Şekil 5.18. Görüntü koordinatlarının ana modül üzerinde gösterimi (Sonda)

Gümüş topların tanımlama ve yeniden sıralama işleminin ardından, diğer hesaplamalara ve dengelemelere geçilmeden önce, kamera kalibrasyonu ile yüksek doğrulukla önceden belirlenmiş olan kamera iç yöneltme parametreleri kullanılarak söz konusu gümüş toplara ait görüntü koordinatlarına düzeltme getirilmektedir. Distorsiyon tanımlama modelimizin aşağıda verilen (5.1-5.7) eşitlikleri doğrultusunda ham stereo görüntü koordinatlarına;

- Asal nokta kayıklığı  $(x_0, y_0)$ ,
- Çapsal distorsiyon  $(k_1, k_2, k_3)$ ,
- Teğetsel distorsiyon  $(p_1, p_2)$ ,
- Diferansiyel ölçek distorsiyonu  $(b_1, b_2)$  düzeltmeleri getirilmektedir.

Bu kapsamda kullanılan distorsiyon modeli;

$\tilde{x} = x - x_0$  ,  $\tilde{y} = y - y_0$  ve  $r = \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2}$  olmak üzere;

$$\delta x_1 = \tilde{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (5.1)$$

$$\delta y_1 = \tilde{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (5.2)$$

$$\delta x_2 = p_1(r^2 + 2\tilde{x}^2) + 2p_2\tilde{x}\tilde{y} \quad (5.3)$$

$$\delta y_2 = p_2(r^2 + 2\tilde{y}^2) + 2p_1\tilde{x}\tilde{y} \quad (5.4)$$

$$\delta x_3 = b_1\tilde{x} + b_2\tilde{y} \quad (5.5)$$

Şeklinde ifade edilmektedir. Asal nokta kayıklığı ve distorsiyon etkisi düzeltilmiş yeni görüntü koordinatları ise aşağıdaki (5.6) ve (5.7) numaralı eşitliklerdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$\ddot{x} = \tilde{x} + \delta x_1 + \delta x_2 + \delta x_3 \quad (5.6)$$

$$\ddot{y} = \tilde{y} + \delta y_1 + \delta y_2 \quad (5.7)$$

Böylelikle; doğru konum bilgisi üretebilmek için uzayın merkezi izdüşümü olması gerektiği forma kavuşturulmaktadır. Söz konusu düzeltmelere ilişkin kullanılan kodlama Şekil 5.19'da sunulmuştur.

```

for (int i = 0; i < refnoktasayisi; i++)
{
    x_x0 = RNGK[i, 0] - H1x0;
    y_y0 = RNGK[i, 1] - H1y0;
    r = Math.Sqrt(Math.Pow(x_x0, 2) + Math.Pow(y_y0, 2));

    dx1 = x_x0 * ((kam1_k1 * Math.Pow(r, 2)) + (kam1_k2 * Math.Pow(r, 4)) + (kam1_k3 * Math.Pow(r, 6)));
    dx2 = kam1_p1 * (Math.Pow(r, 2) + 2 * Math.Pow(x_x0, 2)) + 2 * kam1_p2 * x_x0 * y_y0;
    dx3 = kam1_b1 * x_x0 + kam1_b2 * y_y0;

    dy1 = y_y0 * ((kam1_k1 * Math.Pow(r, 2)) + (kam1_k2 * Math.Pow(r, 4)) + (kam1_k3 * Math.Pow(r, 6)));
    dy2 = kam1_p2 * (Math.Pow(r, 2) + 2 * Math.Pow(y_y0, 2)) + 2 * kam1_p1 * x_x0 * y_y0;

    l0[(i * 2) + 0, 0] = x_x0 + dx1 + dx2 + dx3;
    l0[(i * 2) + 1, 0] = y_y0 + dy1 + dy2;

    //-----
    x_x0 = RNGK[i, 2] - H2x0;
    y_y0 = RNGK[i, 3] - H2y0;
    r = Math.Sqrt(Math.Pow(x_x0, 2) + Math.Pow(y_y0, 2));

    dx1 = x_x0 * ((kam2_k1 * Math.Pow(r, 2)) + (kam2_k2 * Math.Pow(r, 4)) + (kam2_k3 * Math.Pow(r, 6)));
    dx2 = kam2_p1 * (Math.Pow(r, 2) + 2 * Math.Pow(x_x0, 2)) + 2 * kam2_p2 * x_x0 * y_y0;
    dx3 = kam2_b1 * x_x0 + kam2_b2 * y_y0;

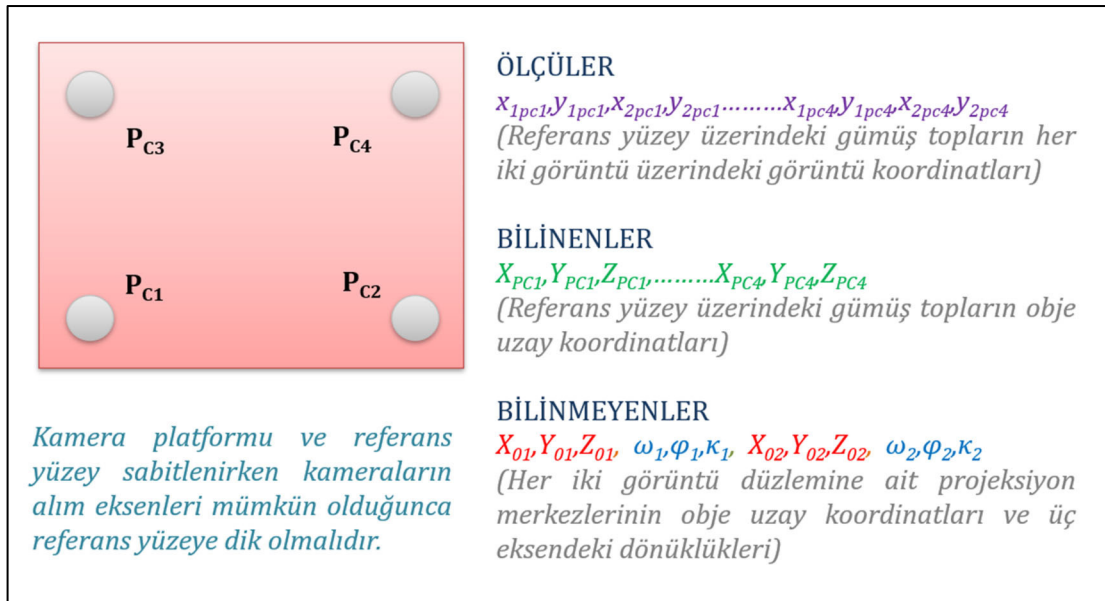
    dy1 = y_y0 * ((kam2_k1 * Math.Pow(r, 2)) + (kam2_k2 * Math.Pow(r, 4)) + (kam2_k3 * Math.Pow(r, 6)));
    dy2 = kam2_p2 * (Math.Pow(r, 2) + 2 * Math.Pow(y_y0, 2)) + 2 * kam2_p1 * x_x0 * y_y0;

    l0[((refnoktasayisi + i) * 2) + 0, 0] = x_x0 + dx1 + dx2 + dx3;
    l0[((refnoktasayisi + i) * 2) + 1, 0] = y_y0 + dy1 + dy2;
}

```

Şekil 5.19. Görüntü koordinatlarına getirilen düzeltmelere ilişkin kodlama

Görüntü koordinatlarının düzeltilmesinin ardından her iki kameraya ait anlık dış yöneltme parametreleri (DYP) En Küçük Kareler (EKK) dengelemesi yöntemiyle belirlenmektedir. Bu dengelemede kullanılan parametreler şekil 5.20’de verilmiştir.



Şekil 5.20. Gerçek zamanlı DYP için EKK dengelemesi parametreleri

Dengelemede kullanılan ölçüler, referans yüzey üzerinde bulunan ve konumları hassas olarak bilinen 4 adet referans noktasına ait  $x$  ve  $y$  görüntü koordinatlarıdır. Her bir referans noktası Yer Kontrol Noktası (YKN) mantığıyla kullanılmaktadır.

Dengelemenin ilk adımı ise bilinmeyenlerin yaklaşık değerlerinin hesaplanmasıdır. Bunun için; sağ ve sol görüntüler Şekil 5.21’de gösterildiği gibi sırasıyla tek başına ele alınarak, Şekil 5.22’deki kodlama ile hesaplanmaktadır.

| $P_{C1}$ Noktası ile ifadesi  | $P_{C2}$ Noktası ile ifadesi                         |
|---|--|
| $X_0 = X_{PC1} - (Z_{PC1} - Z_0) \frac{x_{pc1}}{-c}$  | $X_0 = X_{PC2} - (Z_{PC2} - Z_0) \frac{x_{pc2}}{-c}$ |
| $X_{PC1} - (Z_{PC1} - Z_0) \frac{x_{pc1}}{-c} = X_{PC2} - (Z_{PC2} - Z_0) \frac{x_{pc2}}{-c}$ |  |
| $Z_0 = (c(X_{PC2} - X_{PC1}) + x_{pc2}Z_{PC2} - x_{pc1}Z_{PC1}) / (x_{pc2} - x_{pc1})$        |  |
| $X_0 = X_{PC1} - x_{pc1}(Z_0 - Z_{PC1})/c$  | $Y_0 = Y_{PC1} - y_{pc1}(Z_0 - Z_{PC1})/c$           |

Şekil 5.21. Yaklaşık değerlerin hesaplanması

```
// YAKLAŞIK DEĞERLERİN HESAPLANMASI-Sol_Kamera
of12 = Math.Sqrt(Math.Pow((XPC2 - XPC1), 2) + Math.Pow((YPC2 - YPC1), 2)) /
Math.Sqrt(Math.Pow((x1PC2 - x1PC1), 2) + Math.Pow((y1PC2 - y1PC1), 2));
of23 = Math.Sqrt(Math.Pow((XPC3 - XPC2), 2) + Math.Pow((YPC3 - YPC2), 2)) /
Math.Sqrt(Math.Pow((x1PC3 - x1PC2), 2) + Math.Pow((y1PC3 - y1PC2), 2));
of34 = Math.Sqrt(Math.Pow((XPC4 - XPC3), 2) + Math.Pow((YPC4 - YPC3), 2)) /
Math.Sqrt(Math.Pow((x1PC4 - x1PC3), 2) + Math.Pow((y1PC4 - y1PC3), 2));
of41 = Math.Sqrt(Math.Pow((XPC1 - XPC4), 2) + Math.Pow((YPC1 - YPC4), 2)) /
Math.Sqrt(Math.Pow((x1PC1 - x1PC4), 2) + Math.Pow((y1PC1 - y1PC4), 2));
Z01 = ZPC1 + (c1 * ((of12 + of23 + of34 + of41) / 4));

omega1 = 0;
phi1 = 0;
alfa1 = Math.Atan((YPC1 - YPC3) / (XPC3 - XPC1));
alfa2 = Math.Atan((y1PC1 - y1PC3) / (x1PC3 - x1PC1));
kappa1 = alfa2 - alfa1;

R1_Matris_Hesapla();

x_x0 = x1PC1 - H1x0;
y_y0 = y1PC1 - H1y0;
r = Math.Sqrt(Math.Pow(x_x0, 2) + Math.Pow(y_y0, 2));

dx1 = x_x0 * ((kam1_k1 * Math.Pow(r, 2)) + (kam1_k2 * Math.Pow(r, 4)) + (kam1_k3 * Math.Pow(r, 6)));
dx2 = kam1_p1 * (Math.Pow(r, 2) + 2 * Math.Pow(x_x0, 2)) + 2 * kam1_p2 * x_x0 * y_y0;
dx3 = kam1_b1 * x_x0 + kam1_b2 * y_y0;

dy1 = y_y0 * ((kam1_k1 * Math.Pow(r, 2)) + (kam1_k2 * Math.Pow(r, 4)) + (kam1_k3 * Math.Pow(r, 6)));
dy2 = kam1_p2 * (Math.Pow(r, 2) + 2 * Math.Pow(y_y0, 2)) + 2 * kam1_p1 * x_x0 * y_y0;

Matrix x1 = new Matrix(3, 1);
x1[0, 0] = x_x0 + dx1 + dx2 + dx3;
x1[1, 0] = y_y0 + dy1 + dy2;
x1[2, 0] = -c1;

double R10x1 = R1[0, 0] * x1[0, 0] + R1[0, 1] * x1[1, 0] + R1[0, 2] * x1[2, 0];
double R11x1 = R1[1, 0] * x1[0, 0] + R1[1, 1] * x1[1, 0] + R1[1, 2] * x1[2, 0];
double R12x1 = R1[2, 0] * x1[0, 0] + R1[2, 1] * x1[1, 0] + R1[2, 2] * x1[2, 0];

X01 = XPC1 - ((ZPC1 - Z01) * (R10x1 / R12x1));
Y01 = YPC1 - ((ZPC1 - Z01) * (R11x1 / R12x1));
```

Şekil 5.22. Yaklaşık değerlerin hesaplanması için kullanılan kodlama

Tablo 5.1. Gerçek zamanlı DYP çözümü için EKK dengeleme karakteristiği

| Sembol | Açıklama  |
|--------|---|
| $n$    | Her bir referans noktasına ait her görüntüde 2 adet olmak üzere $\ddot{x}$ ve $\ddot{y}$ düzeltilmiş görüntü koordinatlarından oluşan toplam 16 adet gözlem (ölçüm) |
| $u$    | Her görüntü (kamera) için 6 adet olmak üzere toplam 12 adet bilinmeyen dış yöneltme parametresi.  |
| $s$    | Dengelemenin serbestlik derecesi $(n - u) = 16 - 12 = 4$  |

Tablo 5.1’de karakteristiği verilen EKK dengelemesi ile 12 adet bilinmeyen, 16 adet ölçüm ile 4 serbestlik derecesinde çözülmektedir. Burada eş-doğrusallık (kolinearite) denklemlerinin düzeltilmiş görüntü koordinatları cinsinden yazılan (5.11) ve (5.12) numaralı eşitlikleri, kullanılan matematiksel modelin esasını teşkil etmektedir. Bu durumda;

$$Z_x = r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0) \quad (5.8)$$

$$Z_y = r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0) \quad (5.9)$$

$$N = r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0) \quad (5.10)$$

Olmak üzere, distorsiyonsuz ve asal nokta kayıklığı giderilmiş görüntü koordinatlarını ifade eden  $\ddot{x}$  ve  $\ddot{y}$  cinsinden kolinearite eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılabilmektedir;

$$\ddot{x} = -c \frac{Z_x}{N} \quad (5.11)$$

$$\ddot{y} = -c \frac{Z_y}{N} \quad (5.12)$$

Kolinearite eşitliklerinin bütün bilinmeyenlere göre **EK-1** ‘de sunulan türevleri alınarak Taylor serilerine açılmak suretiyle katsayılar (dizayn) matrisi Şekil 5.23’de gösterildiği şekilde her iterasyon için dinamik olarak oluşturulmaktadır.

Ayrıca her iterasyon için, **Işın Demetleriyle Dolaylı Model Dengelemesi** bölümünde ayrıntılı olarak değinilen matematiksel esaslar ışığında Şekil 5.24’de gösterilen kodlama ile dolaylı model dengelemesinin matris çarpımları yapılarak iterasyon çıktıları oluşturulmaktadır.

```

for (int i = 0; i < refnoktasayisi; i++)
{
    DXki = XYZ_CP[i, 0] - X0;
    DYki = XYZ_CP[i, 1] - Y0;
    DZki = XYZ_CP[i, 2] - Z0;

    // Zx, Zy ve N değerlerinin matrise aktarılması
    Zxki = R[0, 0] * DXki + R[1, 0] * DYki + R[2, 0] * DZki;
    Zyki = R[0, 1] * DXki + R[1, 1] * DYki + R[2, 1] * DZki;
    Nki = R[0, 2] * DXki + R[1, 2] * DYki + R[2, 2] * DZki;

    // Bilinmeyenlerin yaklaşık değerleri ile hesaplanan F0'lar
    F0[((k * refnoktasayisi + i) * 2) + 0, 0] = -c * Zxki / Nki;
    F0[((k * refnoktasayisi + i) * 2) + 1, 0] = -c * Zyki / Nki;

    // A matrisinin a ve b katsayılarıyla doldurulması.
    // a2-a7 katsayıları (bir referans noktasının x kolinearite denkleminin 6 bilinmeyene göre türevleri)
    A[((k * refnoktasayisi + i) * 2) + 0, 0 + (k * 6)] = -(c / Math.Pow(Nki, 2)) * ((R[0, 2] * Zxki) - (R[0, 0] * Nki));
    A[((k * refnoktasayisi + i) * 2) + 0, 1 + (k * 6)] = -(c / Math.Pow(Nki, 2)) * ((R[1, 2] * Zxki) - (R[1, 0] * Nki));
    A[((k * refnoktasayisi + i) * 2) + 0, 2 + (k * 6)] = -(c / Math.Pow(Nki, 2)) * ((R[2, 2] * Zxki) - (R[2, 0] * Nki));
    A[((k * refnoktasayisi + i) * 2) + 0, 3 + (k * 6)] = -(c / Nki) * (((DYki * R[2, 2] - DZki * R[1, 2]) * (Zxki / Nki))
        - (DYki * R[2, 0]) + (DZki * R[1, 0]));
    A[((k * refnoktasayisi + i) * 2) + 0, 4 + (k * 6)] = (c / Nki) * (((Zxki * Math.Cos(kappa)) - (Zyki * Math.Sin(kappa)))
        * (Zxki / Nki)) + (Nki * Math.Cos(kappa));
    A[((k * refnoktasayisi + i) * 2) + 0, 5 + (k * 6)] = -c * Zyki / Nki;

    // b2-b7 katsayıları (bir referans noktasının y kolinearite denkleminin 6 bilinmeyene göre türevleri)
    A[((k * refnoktasayisi + i) * 2) + 1, 0 + (k * 6)] = -(c / Math.Pow(Nki, 2)) * ((R[0, 2] * Zyki) - (R[0, 1] * Nki));
    A[((k * refnoktasayisi + i) * 2) + 1, 1 + (k * 6)] = -(c / Math.Pow(Nki, 2)) * ((R[1, 2] * Zyki) - (R[1, 1] * Nki));
    A[((k * refnoktasayisi + i) * 2) + 1, 2 + (k * 6)] = -(c / Math.Pow(Nki, 2)) * ((R[2, 2] * Zyki) - (R[2, 1] * Nki));
    A[((k * refnoktasayisi + i) * 2) + 1, 3 + (k * 6)] = -(c / Nki) * (((DYki * R[2, 2] - DZki * R[1, 2]) * (Zyki / Nki))
        - (DYki * R[2, 1]) + (DZki * R[1, 1]));
    A[((k * refnoktasayisi + i) * 2) + 1, 4 + (k * 6)] = (c / Nki) * (((Zxki * Math.Cos(kappa)) - (Zyki * Math.Sin(kappa)))
        * (Zyki / Nki)) - (Nki * Math.Sin(kappa));
    A[((k * refnoktasayisi + i) * 2) + 1, 5 + (k * 6)] = c * Zxki / Nki;
}

```

Şekil 5.23. Dizayn matrisinin oluşturulması için kullanılan kodlama

|   |  |
|---|--|
| <pre> // KAPANMA MATRİSİ W = F0 - l0;  // A matrisinin transpozu for (int k = 0; k &lt; u; k++) {     for (int i = 0; i &lt; n; i++)     {         AT[k, i] = A[i, k];     } }  N = AT * Cr.Invert() * A; dkap = -N.Invert() * AT * Cr.Invert() * W; Xkap = Xkap + dkap; rkap = A * dkap + W; lkap = l0 + rkap;  // rkap Matrisinin Transpozu for (int i = 0; i &lt; n; i++) {     rkapT[0, i] = rkap[i, 0]; }  // Sonsal (Aposteriori) varyansın hesaplanması (Genel) Matrix Sigma0_cap_square_pay = new Matrix(1, 1); Sigma0_cap_square_pay = rkapT * Cr.Invert() * rkap; Sigma0_cap_square = Convert.ToDouble(Sigma0_cap_square_pay[0, 0]) / (n - u); </pre> | <pre> // İTERASYON SONUCUNUN // BİLİNMEYENLERE ATANMASI X01 = Xkap[0, 0]; Y01 = Xkap[1, 0]; Z01 = Xkap[2, 0]; omega1 = Xkap[3, 0]; phi1 = Xkap[4, 0]; kappa1 = Xkap[5, 0]; X02 = Xkap[6, 0]; Y02 = Xkap[7, 0]; Z02 = Xkap[8, 0]; omega2 = Xkap[9, 0]; phi2 = Xkap[10, 0]; kappa2 = Xkap[11, 0]; </pre> |
|---|--|

Şekil 5.24. Dolaylı model dengelemesi için kullanılan kodlama

Ayarlar bölümünde dengeleme için belirlenen yakınsama ve doğruluk kriterlerine bağlı olarak istenen yakınsama eşiği geçildiği anda yeni bir iterasyona geçilmeden dengeleme sonlandırılmakta ve elde edilen dengelenmiş dış yöneltme parametreleri ve dengelemeye ait sonsal (aposteriori) varyans değerleri Ana Modül üzerindeki ilgili alanlara Şekil 5.25'te gösterildiği gibi gerçek zamanlı ve dinamik olarak yazdırılmaktadır.

|  |                      |                       |                            |  |                      |                       |       |
|--|----------------------|-----------------------|----------------------------|--|----------------------|-----------------------|-------|
| <b>PROJEKSİYON MERKEZİ</b><br><b>UZAY KOORDİNATLARI (m.)</b> |                      |                       | Görüntü Koordinatlarını Al | <b>PROJEKSİYON MERKEZİ</b><br><b>UZAY KOORDİNATLARI (m.)</b> |                      |                       |       |
| Xo   | Yo                   | Zo                    |                            | Xo   | Yo                   | Zo                    |       |
| 0,0138   | 0,0402               | 0,6334                | YAKLAŞIK DEĞER HESAPLA     | 0,2183   | 0,0589               | 0,6172                |       |
| <b>ÜÇ EKSENDEKİ</b><br><b>DÖNÜKLÜKLER (Rad.)</b>             |                      |                       | DIŞ YÖN. PAR. DENGELE - I  | <b>ÜÇ EKSENDEKİ</b><br><b>DÖNÜKLÜKLER (Rad.)</b>             |                      |                       |       |
| Omega<br>( $\omega$ )  | Phi<br>( $\varphi$ ) | Kappa<br>( $\kappa$ ) |                            | Omega<br>( $\omega$ )  | Phi<br>( $\varphi$ ) | Kappa<br>( $\kappa$ ) |       |
| 0,0388   | 0,0531               | 0,0241                | DIŞ YÖN. PAR. DENGELE - II | 0,0501   | 0,2357               | 0,0138                |       |
| AVF :  | 0,9959               | UYGUN                 | İterasyon :                | 5  | AVF :                | 0,9957                | UYGUN |
|  |                      |                       | Süre :                     | 1,525  | msn.                 |                       |       |

Şekil 5.25. Ana modül üzerinde dinamik olarak DYP gösterimi

Diğer bir yandan; yüksek doğrulukla önceden belirlenen sabit bir stereo kamera bazının ölçüm doğruluklarına olan etkisini görmek amacıyla yazılıma sonradan eklenen özellik sayesinde, stereo kamera bazı isteğe bağlı olarak Ana Modül üzerinden seçilerek sabit (fixed) veya serbest (released) olarak Şekil 5.26'da görüldüğü gibi dengelemeye sokulabilmektedir.

|   |   |
|---|---|
| <b>BAZ SABİT</b><br>205,99902<br>Görüntü Çözünürlüğü<br>640 x 480<br>Piksel Fiziksel Boyutu<br>6 Mikron<br>Görüntüleyici Boyutu (mm)<br>3,84 x 2,88 | <b>BAZ SERBEST</b><br>210,40980<br>Görüntü Çözünürlüğü<br>640 x 480<br>Piksel Fiziksel Boyutu<br>6 Mikron<br>Görüntüleyici Boyutu (mm)<br>3,84 x 2,88 |
|---|---|

Şekil 5.26. Ana modül üzerinde stereo kamera bazı

Stereo kamera bazının sabit seçilmesi durumunda anlık dengelemelere şart olarak bir gözlem daha ilave edilmektedir. Serbest seçilmesi durumunda ise anlık olarak elde edilen dış yöneltme parametrelerinden (öteleme parametrelerinden) stereo kamera bazı hesaplanarak dinamik bir şekilde Ana Modül üzerinde gösterilmektedir. Bu dinamik gösterimin diğer bir amacı da elde edilen anlık kamera dış yöneltme parametrelerinin ve dolaylı olarak görüntü koordinatları ile kameralara ait iç yöneltme değerlerinin görsel doğruluğunu test etmektir. Ölçümlere başlamadan önce kamera bazı serbest moda alınıp referans yüzey stereo görüntüleme alanı içerisinde farklı bölgelere kaydırıldığında stereo kamera bazı 2 mm'den daha fazla değişiyorsa ölçümlere devam edilmemektedir. Stereo kamera bazının belirlenmesi ve kullanımına ilişkin detay ve bulgular ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

Dış yöneltme parametrelerinin belirlenmesinin ardından ikinci bölümde ayrıntılı olarak ele alınan uzayda benzerlik dönüşümü esaslarına dayalı olarak sonda üzerindeki gümüş topların obje uzay koordinatlarının hesaplanmasına geçilmektedir.

```

private void R1_Matris_Hesapla()
{
    R1_omega[0, 0] = 1;
    R1_omega[0, 1] = 0;
    R1_omega[0, 2] = 0;
    R1_omega[1, 0] = 0;
    R1_omega[1, 1] = Math.Cos(omega1);
    R1_omega[1, 2] = -Math.Sin(omega1);
    R1_omega[2, 0] = 0;
    R1_omega[2, 1] = Math.Sin(omega1);
    R1_omega[2, 2] = Math.Cos(omega1);

    R1_phi[0, 0] = Math.Cos(phi1); ;
    R1_phi[0, 1] = 0;
    R1_phi[0, 2] = Math.Sin(phi1);
    R1_phi[1, 0] = 0;
    R1_phi[1, 1] = 1;
    R1_phi[1, 2] = 0;
    R1_phi[2, 0] = -Math.Sin(phi1);
    R1_phi[2, 1] = 0;
    R1_phi[2, 2] = Math.Cos(phi1);

    R1_kappa[0, 0] = Math.Cos(kappa1);
    R1_kappa[0, 1] = -Math.Sin(kappa1);
    R1_kappa[0, 2] = 0;
    R1_kappa[1, 0] = Math.Sin(kappa1);
    R1_kappa[1, 1] = Math.Cos(kappa1);
    R1_kappa[1, 2] = 0;
    R1_kappa[2, 0] = 0;
    R1_kappa[2, 1] = 0;
    R1_kappa[2, 2] = 1;

    R1 = R1_omega * R1_phi * R1_kappa;
}

private void R2_Matris_Hesapla()
{
    R2_omega[0, 0] = 1;
    R2_omega[0, 1] = 0;
    R2_omega[0, 2] = 0;
    R2_omega[1, 0] = 0;
    R2_omega[1, 1] = Math.Cos(omega2);
    R2_omega[1, 2] = -Math.Sin(omega2);
    R2_omega[2, 0] = 0;
    R2_omega[2, 1] = Math.Sin(omega2);
    R2_omega[2, 2] = Math.Cos(omega2);

    R2_phi[0, 0] = Math.Cos(phi2); ;
    R2_phi[0, 1] = 0;
    R2_phi[0, 2] = Math.Sin(phi2);
    R2_phi[1, 0] = 0;
    R2_phi[1, 1] = 1;
    R2_phi[1, 2] = 0;
    R2_phi[2, 0] = -Math.Sin(phi2);
    R2_phi[2, 1] = 0;
    R2_phi[2, 2] = Math.Cos(phi2);

    R2_kappa[0, 0] = Math.Cos(kappa2);
    R2_kappa[0, 1] = -Math.Sin(kappa2);
    R2_kappa[0, 2] = 0;
    R2_kappa[1, 0] = Math.Sin(kappa2);
    R2_kappa[1, 1] = Math.Cos(kappa2);
    R2_kappa[1, 2] = 0;
    R2_kappa[2, 0] = 0;
    R2_kappa[2, 1] = 0;
    R2_kappa[2, 2] = 1;

    R2 = R2_omega * R2_phi * R2_kappa;
}

```

Şekil 5.27. Senkronize görüntülere ait dönüklük matrisleri

Bu hesaplama; halihazırda alınmış ve düzeltilmiş olan görüntü koordinatları, elde edilen dış yöneltme parametreleri ve aşağıda (5.13) ve (5.14)'te verilen kolinearite denklemleri kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 5.28'de verilen kodlama ile önce her iki görüntü için yazılan  $X$  denklemleri eşitlenerek  $Z$  hesaplanmakta, daha sonra ise bulunan  $Z$  yardımıyla  $X$  ve  $Y$  koordinatları hesaplanmaktadır.

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(x-x_0) + r_{12}(y-y_0) - r_{13}c}{r_{31}(x-x_0) + r_{32}(y-y_0) - r_{33}c} \quad (5.13)$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(x-x_0) + r_{22}(y-y_0) - r_{23}c}{r_{31}(x-x_0) + r_{32}(y-y_0) - r_{33}c} \quad (5.14)$$

```

for (int i = 0; i < 4; i++)
{
    //-----
    x_x0 = HNGK[i, 0] - H1x0;
    y_y0 = HNGK[i, 1] - H1y0;
    r = Math.Sqrt(Math.Pow(x_x0, 2) + Math.Pow(y_y0, 2));

    dx1 = x_x0 * ((kam1_k1 * Math.Pow(r, 2)) + (kam1_k2 * Math.Pow(r, 4)) + (kam1_k3 * Math.Pow(r, 6)));
    dx2 = kam1_p1 * (Math.Pow(r, 2) + 2 * Math.Pow(x_x0, 2)) + 2 * kam1_p2 * x_x0 * y_y0;
    dx3 = kam1_b1 * x_x0 + kam1_b2 * y_y0;

    dy1 = y_y0 * ((kam1_k1 * Math.Pow(r, 2)) + (kam1_k2 * Math.Pow(r, 4)) + (kam1_k3 * Math.Pow(r, 6)));
    dy2 = kam1_p2 * (Math.Pow(r, 2) + 2 * Math.Pow(y_y0, 2)) + 2 * kam1_p1 * x_x0 * y_y0;

    x1[0, 0] = x_x0 + dx1 + dx2 + dx3;
    x1[1, 0] = y_y0 + dy1 + dy2;
    x1[2, 0] = -c1;

    //-----
    x_x0 = HNGK[i, 2] - H2x0;
    y_y0 = HNGK[i, 3] - H2y0;
    r = Math.Sqrt(Math.Pow(x_x0, 2) + Math.Pow(y_y0, 2));

    dx1 = x_x0 * ((kam2_k1 * Math.Pow(r, 2)) + (kam2_k2 * Math.Pow(r, 4)) + (kam2_k3 * Math.Pow(r, 6)));
    dx2 = kam2_p1 * (Math.Pow(r, 2) + 2 * Math.Pow(x_x0, 2)) + 2 * kam2_p2 * x_x0 * y_y0;
    dx3 = kam2_b1 * x_x0 + kam2_b2 * y_y0;

    dy1 = y_y0 * ((kam2_k1 * Math.Pow(r, 2)) + (kam2_k2 * Math.Pow(r, 4)) + (kam2_k3 * Math.Pow(r, 6)));
    dy2 = kam2_p2 * (Math.Pow(r, 2) + 2 * Math.Pow(y_y0, 2)) + 2 * kam2_p1 * x_x0 * y_y0;

    x2[0, 0] = x_x0 + dx1 + dx2 + dx3;
    x2[1, 0] = y_y0 + dy1 + dy2;
    x2[2, 0] = -c2;

    //-----
    R10x1 = R1[0, 0] * x1[0, 0] + R1[0, 1] * x1[1, 0] + R1[0, 2] * x1[2, 0];
    R11x1 = R1[1, 0] * x1[0, 0] + R1[1, 1] * x1[1, 0] + R1[1, 2] * x1[2, 0];
    R12x1 = R1[2, 0] * x1[0, 0] + R1[2, 1] * x1[1, 0] + R1[2, 2] * x1[2, 0];

    R20x2 = R2[0, 0] * x2[0, 0] + R2[0, 1] * x2[1, 0] + R2[0, 2] * x2[2, 0];
    R21x2 = R2[1, 0] * x2[0, 0] + R2[1, 1] * x2[1, 0] + R2[1, 2] * x2[2, 0];
    R22x2 = R2[2, 0] * x2[0, 0] + R2[2, 1] * x2[1, 0] + R2[2, 2] * x2[2, 0];

    Z = ((X01 - X02) - (Z01 * R10x1 / R12x1) + (Z02 * R20x2 / R22x2)) / ((R20x2 / R22x2) - (R10x1 / R12x1));
    X = X01 + ((Z - Z01) * (R10x1 / R12x1));
    Y = Y01 + ((Z - Z01) * (R11x1 / R12x1));

    Ykont4t[i, 0] = (Y02 + ((Z - Z02) * (R21x2 / R22x2))) - Y; // Y PARALAKSI

    HNUK[i, 0] = X;
    HNUK[i, 1] = (Y + (Y02 + ((Z - Z02) * (R21x2 / R22x2)))) / 2;
    HNUK[i, 2] = Z;
}

```

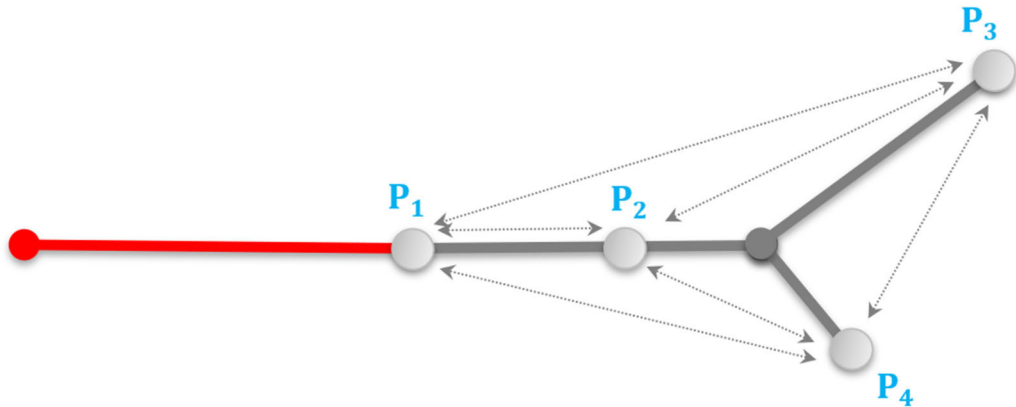
Şekil 5.28. Sonda üzerindeki gümüş topların obje uzay koordinatlarının hesabı

Hareketli sonda ile yapılan ölçümlerin konum doğruluğunu artırmak amacıyla; Sistem Tasarımı bölümünde bahsedildiği üzere, aynı düzlemde olacak şekilde tasarlanan hareketli sonda üzerindeki gümüş topların obje uzay koordinatları yeniden dengelemeye sokularak en fazla konum hatasını içeren Z koordinatlarına bir düzeltme daha getirilmekte ve Ana Modül üzerindeki ilgili alanlara Şekil 5.29'da gösterildiği gibi gerçek zamanlı ve dinamik olarak yazdırılmaktadır.

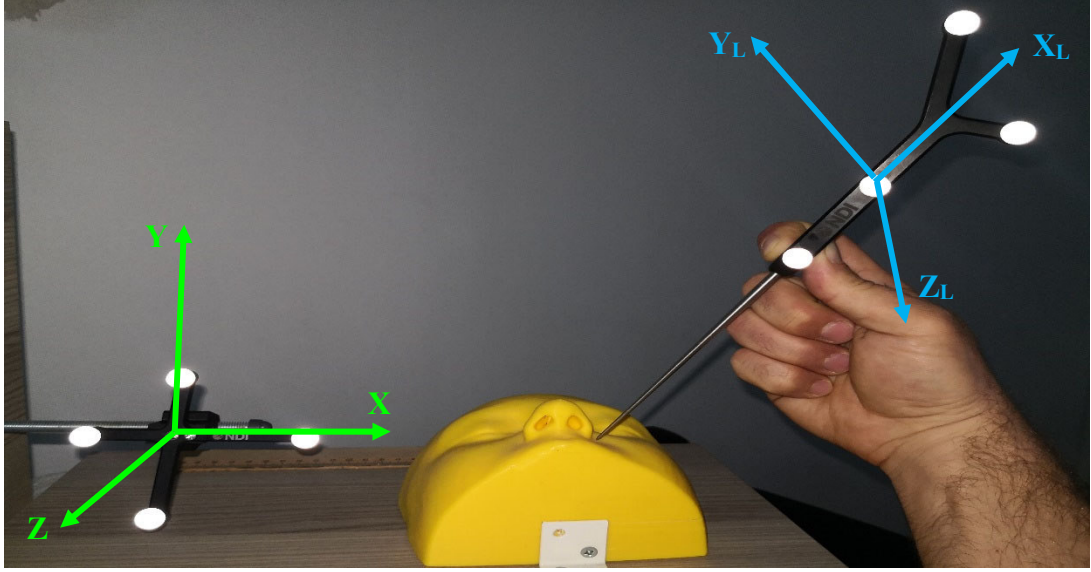
| Y-Paralaks<br>Kont. (m.) |    | SONDA ÜZERİNDEKİ GÜMÜŞ TOPLARIN<br>UZAY KOORDİNATLARI (m.) |        |         | Çapraz Kontrol (m.) |         |         |    |
|--------------------------|----|--|--------|---------|---------------------|---------|---------|----|
|                          |    | X  | Y      | Z       |                     |         |         |    |
| 0,0002                   | P1 | 0,0057   | 0,0770 | -0,0091 | P1                  |         |         |    |
| 0,0005                   | P2 | -0,0103  | 0,1248 | -0,0095 | -0,0005             | P2      |         |    |
| 0,0011                   | P3 | -0,0611  | 0,1976 | -0,0060 | -0,0006             | -0,0002 | P3      |    |
| 0,0008                   | P4 | -0,0026  | 0,1805 | -0,0132 | -0,0009             | -0,0004 | -0,0003 | P4 |
| --                       | P5 | --   | --     | --      | --                  | --      | --      | -- |

Şekil 5.29. Sondaya ait gümüş top koordinatlarının dinamik olarak gösterimi

Ölçümler esnasında görsel olarak ilave bir kontrol daha sağlamak amacıyla; hassas olarak tasarlanan sonda üzerinde Şekil 5.30'da gösterilen ve önceden yüksek doğrulukla bilinen gümüş toplar arasındaki çapraz mesafeler, fotogrametrik olarak anlık hesaplananlar ile karşılaştırılarak Ana Modül üzerinde çapraz kontrol bölümüne Şekil 5.29'daki gibi dinamik olarak yazdırılmaktadır.

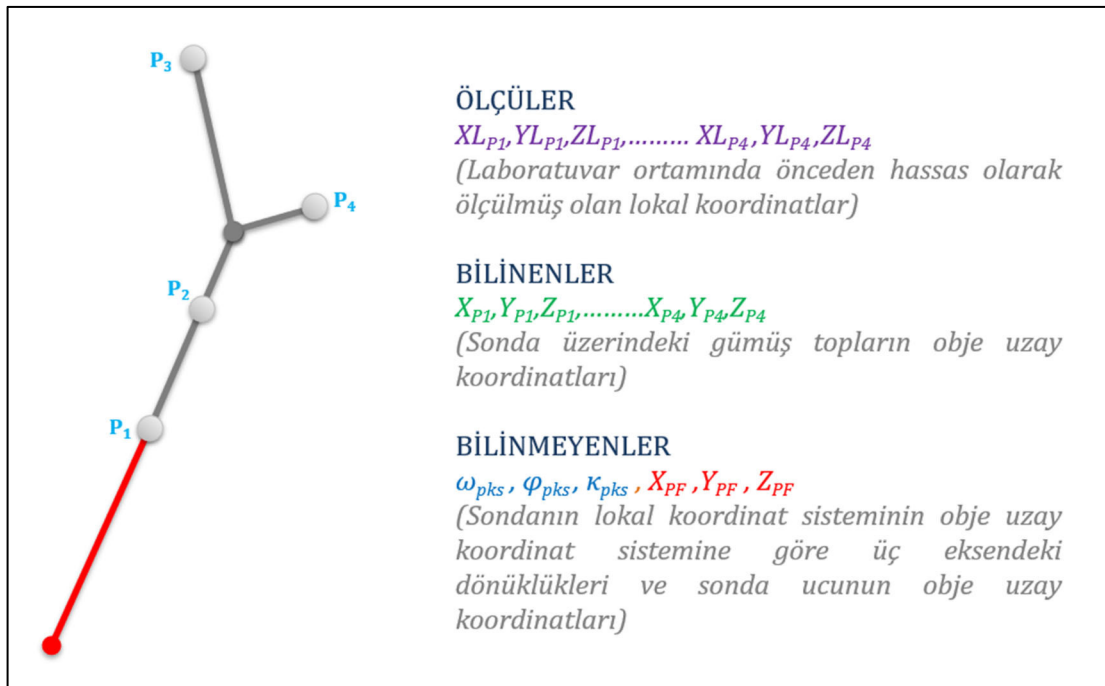


Şekil 5.30. Sonda üzerinde kontrol edilen çapraz mesafeler



Şekil 5.31. Obje uzay koordinat sistemi ve sonda lokal koordinat sistemi

Gerçek zamanlı ölçüm döngüsünün son adımı olan sonda uç noktasının gerçek zamanlı ve anlık 3B konumunun (obje uzay koordinatlarının) belirlenmesi için önce Şekil 5.31’de gösterilen obje uzay koordinat sistemi ile sonda lokal koordinat sistemi arasındaki dönüklük parametrelerinin EKK yöntemi ile dengelenmesi yapılmakta, sonra ise bu dönüklük parametreleri kullanılarak benzerlik dönüşümü ile uç noktanın konumu hesaplanmaktadır. Söz konusu EKK dengelenmesinde kullanılan parametreler şekil 5.32’de verilmiştir.



Şekil 5.32. Sonda dönüklüğü için EKK dengelenmesi parametreleri

Tablo 5.2. Sonda dönüklüğü için EKK dengeleme karakteristiği

| Sembol | Açıklama   |
|--------|--|
| $n$    | Sonda üzerindeki her bir gümüş topa ait 3'er adet olmak üzere lokal koordinatlardan oluşan toplam 12 adet gözlem (ölçüm) |
| $u$    | Sonda lokal koordinat sisteminin obje uzay koordinat sistemine göre dönüklüklerinden oluşan toplam 3 adet bilinmeyen.    |
| $s$    | Dengelemenin serbestlik derecesi $(n - u) = 12 - 3 = 9$  |

Tablo 5.2'de karakteristiği verilen EKK dengelemesi ile 3 adet bilinmeyen dönüklük parametresi, 12 adet ölçüm ile 9 serbestlik derecesinde çözülmektedir. Şekil 5.33'de verilen kodlama ile benzerlik dönüşümünden elde edilen gözlem denklemlerinin bilinmeyenlere göre türevleri alınarak Taylor serilerine açılmak suretiyle katsayılar (dizayn) matrisi her iterasyon için dinamik olarak oluşturulmakta ve Ayarlar bölümünde dengeleme için belirlenen yakınsama ve doğruluk eşiği geçilene kadar iteratif olarak çözülmektedir.

```
// KATSAYILAR MATRİSİNİN OLUŞTURULMASI
for (int i = 0; i < objetopsay; i++)
{
    DXki = (XYZ_CP[i, 0] - PKS_X0);
    DYki = (XYZ_CP[i, 1] - PKS_Y0);
    DZki = (XYZ_CP[i, 2] - PKS_Z0);
    Zxki = ZxZyN[i, 0];
    Zyki = ZxZyN[i, 1];
    Nki = ZxZyN[i, 2];

    // A matrisinin doldurulması.
    // Sonda üzerindeki hareketli noktanın x1 denkleminin 3 bilinmeyene göre türevleri
    A[(i * 3) + 0, 0] = -(DYki * R[2, 0]) + (DZki * R[1, 0]);
    A[(i * 3) + 0, 1] = -Nki * Math.Cos(PKS_kappa);
    A[(i * 3) + 0, 2] = Zyki;

    // Sonda üzerindeki hareketli noktanın y1 denkleminin 3 bilinmeyene göre türevleri
    A[(i * 2) + 1, 0] = -(DYki * R[2, 1]) + (DZki * R[1, 1]);
    A[(i * 2) + 1, 1] = Nki * Math.Sin(PKS_kappa);
    A[(i * 2) + 1, 2] = -Zxki;

    // Sonda üzerindeki hareketli noktanın z1 denkleminin 3 bilinmeyene göre türevleri
    A[(i * 3) + 2, 0] = -(DYki * R[2, 2]) + (DZki * R[1, 2]);
    A[(i * 3) + 2, 1] = (Math.Cos(PKS_phi) * DXki) + (Math.Sin(PKS_omega) * Math.Sin(PKS_phi) * DYki)
        - (Math.Cos(PKS_omega) * Math.Sin(PKS_phi) * DZki);
    A[(i * 3) + 2, 2] = 0;
}

// KAPANMA MATRİSİ
W = F0 - l0;

// A matrisinin transpozu
for (int k = 0; k < u; k++)
{
    for (int i = 0; i < n; i++)
    {
        AT[k, i] = A[i, k];
    }
}

N = AT * Cr.Invert() * A;
Dkap = -N.Invert() * AT * Cr.Invert() * W;
Xkap = Xkap + Dkap;
rkap = A * Dkap + W;
lkap = l0 + rkap;

// DENGELENMİŞ BİLİNMEYENLER
PKS_omega = Xkap[0, 0];
PKS_phi = Xkap[1, 0];
PKS_kappa = Xkap[2, 0];
```

Şekil 5.33. Sonda dönüklüğünün dengelemesi için kullanılan kodlama

Sonda lokal koordinat sistemi eksenlerinin obje uzay koordinat sistemi eksenlerine göre dönüklüklerin istenen hassasiyette belirlenmesinin ardından Şekil 5.34'te gösterilen kodlama ile uzayda benzerlik dönüşümü yapılarak sonda uç noktasının obje uzay koordinatları ( $XPF$ ,  $YPF$ ,  $ZPF$ ) hesaplanmaktadır.

```

Rs_omega[0, 0] = 1;
Rs_omega[0, 1] = 0;
Rs_omega[0, 2] = 0;
Rs_omega[1, 0] = 0;
Rs_omega[1, 1] = Math.Cos(PKS_omega);
Rs_omega[1, 2] = -Math.Sin(PKS_omega);
Rs_omega[2, 0] = 0;
Rs_omega[2, 1] = Math.Sin(PKS_omega);
Rs_omega[2, 2] = Math.Cos(PKS_omega);

Rs_phi[0, 0] = Math.Cos(PKS_phi); ;
Rs_phi[0, 1] = 0;
Rs_phi[0, 2] = Math.Sin(PKS_phi);
Rs_phi[1, 0] = 0;
Rs_phi[1, 1] = 1;
Rs_phi[1, 2] = 0;
Rs_phi[2, 0] = -Math.Sin(PKS_phi);
Rs_phi[2, 1] = 0;
Rs_phi[2, 2] = Math.Cos(PKS_phi);

Rs_kappa[0, 0] = Math.Cos(PKS_kappa);
Rs_kappa[0, 1] = -Math.Sin(PKS_kappa);
Rs_kappa[0, 2] = 0;
Rs_kappa[1, 0] = Math.Sin(PKS_kappa);
Rs_kappa[1, 1] = Math.Cos(PKS_kappa);
Rs_kappa[1, 2] = 0;
Rs_kappa[2, 0] = 0;
Rs_kappa[2, 1] = 0;
Rs_kappa[2, 2] = 1;

Rs = Rs_omega * Rs_phi * Rs_kappa;

Matrix x = new Matrix(3, 1);

x[0, 0] = XL_PF - l_orj[(t * 3) + 0, 0];
x[1, 0] = YL_PF - l_orj[(t * 3) + 1, 0];
x[2, 0] = ZL_PF - l_orj[(t * 3) + 2, 0];

double Rs0x = Rs[0, 0] * x[0, 0] + Rs[0, 1] * x[1, 0] + Rs[0, 2] * x[2, 0];
double Rs1x = Rs[1, 0] * x[0, 0] + Rs[1, 1] * x[1, 0] + Rs[1, 2] * x[2, 0];
double Rs2x = Rs[2, 0] * x[0, 0] + Rs[2, 1] * x[1, 0] + Rs[2, 2] * x[2, 0];

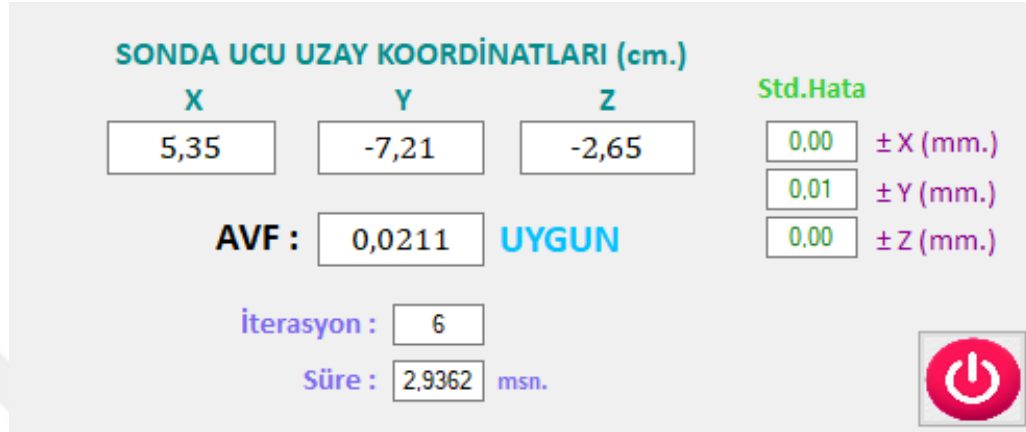
XPF = PKS_X0 + Rs0x;
YPF = PKS_Y0 + Rs1x;
ZPF = PKS_Z0 + Rs2x;

```

Şekil 5.34. Sonda dönüklüğünün dengelemesi için kullanılan kodlama

Burada altı çizilmesi gereken bir nokta ise benzerlik dönüşümü için gerekli olan öteleme parametrelerinin nereden geldiğidir. Öteleme parametreleri; sonda lokal koordinat sisteminin başlangıcı olan P1 numaralı sonda topunun önceki adımlarda hesaplanmış olan obje uzay koordinatlarıdır ( $XPI$ ,  $YPI$ ,  $ZPI$ ).

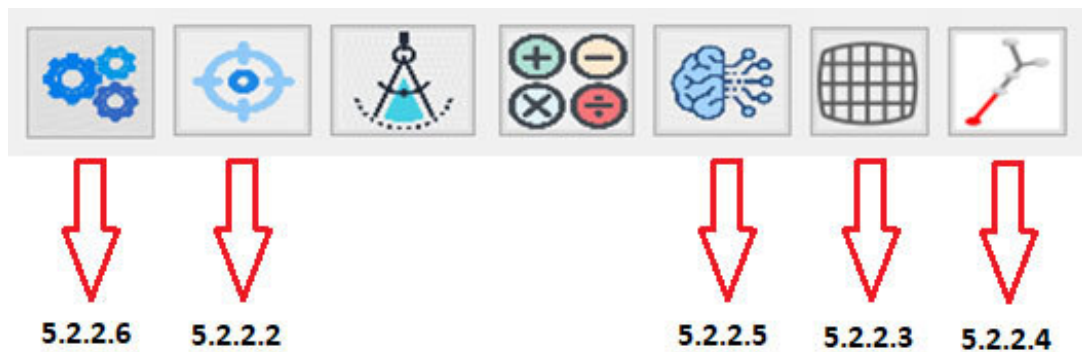
Hesaplama sonucunda elde edilen sonda ucu gerçek zamanlı (anlık) ve nihai obje uzay koordinatları ( $XPF$ ,  $YPF$ ,  $ZPF$ ), standart hataları ve dengelemeye ait sonsal (aposteriori) varyans değeri Ana Modül üzerindeki ilgili alanlara Şekil 5.35'te gösterildiği gibi gerçek zamanlı ve dinamik olarak yazdırılmaktadır.



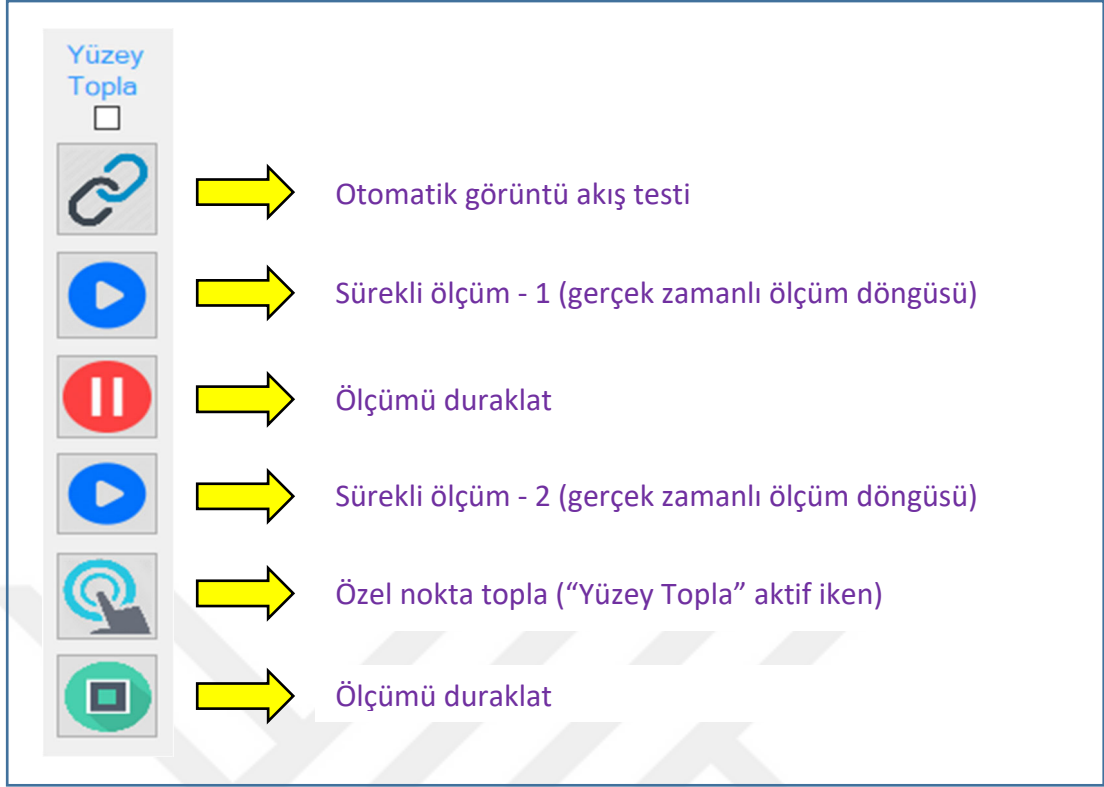
Şekil 5.35. Sonda ucu anlık koordinatlarının ana modül üzerinde gösterimi

Buraya kadar anlatılan işlem adımları en başta Şekil 5.15'te sunulan ana modül gerçek zamanlı ölçüm döngüsünün tam bir işleyiştir yani belirlenen frekansa göre saniyede alınan her bir stereo görüntü çifti içerisinde yapılan tek bir konumlama işlemidir. Ölçüm devam ettiği sürece döngü başa alınmakta ve bu algoritmalar kombinasyonu sürekli ve ardışık olarak tekrarlanmaktadır. Döngü içerisindeki kısmi ve tam işlem süreleri Ana Modül ara yüzünde bilgi amaçlı olarak gösterilmektedir.

Ölçümlerin başlatılıp sonlandırılması, yüzey, hat ve nokta toplama işlemleri Şekil 5.37'de gösterilen yönetim paneli, diğer alt modüllere erişim ise Şekil 5.36'da gösterilen erişim paneli kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

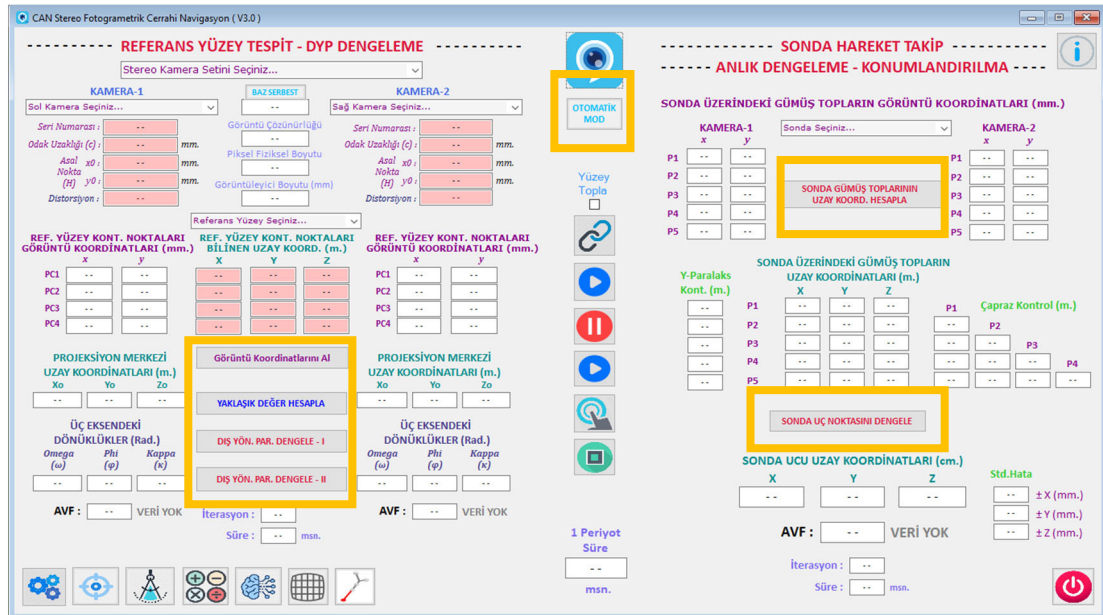


Şekil 5.36. Alt modüllere erişim paneli



Şekil 5.37. Ölçüm yönetim paneli

Bunun yanı sıra; Ana Modül arayüzünden “Manuel Mod” seçilmesi durumunda, gerçek zamanlı ölçüm döngüsü ile ardışık ve otomatik olarak yapılan bütün işlemler kontrol amaçlı olarak Şekil 5.38’de gösterilen ve ardışık olarak aktif hale gelen düğmeler kullanılarak baştan sona adım adım olarak da yapılabilmektedir.



Şekil 5.38. Ana modül üzerinde manuel mod ile ölçüm

### 5.2.2.2. Görüntü Akış ve Tespit Kontrol Modülü

Ana modülde bulunan erişim paneli üzerinden ulaşılabilen alt modüllerden biri olan Görüntü Akış ve Tespit Kontrol Modülü sayesinde;

- Stereo görüntüleme alanı ve donanımın yerleşimi (referans ve sonda),
- Stereo ortamda istenmeyen yansıma yapan farklı objelerin kontrolü,
- Gümüş topların otomatik tespit duyarlılığı,
- Gümüş toplara ait görüntü koordinatlarının otomatik tespit standart sapmaları

Ölçümler öncesinde veya ölçümler esnasında Şekil 5.39'da sunulan arayüz üzerinden kontrol edilebilmektedir.



Şekil 5.39. Görüntü Akış ve Tespit Kontrol Modülü

Görüntü Akış ve Tespit Kontrol Modülü aslında; Video Görüntülerden Otomatik Obje Tespit Yazılımı tarafından tespit edilen ve Cerrahi Navigasyon Yazılımına gerçek zamanlı olarak sunulan stereo görüntü koordinatlarının sağlıklı bir şekilde akışını görsel olarak da teyit etmek için kullanılmaktadır. Modül üzerinde başlangıçta hesaplanan standart sapmalar anlık ölçüm dengelemelerinde gözlemlerin (görüntü koordinatlarının) kovaryans matrisini oluşturmaktadır. Modülün arayüzünde; tespit edilen gümüş toplara ait stereo görüntü koordinatları her iki kameranın izdüşüm düzlemleri üzerinde gösterilmektedir. Kullanılan kodlama Şekil 5.40'da sunulmuştur.

```

public static ArrayList koordinatlist = new ArrayList();
private Graphics grafikler;
private SolidBrush mybrush;
int brnckamkoorsay = 0;
int iknckamkoorsay = 0;
int secenek = 0;
private readonly BackgroundWorker _backgroundWorker2;

public static ArrayList olcumler = new ArrayList();
Matrix toplamlar = new Matrix(16, 1);
Matrix stdsapmalar = new Matrix(16, 1);
Int32 n = 0;
Int32 frameciftnr = 0;
Int32 frameciftsirano = 0;
Int32 yaznoktasay = 0;
bool Stereokayit = false;
int kayitkamerano;
TextWriter dosyayaz;

public GoruntuKontrol()
{
    InitializeComponent();

    _backgroundWorker2 = new BackgroundWorker
    {
        WorkerSupportsCancellation = true
    };
    _backgroundWorker2.DoWork += backgroundWorker2_DoWork;
    _backgroundWorker2.RunWorkerCompleted += backgroundWorker2_RunWorkerCompleted;

    Disposed += Form2_Disposed;
}

private void ciz()
{
    mybrush = new System.Drawing.SolidBrush(System.Drawing.Color.Crimson);
    grafikler = this.CreateGraphics();
    grafikler.Clear(this.BackColor);

    double oran = 320 / AnaEkran.gxboyut;
    Int32 framex = Convert.ToInt32(AnaEkran.gxboyut * oran);
    Int32 framey = Convert.ToInt32(AnaEkran.gyboyut * oran);

    grafikler.DrawRectangle(System.Drawing.Pens.Blue, 50, 50, framex, framey);
    grafikler.DrawRectangle(System.Drawing.Pens.Blue, 430, 50, framex, framey);

    frameciftnr += 1;

    for (int ki = 0; ki < 2; ki++)
    {
        int kamkoorsay;
        if (ki == 0)
        {
            kamkoorsay = brnckamkoorsay;
        }
        else
        {
            kamkoorsay = iknckamkoorsay;
        }

        //noktaların ekrana çizilmesi
        for (int k = 0; k < (kamkoorsay / 2); k++)
        {
            double xreskd = Convert.ToDouble(koordinatlist[ki * brnckamkoorsay + 0 + k * 2]);
            double yreskd = Convert.ToDouble(koordinatlist[ki * brnckamkoorsay + 1 + k * 2]);

            Int32 xresk = Convert.ToInt32(xreskd);
            Int32 yresk = Convert.ToInt32(yreskd);

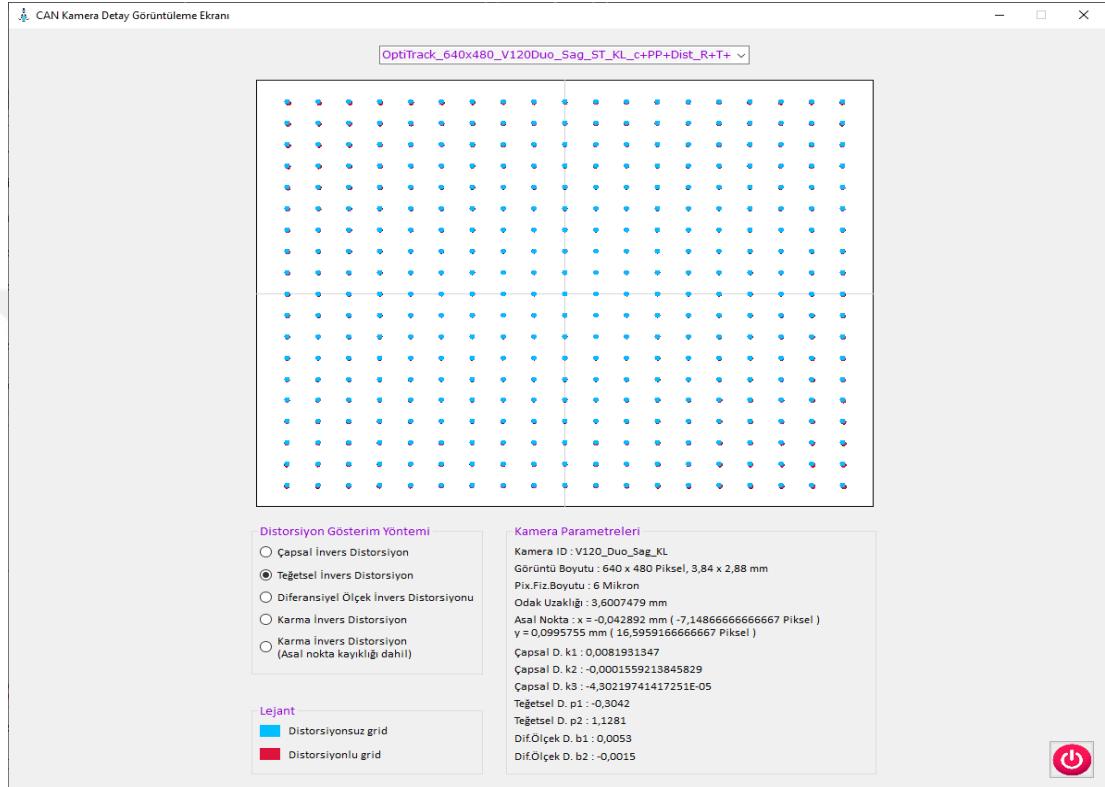
            grafikler.DrawRectangle(System.Drawing.Pens.Blue, (380 * ki) + 50, 50, framex, framey);
            grafikler.DrawEllipse(System.Drawing.Pens.Black, (380 * ki) + 50
            + Convert.ToInt32(xresk * oran) - 2, 50 + Convert.ToInt32(yresk * oran) - 2, 4, 4);
            grafikler.FillEllipse(mybrush, (380 * ki) + 50 + Convert.ToInt32(xresk * oran) - 2, 50
            + Convert.ToInt32(yresk * oran) - 2, 4, 4);
        }
    }
}

```

Şekil 5.40. Görüntü akış testi için kullanılan kodlama

### 5.2.2.3. Kamera Detay Görüntüleme Modülü

Kullanılan kameraların fotogrametrik laboratuvar kalibrasyonu yapıldıktan sonra distorsiyon ve iç yöneltme parametrelerinin ayrıntılı olarak görüntülenmesi amacıyla geliştirilmiştir. Şekil 5.41’de arayüzü sunulan söz konusu modüle Ana Modül üzerinde bulunan erişim panelinden ulaşılabilmektedir.

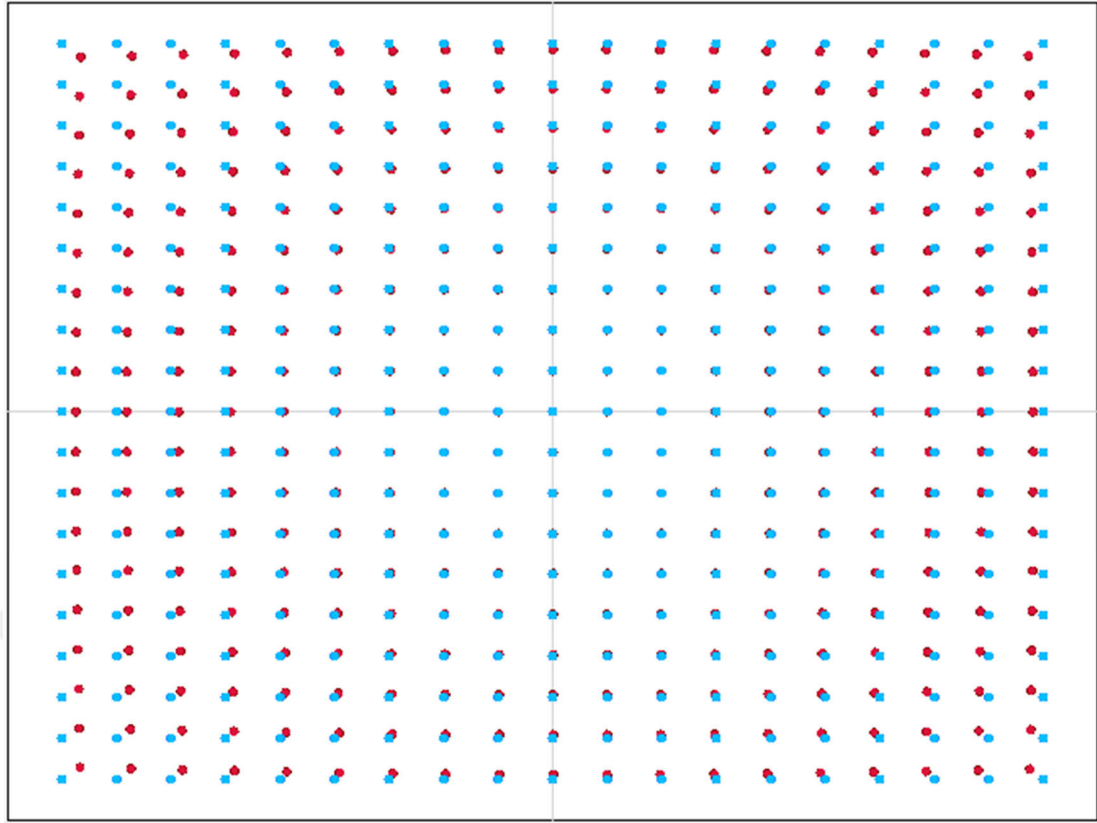


Şekil 5.41. Kamera Detay Görüntüleme Modülü

Kamera kalibrasyonu ile belirlenen parametrelerin mavi renkteki distorsiyonsuz grid üzerinde gerçekte nasıl bir etki yaptığı, Şekil 5.42’de sunulan distorsiyon gösterim yöntemi bölümünden seçilerek;

- Çapsal invers distorsiyon,
- Teğetsel invers distorsiyon,
- Diferansiyel ölçek invers distorsiyonu,
- Karma invers distorsiyon,
- Karma invers distorsiyon (Asal nokta kayıklığı dâhil)

Grafikleri ayrıntılı olarak görüntülenebilmektedir. Distorsiyon gösterimi için geliştirilen kodlamanın örnek bir bölümü Şekil 5.43’te sunulmuştur.



### Distorsiyon Gösterim Yöntemi

Çapsal İvers Distorsiyon

Teğetsel İvers Distorsiyon

Diferansiyel Ölçek İvers Distorsiyonu

Karma İvers Distorsiyon

Karma İvers Distorsiyon (Asal nokta kayıklığı dahil)

### Kamera Parametreleri

Kamera ID : V120\_Duo\_Sol\_KL

Görüntü Boyutu : 640 x 480 Piksel, 3,84 x 2,88 mm

Pix.Fiz.Boyutu : 6 Mikron

Odak Uzaklığı : 3,5688085 mm

Asal Nokta : x = -0,0824757 mm ( -13,74595 Piksel )  
y = -0,0062288 mm ( -1,0381333333333333 Piksel )

Çapsal D. k1 : 0,0097753941

Çapsal D. k2 : -0,0007383237523913

Çapsal D. k3 : 2,31367075821727E-05

Teğetsel D. p1 : -0,6906

Teğetsel D. p2 : 0,4075

Dif.Ölçek D. b1 : 0,0012

Dif.Ölçek D. b2 : 0,0005

### Lejant

Distorsiyonsuz grid

Distorsiyonlu grid

Şekil 5.42. Kalibre edilmiş parametreler ve distorsiyonların ayrıntılı gösterimi

```

private void radioButton3_CheckedChanged(object sender, EventArgs e) //Toplam (karma) distorsiyon etkisinin gösterimi
{
    grafikler = this.CreateGraphics();
    grafikler.Clear(this.BackColor);

    float oran = Convert.ToSingle(gxboyut / gyboyut);
    float framey = 500;
    float framex = framey * oran;
    float framestartx = 600 - (framex / 2);
    float framestarty = 60;

    grafikler.DrawRectangle(System.Drawing.Pens.Black, framestartx, framestarty, framex, framey);
    grafikler.FillRectangle(mybrush4, new Rectangle(Convert.ToInt16(framestartx) + 1, Convert.ToInt16(framestarty)
    + 1, Convert.ToInt16(framex) - 2, Convert.ToInt16(framey) - 2));
    grafikler.DrawLine(System.Drawing.Pens.LightGray, 600, 60, 600, 560);
    grafikler.DrawLine(System.Drawing.Pens.LightGray, framestartx, 310, framestartx + framex, 310);

    Int32 xnoktasayisi = Convert.ToInt32((framex - ((25 * 2) * oran)) / (25 * oran)) + 1;
    Int32 ynoktasayisi = Convert.ToInt32((framey - (25 * 2)) / 25) + 1;

    float noktastartx = framestartx + (25 * oran);
    float noktastarty = framestarty + 25;

    float dairecap = 5;

    for (int i = 0; i < xnoktasayisi; i++)
    {
        for (int k = 0; k < ynoktasayisi; k++)
        {
            float xkoord = noktastartx + (i * 25 * oran);
            float ykoord = noktastarty + (k * 25);

            double x_ud = ((xkoord - 600) / framex) * gxboyut;
            double y_ud = (-(ykoord - 310) / framey) * gyboyut;

            x_x0 = x_ud;
            y_y0 = y_ud;
            r = Math.Sqrt(Math.Pow(x_x0, 2) + Math.Pow(y_y0, 2));

            dx1 = x_x0 * ((kam1_k1 * Math.Pow(r, 2)) + (kam1_k2 * Math.Pow(r, 4)) + (kam1_k3 * Math.Pow(r, 6)));
            dx2 = kam1_p1 * (Math.Pow(r, 2) + 2 * Math.Pow(x_x0, 2)) + 2 * kam1_p2 * x_x0 * y_y0;
            dx3 = kam1_b1 * x_x0 + kam1_b2 * y_y0;

            dy1 = y_y0 * ((kam1_k1 * Math.Pow(r, 2)) + (kam1_k2 * Math.Pow(r, 4)) + (kam1_k3 * Math.Pow(r, 6)));
            dy2 = kam1_p2 * (Math.Pow(r, 2) + 2 * Math.Pow(y_y0, 2)) + 2 * kam1_p1 * x_x0 * y_y0;

            double x_d = x_x0 - dx1 - dx2 - dx3;
            double y_d = y_y0 - dy1 - dy2;

            double x = x_d;
            double y = y_d;

            float distorted_xkoord = 600 + (Convert.ToSingle(x / gxboyut) * framex);
            float distorted_ykoord = 310 - (Convert.ToSingle(y / gyboyut) * framey);

            // gridin invers distorsiyonlu olarak çizdirilmesi
            grafikler.DrawEllipse(System.Drawing.Pens.Maroon, distorted_xkoord - (dairecap / 2), distorted_ykoord
            - (dairecap / 2), dairecap, dairecap);
            grafikler.FillEllipse(mybrush2, distorted_xkoord - (dairecap / 2), distorted_ykoord - (dairecap / 2),
            dairecap, dairecap);

            // gridin hatasız olarak çizdirilmesi
            grafikler.DrawEllipse(System.Drawing.Pens.DodgerBlue, xkoord - (dairecap / 2), ykoord - (dairecap / 2),
            dairecap, dairecap);
            grafikler.FillEllipse(mybrush, xkoord - (dairecap / 2), ykoord - (dairecap / 2), dairecap, dairecap);
        }
    }
}

```

Şekil 5.43. Dsitorsiyon gösterimi için kullanılan kodlama örneği

#### 5.2.2.4. Sonda Ucu Eksenleme (Pivot) Modülü

Ölçümler esnasında kullanılan hareketli sondaların uç noktalarına ait anlık ve gerçek zamanlı obje uzay koordinatlarının nasıl hesaplandığı Ana Modül içerisinde anlatılmıştır. Detaylı olarak anlatıldığı üzere; söz konusu uç noktanın koordinatı için kullanılan girdiler, önceden yapılan fiziksel ölçümlerden türetilmiş ve sondaya ait lokal koordinat siteminde tanımlı koordinatlardır. Bu lokal koordinatlar anlık olarak hesaplanan dönüklük ve öteleme parametreleri kullanılarak obje uzay koordinatlarına dengeleme yöntemiyle hesaplanmaktadır.

Kullanım, taşıma ve depolama koşullarına bağlı olarak söz konusu sondaların kendi içsel geometrilerinde zamanla gözle tespit edilemeyen, fakat ölçümler açısından önemli olabilecek deformasyonlar oluşabilmektedir. Bu deformasyonların belirli periyotlarla tespit edilmesi ve sonda lokal koordinatlarının güncellenmesi şarttır, aksi takdirde ölçümlerde tutarsızlık kaçınılmaz hale gelecektir.

Sonda üzerindeki gümüş topların olduğu platformun sabit olması ve bu sabit platforma farklı sonda uçlarının takılabilmesi maksadıyla her takılan yeni sonda ucunun lokal koordinatlarının yüksek doğruluklarla hesaplanması (eksenlenmesi) büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple; Şekil 5.44'de arayüzü sunulan Sonda Ucu Eksenleme (Pivot) Modülü geliştirilerek yazılımın bünyesine dâhil edilmiştir.



Şekil 5.44. Sonda Ucu Eksenleme (Pivot) Modülü

Modülün çalışma prensibi; referans yüzey ile sondanın yakın mesafeden birlikte görüntülenerek, ardışık olarak kaydedilen farklı sonda hareketlerinin matematiksel olarak çözümlenmesine dayanmaktadır. Buna göre sonda ucu bir noktaya sabitlenerek aşağıda belirtilen sırayla;

- Obje uzay koordinat sisteminin Z eksenine dik,
- Öne doğru yaklaşık 45 derece eğik,
- Geriye doğru yaklaşık 45 derece eğik,
- Sağa doğru yaklaşık 45 derece eğik,
- Sola doğru yaklaşık 45 derece eğik

Olacak şekilde 5 farklı sonda hareketine ait hem sonda üzerindeki hem de referans yüzey üzerindeki gümüş topların görüntü koordinatları kaydedilmektedir.

Referans yüzey üzerinde bulunan ve obje uzay koordinatları bilinen gümüş toplar sayesinde önce kameraların öteleme ve dönüklükleri hesaplanmakta, sonra da bu parametreler yardımıyla her bir harekete ait sonda üzerindeki gümüş topların 3B obje uzay koordinatları hesaplanmaktadır. Burada önemli olan nokta ise; sonda üzerinde aynı düzlemde bulunan ve obje uzay koordinatları her bir hareket için hesaplanan gümüş topların lokal koordinatlarının da önceden yüksek doğrulukla bilinmesi fakat sonda ucunda herhangi bir gümüş top bulunmaması ve lokal koordinatlarının bilinmemesidir.

Sonda ucunu bir noktaya sabitleyerek kaydedilen bu hareketler ile kurulan matematiksel algoritmanın temelinde yatan geometrik bağıntı ise; “dengeleme sonucunda sonda ucuna ait lokal koordinatlar öyle bir değere yakınsamalı ki 5 farklı sonda hareketinin her biri ile uzayda elde edilen 3B sonda ucu obje uzay koordinatları tek bir noktada toplansın” esasına dayanmaktadır.

Dengelemenin bilinmeyenleri olan sonda ucunun kendi içindeki lokal koordinatları (XL\_PF, YL\_PF, ZL\_PF) için kullanılan başlangıç değerleri ise önceden fiziksel olarak kabaca ölçülen lokal koordinatlardır. Söz konusu başlangıç değerleri, yapılan iteratif dengeleme sonucunda bilinmeyenler  $\pm 0,1$  mm doğrulukla olması gereken değerlerine yakınsamaktadır. Bu bilgiler ışığında yapılan EKK dengelemesinin karakteristiği Tablo 5.3’te verilmiştir.

Tablo 5.3. Eksenleme için yapılan EKK dengeleme karakteristiği

| Sembol | Açıklama   |
|--------|--|
| $n$    | Sonda üzerindeki her bir gümüş topa ait 3'er adet olmak üzere lokal koordinatlardan oluşan toplam 12 adet gözlem (ölçüm) |
| $u$    | Sonda ucunun lokal koordinat sistemindeki koordinatları  |
| $s$    | Dengelemenin serbestlik derecesi $(n - u) = 12 - 3 = 9$  |

Söz konusu EKK dengelemesi kapsamında oluşturulan kodlamanın örnek bir bölümü Şekil 5.45'te sunulmuştur.

```
// Zx, Zy ve N değerlerinin matrise aktarılması
ZxZyN[0, 0] = R[0, 0] * (XP1 - PKS_X0) + R[1, 0] * (YP1 - PKS_Y0) + R[2, 0] * (ZP1 - PKS_Z0);
ZxZyN[0, 1] = R[0, 1] * (XP1 - PKS_X0) + R[1, 1] * (YP1 - PKS_Y0) + R[2, 1] * (ZP1 - PKS_Z0);
ZxZyN[0, 2] = R[0, 2] * (XP1 - PKS_X0) + R[1, 2] * (YP1 - PKS_Y0) + R[2, 2] * (ZP1 - PKS_Z0);
ZxZyN[1, 0] = R[0, 0] * (XP2 - PKS_X0) + R[1, 0] * (YP2 - PKS_Y0) + R[2, 0] * (ZP2 - PKS_Z0);
ZxZyN[1, 1] = R[0, 1] * (XP2 - PKS_X0) + R[1, 1] * (YP2 - PKS_Y0) + R[2, 1] * (ZP2 - PKS_Z0);
ZxZyN[1, 2] = R[0, 2] * (XP2 - PKS_X0) + R[1, 2] * (YP2 - PKS_Y0) + R[2, 2] * (ZP2 - PKS_Z0);
ZxZyN[2, 0] = R[0, 0] * (XP3 - PKS_X0) + R[1, 0] * (YP3 - PKS_Y0) + R[2, 0] * (ZP3 - PKS_Z0);
ZxZyN[2, 1] = R[0, 1] * (XP3 - PKS_X0) + R[1, 1] * (YP3 - PKS_Y0) + R[2, 1] * (ZP3 - PKS_Z0);
ZxZyN[2, 2] = R[0, 2] * (XP3 - PKS_X0) + R[1, 2] * (YP3 - PKS_Y0) + R[2, 2] * (ZP3 - PKS_Z0);
ZxZyN[3, 0] = R[0, 0] * (XP4 - PKS_X0) + R[1, 0] * (YP4 - PKS_Y0) + R[2, 0] * (ZP4 - PKS_Z0);
ZxZyN[3, 1] = R[0, 1] * (XP4 - PKS_X0) + R[1, 1] * (YP4 - PKS_Y0) + R[2, 1] * (ZP4 - PKS_Z0);
ZxZyN[3, 2] = R[0, 2] * (XP4 - PKS_X0) + R[1, 2] * (YP4 - PKS_Y0) + R[2, 2] * (ZP4 - PKS_Z0);

// Bilinmeyenlerin yaklaşık değerleri ile hesaplanan f0'lar
F0[0, 0] = 10[(t * 3) + 0, 0] + ZxZyN[0, 0];
F0[1, 0] = 10[(t * 3) + 1, 0] + ZxZyN[0, 1];
F0[2, 0] = 10[(t * 3) + 2, 0] + ZxZyN[0, 2];
F0[3, 0] = 10[(t * 3) + 0, 0] + ZxZyN[1, 0];
F0[4, 0] = 10[(t * 3) + 1, 0] + ZxZyN[1, 1];
F0[5, 0] = 10[(t * 3) + 2, 0] + ZxZyN[1, 2];
F0[6, 0] = 10[(t * 3) + 0, 0] + ZxZyN[2, 0];
F0[7, 0] = 10[(t * 3) + 1, 0] + ZxZyN[2, 1];
F0[8, 0] = 10[(t * 3) + 2, 0] + ZxZyN[2, 2];
F0[9, 0] = 10[(t * 3) + 0, 0] + ZxZyN[3, 0];
F0[10, 0] = 10[(t * 3) + 1, 0] + ZxZyN[3, 1];
F0[11, 0] = 10[(t * 3) + 2, 0] + ZxZyN[3, 2];

// KATSAYILAR MATRİSİNİN OLUŞTURULMASI
for (int i = 0; i < objetopsay; i++)
{
    DXki = (XYZ_CP[i, 0] - PKS_X0);
    DYki = (XYZ_CP[i, 1] - PKS_Y0);
    DZki = (XYZ_CP[i, 2] - PKS_Z0);
    Zxki = ZxZyN[i, 0];
    Zyki = ZxZyN[i, 1];
    Nki = ZxZyN[i, 2];

    // A matrisinin doldurulması.
    // Sonda üzerindeki hareketli noktanın x1 denkleminin 3 bilinmeyene göre türevleri
    A[(i * 3) + 0, 0] = -(DYki * R[2, 0]) + (DZki * R[1, 0]);
    A[(i * 3) + 0, 1] = -Nki * Math.Cos(PKS_kappa);
    A[(i * 3) + 0, 2] = Zyki;

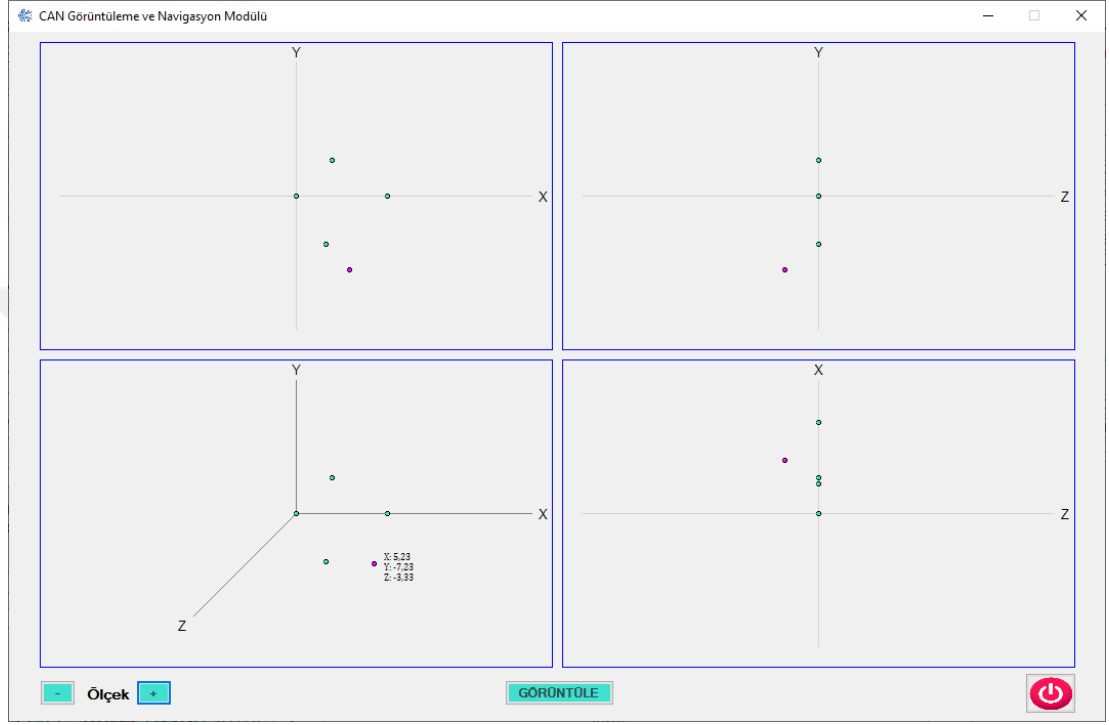
    // Sonda üzerindeki hareketli noktanın y1 denkleminin 3 bilinmeyene göre türevleri
    A[(i * 2) + 1, 0] = -(DYki * R[2, 1]) + (DZki * R[1, 1]);
    A[(i * 2) + 1, 1] = Nki * Math.Sin(PKS_kappa);
    A[(i * 2) + 1, 2] = -Zxki;

    // Sonda üzerindeki hareketli noktanın z1 denkleminin 3 bilinmeyene göre türevleri
    A[(i * 3) + 2, 0] = -(DYki * R[2, 2]) + (DZki * R[1, 2]);
    A[(i * 3) + 2, 1] = (Math.Cos(PKS_phi) * DXki) + (Math.Sin(PKS_omega) * Math.Sin(PKS_phi) * DYki)
    - (Math.Cos(PKS_omega) * Math.Sin(PKS_phi) * DZki);
    A[(i * 3) + 2, 2] = 0;
}
}
```

Şekil 5.45. Sonda ucu eksenleme için kullanılan kodlama örneği

### 5.2.2.5. Navigasyon Modülü

Gerçek zamanlı ölçümler esnasında anlık sonda hareketinin obje uzay koordinat sisteminin farklı eksenlerinde ve perspektif olarak görüntülenmesi maksadıyla Navigasyon Modülü geliştirilmiştir. Şekil 5.46'da arayüzü sunulan modüle Ana Modül üzerinde bulunan erişim panelinden ulaşılabilir.



Şekil 5.46. Görüntüleme ve Navigasyon Modülü

Şekil 5.46'da görüldüğü üzere referans yüzey üzerinde tanımlı olan obje uzay koordinat sistemi eksenlerine göre sırasıyla;

- X-Y düzleminde,
- Z-Y düzleminde,
- Z-X düzleminde,
- X-Y-Z perspektif

Olmak üzere 4 farklı ekranda sonda hareketi anlık ve gerçek zamanlı olarak görüntülenebilmektedir. Hastaya ait önceden çekilmiş çok eksenli ve çok katmanlı (multiframe) MRI görüntüsü olması durumunda, yapılacak yüzey çakıştırma işlemi sonrasında sonda ucunun anlık olarak hastanın hangi bölgesinde olduğu yine bu ekranlar içerisinde gerçek zamanlı olarak görüntülenebilecektir.

### 5.2.2.6. Ayarlar Modülü

Gerçek zamanlı ölçüm döngüsünün çalışması esnasında arka planda çalışan dengeleme ve hesaplamalara ait yakınsama eşikleri, standart hatalar ve farklı dengeleme girdilerine müdahale edilerek sonuçların dinamik olarak karşılaştırılması amacıyla Ana Modül üzerinden ulaşılabilen Ayarlar Modülü geliştirilerek yazılıma dâhil edilmiştir.

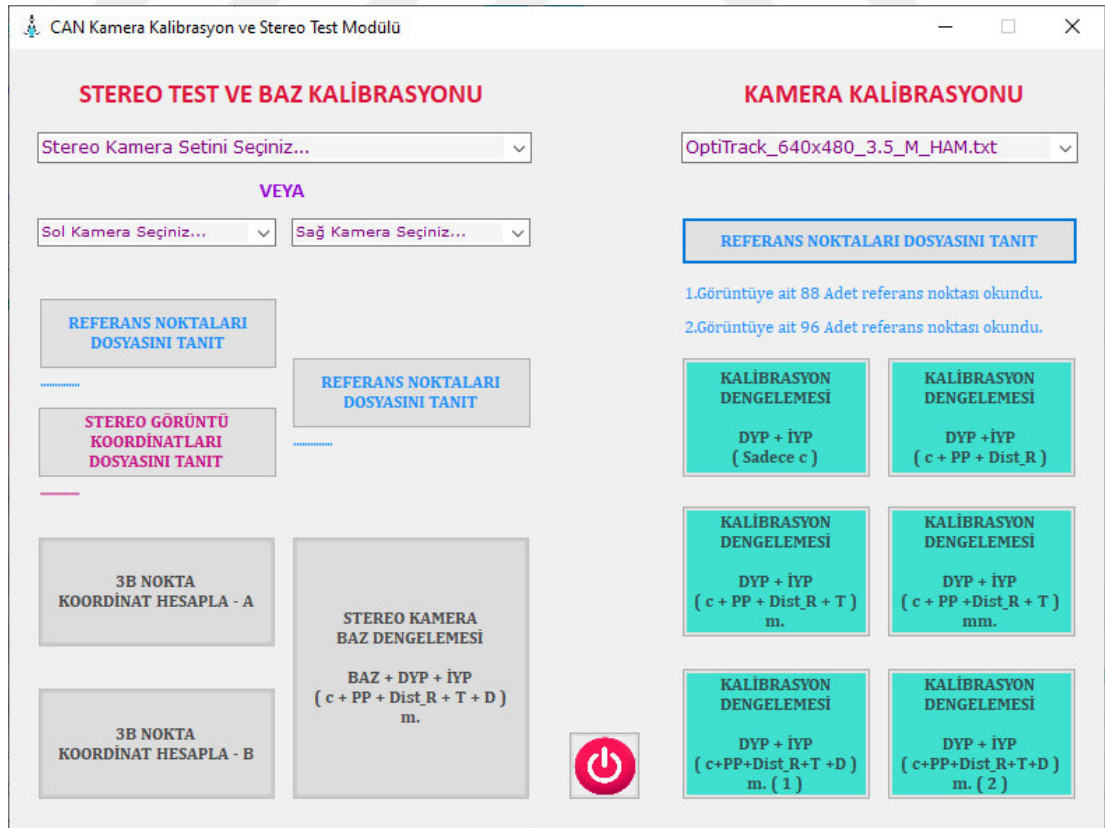
Söz konusu modül üzerinde seçilen veya girilen yeni değerlerin iterasyon sayılarında, ölçüm doğruluklarında, işlem sürelerinde ve kısaca sonuçlar üzerinde nasıl bir etki yaptığı dinamik olarak gözlenebilmektedir. Söz konusu modüle ait arayüz Şekil 5.47’de sunulmuştur.

Şekil 5.47. Ayarlar Modülü

### 5.2.3. Kamera Kalibrasyon ve Stereo Test Yazılımı

Fotogrametrik olarak yüksek doğruluklu konumsal ölçmelerin temel prensibi uzayın merkezi izdüşümünü en sağlıklı şekilde ortaya koymaktan geçmektedir. Bu izdüşümü sağlıklı bir şekilde ortaya koymanın yolu ise kullanılan kamera veya kameraların iç yöneltme elemanlarının yüksek doğrulukla bilinmesinden geçmektedir ki bu durumda uzayın merkezi izdüşümü görüntü alımının yapıldığı andaki gerçek formuna kavuşturulmuş olur ve konum doğrulukları bu oranda gerçek değerlerine yakınsar. Hayati öneme sahip cerrahi navigasyon ölçümlerinin yüksek doğruluklarla yapılabilmesi açısından, sistemde kullanılan ve kalibrasyon raporu olmayan yani metrik olmayan kameraların profesyonel fotogrametrik kamera kalibrasyonlarının yapılması sistemin genel doğruluğu açısından çok önemlidir.

Farklı kamera kalibrasyonlarının, farklı dengeleme yöntemlerinin ve farklı iç yöneltme parametrelerinin sistemin genel ölçüm doğruluklarına etkisini daha net görebilmek amacıyla hiçbir açık kaynak kod kullanılmadan kapsamlı bir fotogrametrik Kamera Kalibrasyon ve Stereo Test Yazılımı hayat geçirilerek sisteme dâhil edilmiştir. Yazılıma ait kullanıcı arayüzü Şekil 5.48’de sunulmuştur.



Şekil 5.48. Kamera Kalibrasyon ve Stereo Test Yazılımı

Bu tez çalışmasının kapsamlı ve ilave bir uygulaması olan Kamera Kalibrasyon ve Stereo Test Yazılımı içerisinde aşağıda sırasıyla verilen;

- Sadece odak uzaklığı,
- Odak uzaklığı + asal noktanın konumu + çapsal distorsiyon,
- Odak uzaklığı + asal noktanın konumu + çapsal ve teğetsel distorsiyon,
- Odak uzaklığı + asal noktanın konumu + çapsal, teğetsel ve diferansiyel ölçek distorsiyonu

Kalibrasyonları ile iç yöneltme parametrelerinin bir kısmının veya tamamının dengelemeleri ayrı ayrı yapılabilmektedir. Bu sayede, hesaplanan her bir parametrenin ölçüm doğruluklarına getirdiği iyileştirmeler ayrı ayrı irdelenebilmektedir. Kamera kalibrasyon dengelemelerine ilave olarak;

- Stereo kamera baz kalibrasyonu,
- Baz serbest stereo test (3B Koordinat Hesapla-A),
- Baz sabit stereo test (3B Koordinat Hesapla-B)

Fonksiyonları da yazılıma eklenerek yapılan doğruluk araştırmalarına kolaylık sağlanmıştır. Yukarıda maddeler halinde sıralanan fonksiyonlardan baz serbest ve baz sabit stereo test haricindeki kalibrasyon dengelemelerinin içeriği bir sonraki bölümden itibaren detaylı olarak anlatılmaktadır.

Baz serbest stereo test fonksiyonu içerisinde; kalibrasyon dengelemeleri ile elde edilen iç yöneltme parametreleri kullanılarak, önceden stereo görüntüleri alınan kalibrasyon levhası üzerindeki kesişim noktalarına ait obje uzay koordinatlarının hesabı kolinearite bağıntıları yardımıyla yapılmaktadır.

Baz sabit stereo test fonksiyonu içerisinde ise; kalibrasyon dengelemeleri ile elde edilen iç yöneltme parametrelerine ilave olarak kalibre edilen stereo kamera bazı da hesaba katılarak, önceden stereo görüntüleri alınan kalibrasyon levhası üzerindeki kesişim noktalarına ait obje uzay koordinatlarının hesabı kolinearite bağıntıları yardımıyla yapılmaktadır.

Söz konusu stereo test fonksiyonların yazılıma ilave edilmesiyle birlikte elde edilen her kalibrasyon dengelemesinin sonucu hızlı bir şekilde irdelenebilir hale getirilmiştir.

### 5.3. Fotogrametrik Kamera Kalibrasyonu

Kamera Kalibrasyon ve Stereo Test Yazılımı ile yapılan kamera kalibrasyonları; her iki kameraya ait Tablo 5.4’de verilen iç yöneltme parametrelerinin yüksek doğrulukla hesaplanmasını esas almaktadır.

Tablo 5.4. İç yöneltme parametreleri listesi

| Sembol          | Açıklama   |
|-----------------|--|
| $c$             | Odak uzaklığı  |
| $x_0, y_0$      | Asal noktanın ve aynı zamanda distorsiyon mekezinin konumu |
| $k_1, k_2, k_3$ | Çapsal distorsiyon katsayıları                             |
| $p_1, p_2$      | Teğetsel distorsiyon katsayıları                           |
| $b_1, b_2$      | Sayısal kamera diferansiyel ölçek distorsiyonu katsayıları |

Söz konusu kamera kalibrasyonları EKK dolaylı model dengelemesi yöntemiyle yapılmaktadır. Bu dengelemeler için önceden hassas olarak tasarlanmış bir kalibrasyon levhası üzerindeki kesişim noktaları Yer Kontrol Noktası (YKN) mantığıyla kullanılmaktadır. Objeye uzay koordinatları bilinen bu kesişim noktalarına ait elde edilen görüntü koordinatları  $(x, y)$  EKK dengelemesine ölçümler olarak, Tablo 5.4’de verilen iç yöneltme parametreleri ise bilinmeyen olarak sokulmaktadır.

Tablo 5.5. Kamera Kalibrasyonu için yapılan EKK dengeleme karakteristiği

| Sembol | Açıklama   |
|--------|--|
| $n$    | Levha üzerindeki her kesişim noktasına ait her görüntüde 2 adet olmak üzere $x$ ve $y$ görüntü koordinatları ve ilave olarak levha konumları arası ofset mesafesinden oluşan gözlem (ölçüm) sayısı |
| $u$    | Tablo 5.4’de verilen 10 adet bilinmeyen iç yöneltme parametresi ve her görüntü için 6 adet dış yöneltme parametresi  |
| $s$    | Dengelemenin serbestlik derecesi $(n - u)$   |

$n > u$  olmak şartıyla Tablo 5.5’de karakteristiği verilen EKK dengelemesi ile  $u$  adet bilinmeyen,  $n$  adet ölçüm ile  $s$  serbestlik derecesinde çözülmektedir. Eş-doğrusallık (kolinearite) denklemlerinin düzeltilmiş görüntü koordinatları cinsinden yazılan (5.18) ve (5.19) numaralı eşitlikleri kullanılan matematiksel modelin esasını teşkil etmektedir. Bu durumda;

$$Z_x = r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0) \quad (5.15)$$

$$Z_y = r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0) \quad (5.16)$$

$$N = r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0) \quad (5.17)$$

Olmak üzere, distorsiyonsuz ve asal nokta kayıklığı giderilmiş görüntü koordinatlarını ifade eden  $\ddot{x}$  ve  $\ddot{y}$  cinsinden kolinearite eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılabilmektedir;

$$\ddot{x} = -c \frac{Z_x}{N} \quad (5.18)$$

$$\ddot{y} = -c \frac{Z_y}{N} \quad (5.19)$$

Ölçülen ham görüntü koordinatları  $x$  ve  $y$ , asal noktanın görüntü koordinat sistemindeki konumu  $x_0$  ve  $y_0$  ve yalnızca asal nokta kayıklığı ötelenmiş görüntü koordinatları  $\tilde{x}$  ve  $\tilde{y}$  olmak üzere distorsiyon eşitlikleri yazılacak olursa;

- (5.20) ve (5.21) numaralı eşitlikler çapsal distorsiyon etkisini,
- (5.22) ve (5.23) numaralı eşitlikler teğetsel distorsiyon etkisini,
- (5.24) numaralı eşitlik diferansiyel ölçek distorsiyonu etkisini ifade etmektedir.

$\tilde{x} = x - x_0$  ,  $\tilde{y} = y - y_0$  ve  $r = \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2}$  olmak üzere;

$$\delta x_1 = \tilde{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (5.20)$$

$$\delta y_1 = \tilde{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (5.21)$$

$$\delta x_2 = p_1(r^2 + 2\tilde{x}^2) + 2p_2\tilde{x}\tilde{y} \quad (5.22)$$

$$\delta y_2 = p_2(r^2 + 2\tilde{y}^2) + 2p_1\tilde{x}\tilde{y} \quad (5.23)$$

$$\delta x_3 = b_1\tilde{x} + b_2\tilde{y} \quad (5.24)$$

Bu durumda; asal nokta kayıklığı ve bütün distorsiyon düzeltmeleri eklenmiş görüntü koordinatları aşağıdaki (5.25) ve (5.26) numaralı eşitliklerdeki gibi açılabilir.

$$\ddot{x} = \tilde{x} + \delta x_1 + \delta x_2 + \delta x_3 \quad (5.25)$$

$$\ddot{y} = \tilde{y} + \delta y_1 + \delta y_2 \quad (5.26)$$

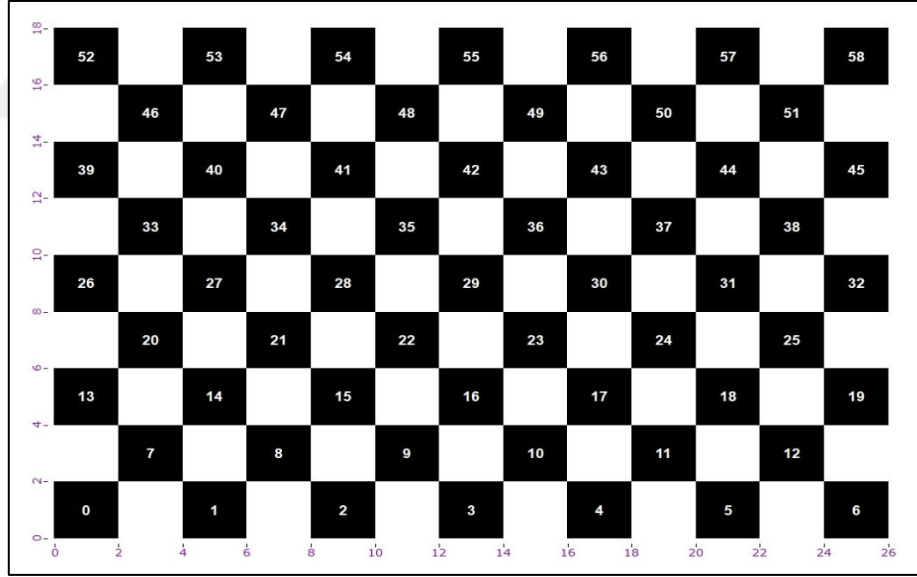
Son olarak; bütün parametreleri ve bilinmeyenleri içerecek şekilde eş-doğrusallık ve aynı zamanda gözlem denklemleri, ölçülen (ham) görüntü koordinatları cinsinden (5.27) ve (5.28) numaralı eşitliklerdeki gibi yeniden yazabilmektedir.

$$x = x_0 - c \frac{Z_x}{N} - \delta x_1 - \delta x_2 - \delta x_3 \quad (5.27)$$

$$y = y_0 - c \frac{Z_y}{N} - \delta y_1 - \delta y_2 \quad (5.28)$$

$$Ofset = \sqrt{(X_{01} - X_{02})^2 + (Y_{01} - Y_{02})^2 + (Z_{01} - Z_{02})^2} \quad (5.29)$$

Yukarıda detaylı olarak anlatılan matematiksel model kullanılarak Şekil 5.49'da gösterilen kalibrasyon levhasının farklı mesafelerden çekilen görüntülerinden okunan ve (5.27) ile (5.28) numaralı eşitliklerle ifade edilen ham görüntü koordinat ölçümlerine (gözlemlerine) ilave olarak (5.29) numaralı eşitlikle verilen levha konumları arası ofset mesafesinden oluşan koşul gözlemi EKK yöntemiyle dolaylı model dengelemesine sokularak kamera iç yönelme parametreleri hesaplanmaktadır.



Şekil 5.49. Kalibrasyon levhası

Kamera kalibrasyonunda her bir kamera ayrı olarak değerlendirilmekte ve dolayısıyla mono görüntüler kullanılmaktadır. Şekil 5.50'de verilen kodlama ile gözlem (ölçüm) denklemlerinin bilinmeyenlere göre türevleri alınarak Taylor serilerine açılmak suretiyle katsayılar (dizayn) matrisi her iterasyon için dinamik olarak oluşturulmakta ve dengeleme için belirlenen yakınsama ve doğruluk kriterleri sağlanana kadar Şekil 5.51'de gösterildiği şekilde iteratif olarak çözülmektedir.

```

// Even-order polynomial Model
// Bilinmeyenlerin yaklaşık değerleri ile hesaplanan F0'lar
F0[(i * 2) + 0, 0] = H1x0 - ((c1 * Zxi) / (Ni * RDix));
F0[(i * 2) + 1, 0] = H1y0 - ((c1 * Zyi) / (Ni * RDiy));

// Even-order polynomial Model için A Matrisi
// A matrisinin a ve b katsayılarıyla doldurulması.
// Bir referans noktasının x kolinearite denkleminin 22 bilinmeyene göre türevi
A[(i * 2) + 0, 0] = -(c1 / (RDix * Math.Pow(Ni, 2))) * ((R1[0, 2] * Zxi) - (R1[0, 0] * Ni)); //dx/dx01
A[(i * 2) + 0, 1] = -(c1 / (RDix * Math.Pow(Ni, 2))) * ((R1[1, 2] * Zxi) - (R1[1, 0] * Ni)); //dx/dy01
A[(i * 2) + 0, 2] = -(c1 / (RDix * Math.Pow(Ni, 2))) * ((R1[2, 2] * Zxi) - (R1[2, 0] * Ni)); //dx/dz01
A[(i * 2) + 0, 3] = -(c1 / (RDix * Ni)) * (((DYi * R1[2, 2] - DZi * R1[1, 2]) * (Zxi / Ni)) - (DYi * R1[2, 0] +
+ (DZi * R1[1, 0])); //dx/domega1
A[(i * 2) + 0, 4] = (c1 / (RDix * Ni)) * (((Zxi * Math.Cos(kappa1)) - (Zyi * Math.Sin(kappa1))) * (Zxi / Ni))
+ (Ni * Math.Cos(kappa1))); //dx/dphi1
A[(i * 2) + 0, 5] = -(c1 / RDix) * (Zyi / Ni); //dx/dkappa1
A[(i * 2) + 0, 6] = -Zxi / (Ni * RDix); //dx/dc

A[(i * 2) + 0, 7] = 1 + (c1 * Zxi / Ni) * (((-4 * kam1_k2 * Math.Pow(ri, 2) * x_x0)
- (6 * kam1_k3 * Math.Pow(ri, 4) * x_x0)
- (2 * kam1_k1 * x_x0)
- (2 * kam1_p1) + (kam1_p1 * Math.Pow(ri, 2) / Math.Pow(x_x0, 2)) - (2 * kam1_p1)
+ (kam1_b2 * y_y0 / Math.Pow(x_x0, 2))) / Math.Pow(RDix, 2)); //dx/dx0

A[(i * 2) + 0, 8] = 0 + (c1 * Zxi / Ni) * (((-4 * kam1_k2 * Math.Pow(ri, 2) * y_y0)
- (6 * kam1_k3 * Math.Pow(ri, 4) * y_y0)
- (2 * kam1_k1 * y_y0)
- (2 * kam1_p1 * y_y0 / x_x0) - (2 * kam1_p2)
- (kam1_b2 / x_x0)) / Math.Pow(RDix, 2)); //dx/dy0

A[(i * 2) + 0, 9] = (c1 * Zxi / Ni) * (Math.Pow(ri, 2) / Math.Pow(RDix, 2)); //dx/dk1
A[(i * 2) + 0, 10] = (c1 * Zxi / Ni) * (Math.Pow(ri, 4) / Math.Pow(RDix, 2)); //dx/dk2
A[(i * 2) + 0, 11] = (c1 * Zxi / Ni) * (Math.Pow(ri, 6) / Math.Pow(RDix, 2)); //dx/dk3
A[(i * 2) + 0, 12] = 0; //dx/dx02
A[(i * 2) + 0, 13] = 0; //dx/dy02
A[(i * 2) + 0, 14] = 0; //dx/dz02
A[(i * 2) + 0, 15] = 0; //dx/domega2
A[(i * 2) + 0, 16] = 0; //dx/dphi2
A[(i * 2) + 0, 17] = 0; //dx/dkappa2
A[(i * 2) + 0, 18] = (c1 * Zxi / Ni) * (((Math.Pow(ri, 2) / x_x0) + (2 * x_x0)) / Math.Pow(RDix, 2)); //dx/dp1
A[(i * 2) + 0, 19] = (c1 * Zxi / Ni) * ((2 * y_y0) / Math.Pow(RDix, 2)); //dx/dp2
A[(i * 2) + 0, 20] = (c1 * Zxi / Ni) * (1 / Math.Pow(RDix, 2)); //dx/db1
A[(i * 2) + 0, 21] = (c1 * Zxi / Ni) * ((y_y0 / x_x0) / Math.Pow(RDix, 2)); //dx/db2

```

Şekil 5.50. Kamera kalibrasyonu için dizayn matrisinin oluşturulması

```

// KAPANMA MATRİSİ
W = F0 - l0;

// A matrisinin transpozu
for (int k = 0; k < u; k++)
{
    for (int i = 0; i < n; i++)
    {
        AT[k, i] = A[i, k];
    }
}

N = AT * Cr.Invert() * A;
dkap = -N.Invert() * AT * Cr.Invert() * W;
Xkap = Xkap + dkap;
rkap = A * dkap + W;
lkap = l0 + rkap;

// rkap Matrisinin Transpozu
for (int i = 0; i < n; i++)
{
    rkapT[0, i] = rkap[i, 0];
}

// Sonsal (Aposteriori) varyansın hesaplanması (Genel)
Matrix Sigma0_cap_square_pay = new Matrix(1, 1);
Sigma0_cap_square_pay = rkapT * Cr.Invert() * rkap;
Sigma0_cap_square = Convert.ToDouble(Sigma0_cap_square_pay[0, 0]) / (n - u);

// İTERASYON SONUCUNUN
// BİLİNMEYENLERE ATANMASI
X01 = Xkap[0, 0];
Y01 = Xkap[1, 0];
Z01 = Xkap[2, 0];
omega1 = Xkap[3, 0];
phi1 = Xkap[4, 0];
kappa1 = Xkap[5, 0];
c1 = Xkap[6, 0];
H1x0 = Xkap[7, 0];
H1y0 = Xkap[8, 0];
kam1_k1 = Xkap[9, 0];
kam1_k2 = Xkap[10, 0];
kam1_k3 = Xkap[11, 0];
X02 = Xkap[12, 0];
Y02 = Xkap[13, 0];
Z02 = Xkap[14, 0];
omega2 = Xkap[15, 0];
phi2 = Xkap[16, 0];
kappa2 = Xkap[17, 0];
kam1_p1 = Xkap[18, 0];
kam1_p2 = Xkap[19, 0];
kam1_b1 = Xkap[20, 0];
kam1_b2 = Xkap[21, 0];

```

Şekil 5.51. Kamera kalibrasyonu EKK dengelemesi için kodlama

Yapılan dengelemelere ilişkin detaylı bilgiler, iterasyon girdi/çıktıları ve dengeleme sonucunda hesaplanan bilinmeyenler sonuç dosyasına yazdırılarak sonradan irdelenme imkânı sağlanmıştır. Birçok detaylı bilgi ve parametre içermesi sebebiyle 1000 satıra kadar ulaşan dengeleme sonuç dosyanın ana girdi ve çıktıları gösteren ilk bölümü Şekil 5.52’de sunulmuştur.

```

-----KALİBRASYON DENGELEMESİ SONUÇ DOSYASI-----
Tarih-Saat (Lokal) : 11.02.2021 02:27:23

DENGELEME ÖZETİ
-----
Kamera Seri No.      : V120_Duo_Sol
Referans Nokta Sayısı : 88 + 96
Ölçü Sayısı        : 368 + 1
Bilinmeyen Sayısı   : 22
Ref. Arası Ofset (m.) : 0,9585
Ref.Ar.Ofs.Std.Hata (m.): 0,0001
Varyans Matrisi Tipi : Kovaryans (Cr) Matrisi
Matris Ölçeklendirme : Her iterasyonda
Distorsiyon Modeli   : Even-Order Polynomial Model
Yakınsama Kont. Yöntemi : Dkap minimum
Loop (Tur) Sayısı    : 20
Loop iterasyon Sayısı : 1
Dengeleme Hassasiyeti : virgülden sonra 20.haneye kadar (Yakınsama kontrolü için).
Yakınsama Sağlandı mı? : False
1.Resim Koord.Std.Hata : x-yönünde = 2 Piksel, y-yönünde = 2 Piksel
2.Resim Koord.Std.Hata : x-yönünde = 1 Piksel, y-yönünde = 1 Piksel
Toplam İterasyon Sayısı : 20
Dengeleme Süresi (ms.) : 171054,496
Sonsal (Ap.) Varyans   : 0,75717
-----

HESAPLANAN DIŞ YÖNELTME PARAMETRELERİ (1.Görüntü)
-----
Xo (m.)      : 0,14363 ± 3,02341068892518E-16
Yo (m.)      : 0,15886 ± 3,54413007978539E-16
Zo (m.)      : 0,19415 ± 2,38779329127907E-17
Omega (rad.) : -0,09089 ± 1,7227845226348E-16
Phi (rad.)   : 0,01535 ± 2,38271130102034E-16
Kappa (rad.) : 0,02367 ± 4,27323134130264E-17
-----

HESAPLANAN DIŞ YÖNELTME PARAMETRELERİ (2.Görüntü)
-----
Xo (m.)      : 0,07760 ± 1,5624909080752E-15
Yo (m.)      : 0,15950 ± 1,77896935978314E-15
Zo (m.)      : 1,15037 ± 8,48735873257334E-17
Omega (rad.) : -0,10198 ± 1,18064909070801E-15
Phi (rad.)   : -0,03733 ± 8,52527931984601E-16
Kappa (rad.) : 0,01768 ± 9,93106939879083E-17
-----

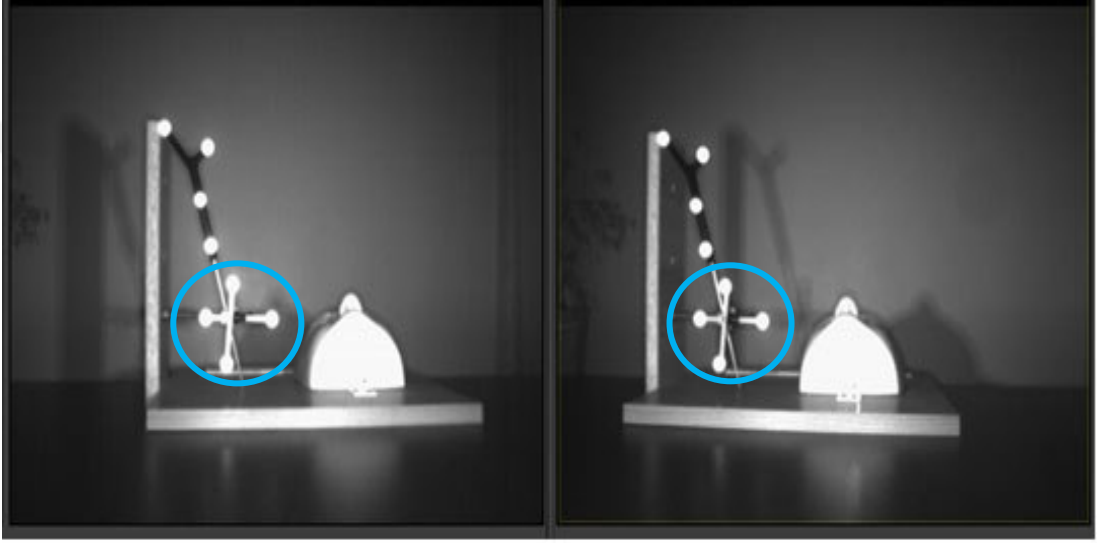
DENGELENMİŞ (KALİBRE EDİLMİŞ) İÇ YÖNELTME PARAMETRELERİ
-----
Kalibre Edilmiş Odak Uzaklığı --- c (mm.) : 3,5589783235 ± 1,16535838855446E-15
Asal Noktanın konumu ---- x yönünde (mm.) : -0,0636891223 ± 5,50532834216875E-15
Asal Noktanın konumu ---- y yönünde (mm.) : -0,0604875806 ± 6,38532675094304E-15
Çapsal Distorsiyon Parametresi ----- k1 : 9473,41580054285 ± 1,62416724836794E-10
Çapsal Distorsiyon Parametresi ----- k2 : -734360389,205371 ± 6,24115098531313E-05
Çapsal Distorsiyon Parametresi ----- k3 : 33524967465838,5 ± 7,2798238009703
Teğetsel Distorsiyon Parametresi ----- p1 : -0,677058839878403 ± 3,99225825827319E-14
Teğetsel Distorsiyon Parametresi ----- p2 : 0,0741961860381657 ± 4,31474005038185E-14
Dif.Ölçek Distorsiyon Parametresi ---- b1 : -0,000259079908325718 ± 1,71735413559649E-16
Dif.Ölçek Distorsiyon Parametresi ---- b2 : 0,000558694307845969 ± 1,56390578739708E-16
-----

```

Şekil 5.52. Kamera kalibrasyon dengelemesi örnek sonuç dosyası

#### 5.4. Stereo Kamera Baz Kalibrasyonu

Her ne kadar anlık olarak hesaplanan sağ ve sol kamera dış yöneltme parametrelerinden stereo kamera bazı hesaplanabilse de, gerçek zamanlı ölçümler esnasında referans yüzeyin her iki görüntü düzlemi üzerinde Şekil 5.53’de görüldüğü üzere küçük bir bölgeye izdüşümünden kaynaklı konumlama (referanslama) hatasını minimize etmek amacıyla stereo kamera bazının kalibrasyon dengelemesi ile önceden belirlenerek gerçek zamanlı (anlık) ölçümlere şart gözlemi olarak dâhil edilmesi konum hassasiyetine olumlu yönde katkı sağlamaktadır.



Şekil 5.53. Ölçümler esnasında referans yüzey ve sondanın görünümü

Bu baz kalibrasyonu dengelemesi; kalibrasyon levhasının her iki kamera görüntüsü üzerine maksimum yayılacak şekilde stereo görüntüleri alındıktan sonra levha üzerinde bulunan kesişim noktalarına ait  $x$  ve  $y$  görüntü koordinatları ve bu kesişim noktalarının bilinen obje uzay koordinatları yardımıyla, her görüntü için 6 adet olmak üzere, stereo çift için toplam 12 adet dış yöneltme parametresinin EKK dolaylı model dengelemesi yardımıyla iteratif olarak optimize edilmesi esasına dayanmaktadır. Stereo baz dengelemesi öncesinde kameraların fotogrametrik kalibrasyonlarının yapılarak iç yöneltme parametrelerinin yüksek doğruluklarla belirlenmesi gerekmektedir. Böylelikle; dengelemeye sokulan her bir  $x$  ve  $y$  gözlemi (görüntü koordinatı) için gerekli distorsiyon ve asal nokta kayıklığı düzeltmeleri en baştan uygulanmakta ve kalibre edilmiş odak uzaklığı da dikkate alındığında uzayın merkezi izdüşümü olması gerekene en yakın haliyle ifade edilerek işlemlere başlanmaktadır.

Baz kalibrasyonunda önemli olan nokta; ilave olarak belirlenmek istenen stereo kamera bazının aslında bir bilinmeyen değil bilinmeyenler yardımıyla optimize edilen ilave bir değer olmasıdır. Dengeleme öncesinde; dengelemeye gözlem olarak alınan görüntü koordinatları kameraların önceden kalibre edilmiş iç yöneltme parametreleri yardımıyla aşağıdaki (5.30) ve (5.31) eşitliklerinde gösterildiği gibi düzeltilmektedir.

$$\ddot{x} = \tilde{x} + \delta x_1 + \delta x_2 + \delta x_3 \quad (5.30)$$

$$\ddot{y} = \tilde{y} + \delta y_1 + \delta y_2 \quad (5.31)$$

Daha sonra; Tablo 5.6’da karakteristiği verilen EKK dengelemesi ile,  $u$  adet bilinmeyen,  $n$  adet ölçüm ile  $s$  serbestlik derecesinde çözülmektedir. Burada eş-doğrusallık (kolinearite) denklemlerinin düzeltilmiş görüntü koordinatları cinsinden yazılan (5.35) ve (5.36) numaralı eşitlikleri kullanılan matematiksel modelin esasını teşkil etmektedir.

Tablo 5.6. Baz kalibrasyonu için yapılan EKK dengeleme karakteristiği

| Sembol | Açıklama  |
|--------|---|
| $n$    | Kalibrasyon levhası üzerindeki her kesişim noktasına ait her görüntüde 2 adet olmak üzere $\ddot{x}$ ve $\ddot{y}$ düzeltilmiş görüntü koordinatlarından oluşan gözlem (ölçüm) sayısı |
| $u$    | Her görüntü için 6 adet olmak üzere, stereo çift için toplam $6 \times 2 = 12$ adet bilinmeyen dış yöneltme parametresi   |
| $s$    | Dengelemenin serbestlik derecesi ( $n - u$ )  |

Eş-doğrusallık (kolinearite) denklemlerini yeniden ifade edecek olursak;

$$Z_x = r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0) \quad (5.32)$$

$$Z_y = r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0) \quad (5.33)$$

$$N = r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0) \quad (5.34)$$

Olmak üzere, distorsiyonsuz ve asal nokta kayıklığı giderilmiş görüntü koordinatlarını ifade eden  $\ddot{x}$  ve  $\ddot{y}$  cinsinden kolinearite eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılabilmektedir;

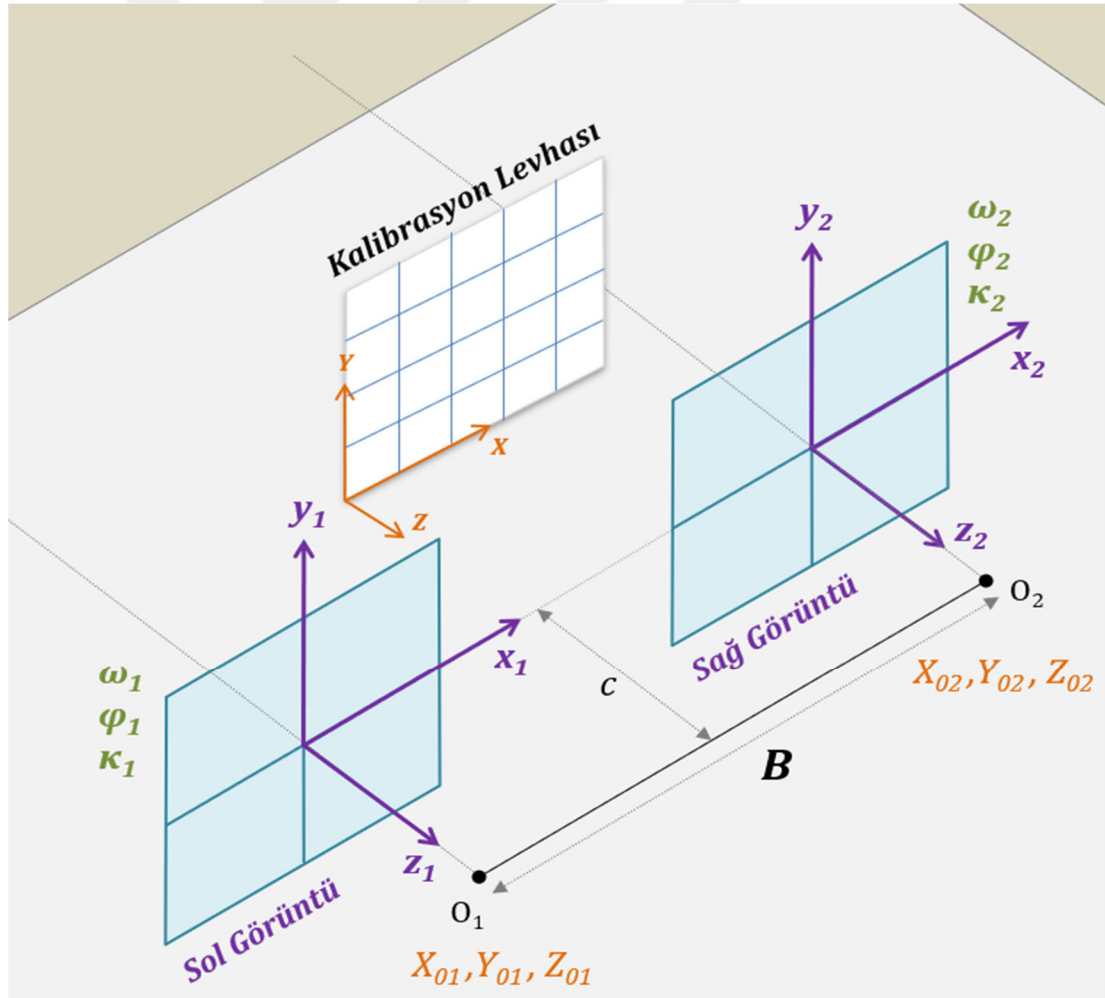
$$\ddot{x} = -c \frac{Z_x}{N} \quad (5.35)$$

$$\ddot{y} = -c \frac{Z_y}{N} \quad (5.36)$$

Sonuç olarak; Şekil 5.54’de görüldüğü üzere sol kameraya ait  $(X_{01}, Y_{01}, Z_{01})$  ve sağ kameraya ait  $(X_{02}, Y_{02}, Z_{02})$  olmak üzere, dengeleme neticesinde elde edilen her iki kameraya ait dış yöneltme parametreleri kullanılarak aşağıdaki (5.37) eşitliği yardımıyla sabit olan stereo kamera bazı hesaplanabilmektedir.

$$B = \sqrt{(X_{01} - X_{02})^2 + (Y_{01} - Y_{02})^2 + (Z_{01} - Z_{02})^2} \quad (5.37)$$

Kalibre edilen söz konusu stereo kamera bazı, ilgili stereo kamera tanıtım dosyasında gereken yere yazılarak gerçek zamanlı ölçümler esnasında iyileştirme gözlemi olarak döngüye dâhil edilebilmektedir. Stereo kamera bazının sabit şart gözlemi olarak işleme alınması hususu, gerçek zamanlı ölçüm doğruluklarına getirdiği iyileştirmeleri inceleyebilmek maksadıyla ana modül üzerinden isteğe bağlı olarak seçilebilecek şekilde ve opsiyonel formda tasarlanmıştır.



Şekil 5.54. Stereo kamera bazının kalibrasyon tekniği

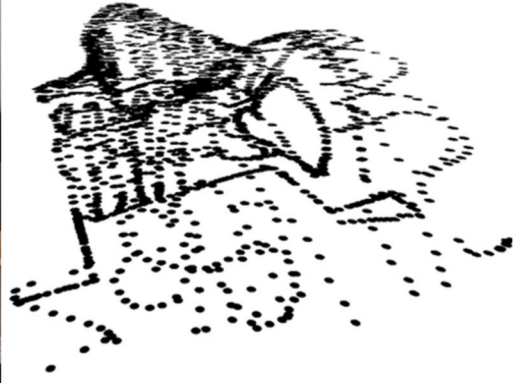
## 5.5. Sonda ile Gerçek Zamanlı Ölçüm ve Yüzey Toplama Testleri

Sistemin gerçek zamanlı ölçüm döngüsünü, bilgisayara getirdiği işlemci ve bellek yükünü ve genel olarak çalışmasını test etmek amacıyla obje uzayında sabitlenen farklı nesnelere üzerinde sondayı gezdirmek suretiyle birtakım yüzey toplama testleri yapılmıştır. Bu testler esnasında, ölçüm ortamında oluşabilecek çeşitli senaryolar da denenerek sistemin olası açıkları tespit edilmiş ve gereken yazılımsal ve donanımsal düzeltmeler yapılmıştır.

Yapılan testler neticesinde; gerçek zamanlı ölçümler esnasında hataya veya sistemin kilitlenmesine sebep olabilecek aşağıdaki özel durumlar tespit edilerek gerekli iyileştirmeler yapılmıştır;

- Kullanılan donanımın (referans yüzey, kamera, sonda vb.) yanlış tanıtılması durumunda ölçüm hatalarının interaktif olarak gösterilerek kullanıcının uyarılması,
- Gerçek zamanlı sürekli ölçüm döngüsü içerisinde oluşabilen tutarsız hesaplama veya iraksama gibi durumların (kısır döngülerin) tespit edilerek sistemin kilitlenmesinin engellenmesi,
- Gümüş toplar haricinde istenmeyen obje yansımalarının geometrik olarak tespiti ve filtrelenmesi,
- Gümüş toplara ait eksik yansımalar olması durumunda ekranda görsel olarak uyarıların verilmesi,
- Yazılıma eklenen arka plan yürütücüsü (backgroundworker) işlevi sayesinde çakışma olmadan aynı anda birden fazla modülün çalışabilme imkânı,
- Yapılan detaylı işlemlere ait (sonda ucu eksenleme vb.) ön bilgi ve uyarıların eklenmesi

Yapılan son iyileştirmeler neticesinde; 3 saat kesintisiz stereo ölçüm ve 30 dk. yüzey toplama gibi uzun süreli işlemlerin denemeleri yapılarak sistemin genel olarak işlemci ve bellek yükü irdelenmiş ve ileri düzey sistem gereksinimlerine ihtiyaç duyulmadığı tespit edilmiştir. Yüzey toplama testleri sonucunda elde edilen nokta bulutlarından bazıları örnek olarak Şekil 5.55 ve Şekil 5.56'da sunulmuştur.



Şekil 5.55. Kafa modeli ve sonda ile toplanan 3B yüzey



Şekil 5.56. Örnek bir biblo ve sonda ile toplanan 3B yüzey

## 6. BULGULAR

Yersel fotogrametrik ve optik temeller üzerine kurulu ve bu yöntemler üzerinde çalışan bir cerrahi ölçüm sisteminin çıktılarında aranan en önemli şey konum doğruluğudur. Öyle ki; sistemin sorunsuz çalışıp belirli fonksiyonları icra etmesinden daha önemlisi, yüksek doğruluklu ve tutarlı ölçümler ve sonuçlar sunmasıdır. Gerekli bütün donanım ve yazılım gereksinimleri tamamlanarak sistem çalışır hâle getirildikten sonra sistemin gerçek zamanlı ölçüm doğrulukları ve bu doğrulukları etkileyen faktörlerin ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda yapılan doğruluk araştırmaları neticesinde elde edilen bulgular;

- Sistem Doğruluğunu Etkileyen Faktörler
- Gerçek Zamanlı Stereo Ölçüm Doğrulukları

Olmak üzere iki ana başlık altında detaylı olarak sunulmuştur. Söz konusu doğruluk araştırmalarında elde edilen sonuç ve bulgular tamamen bu doktora çalışmasında hayata geçirilen sistemin yazılım ve donanımları ile elde edilmiştir.

### 6.1. Sistem Doğruluğunu Etkileyen Faktörler

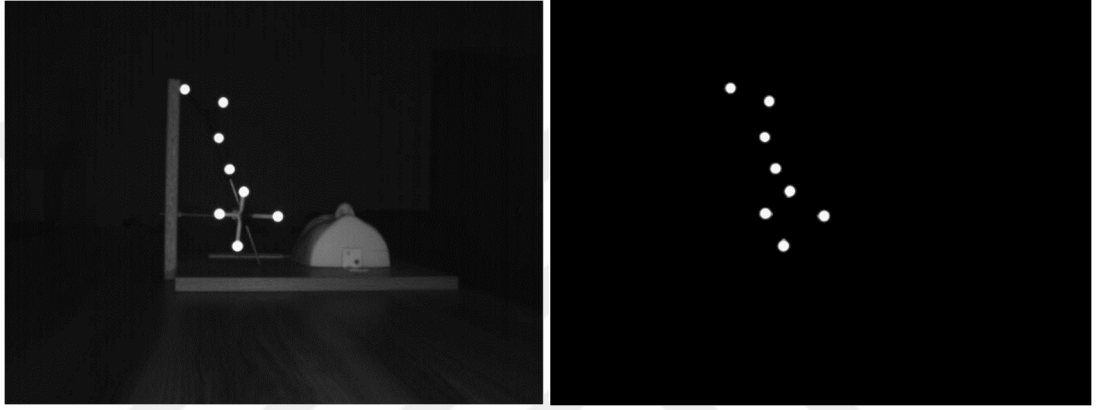
Belirli ölçüm fonksiyonlarını icra eden sistemin baştan sona çalışması esnasında hem donanım hem de yazılım olarak birçok alt bileşen eş zamanlı ve bütünleşik olarak obje uzayında konum bilgisi üretmektedirler. Her bir bileşene ait geometrik, fiziksel ve yazılımsal parametreler, ortaya çıkan bu nihai sonucun yani 3B konum bilgisinin doğruluğunu etkilemektedir. Bu kapsamda;

- Otomatik Obje Tespit Doğrulukları,
- Kamera Odak Uzaklığının Doğruluklara Etkisi
- Kamera Kalibrasyonunun Doğruluklara Etkisi,
- Stereo Kamera Baz Kalibrasyonunun Doğruluklara Etkisi,
- Referans Yüzeyin Boyut ve Geometrisinin Doğruluklara Etkisi,
- Sonda Geometrisinin Doğruluklara Etkisi,

Araştırılarak ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Elde edilen sonuç verilerinden hacimli olanlar bu tezin eklerinde sunulmuştur.

### 6.1.1. Otomatik Obje Tespit Doğrulukları

Video Görüntülerden Otomatik Obje Tespit Yazılımı'nın gerçek zamanlı (anlık) ve zamansal olarak senkronize bir halde gümüş topların stereo görüntü koordinatlarını nasıl tespit ettiği bu tezin uygulama bölümünde detaylı olarak anlatılmaktadır. Söz konusu eş-zamanlı tespit için çalışan algoritmaların doğruluğunu test etmek amacıyla birtakım testler yapılmıştır. Zira görüntü koordinatlarında oluşabilecek çok küçük hatalar 3B konum doğruluğunda ciddi hatalara sebebiyet vermektedir.



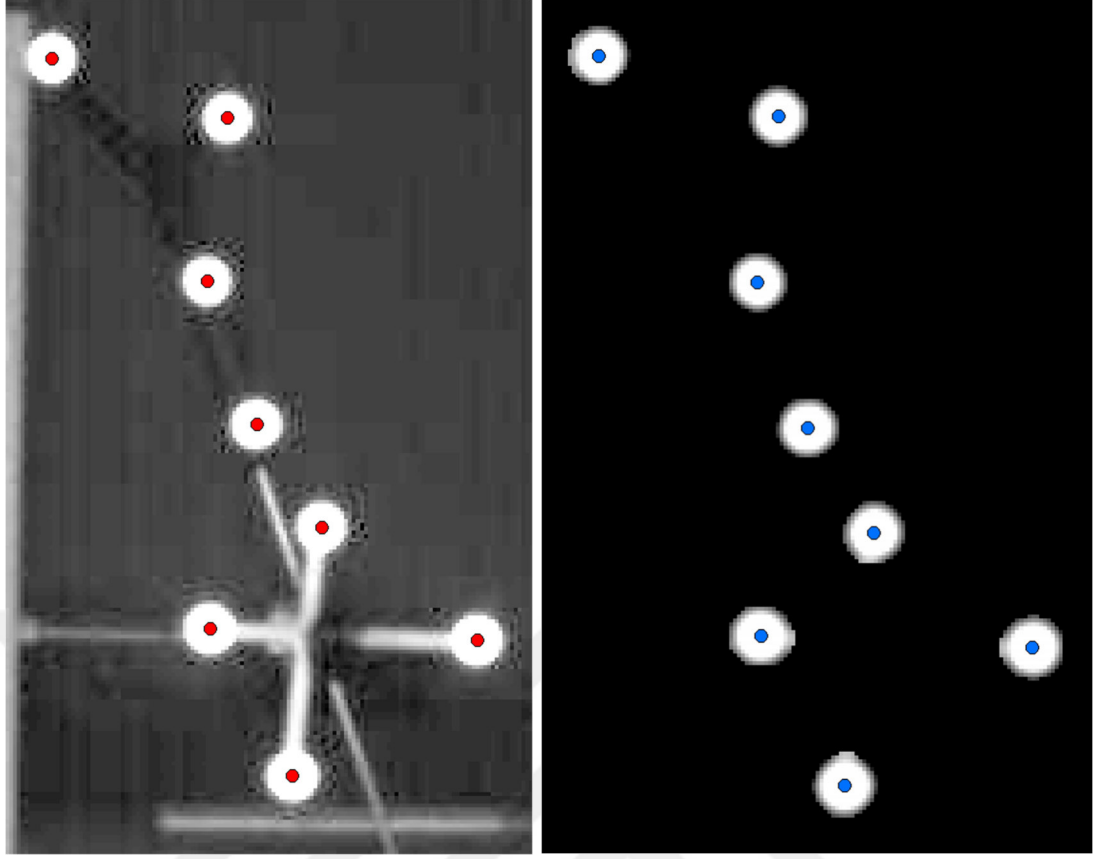
(a) 75 cm



(b) 1,5 m

Şekil 6.1. Farklı mesafelerden çekilen gri tonlu ve IR görüntüler

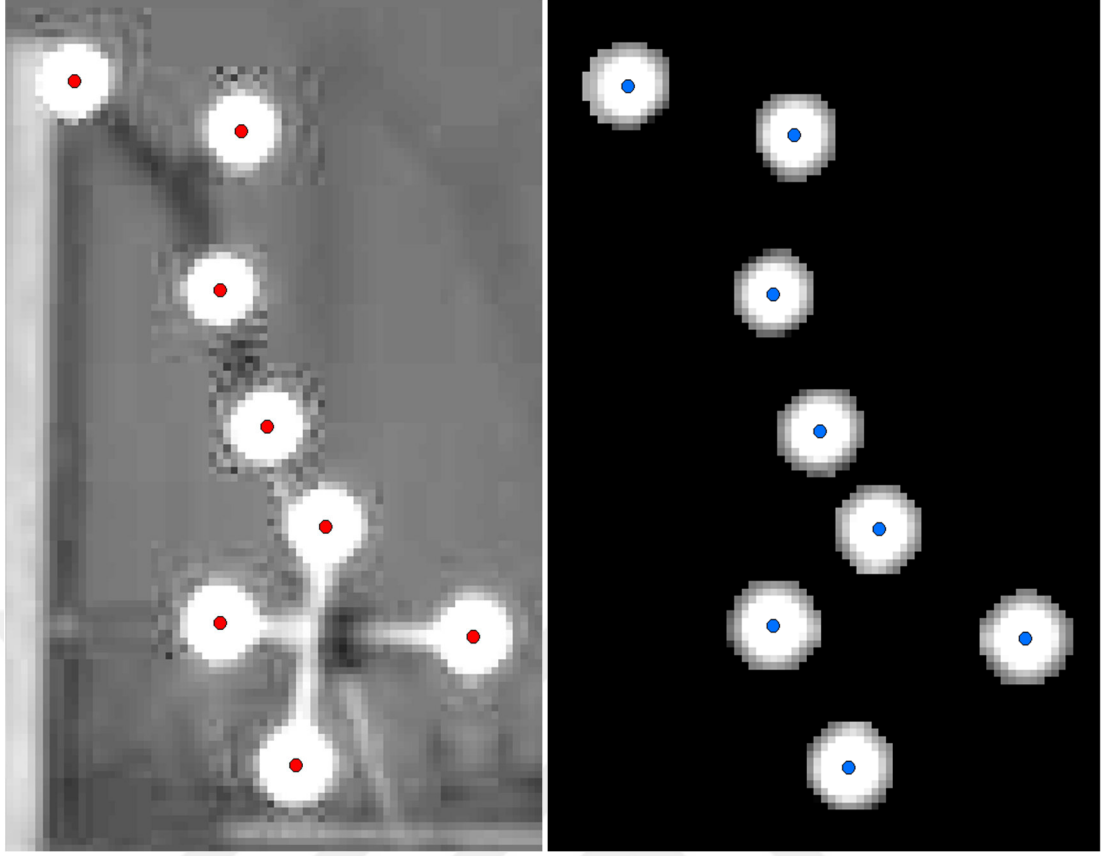
Bu kapsamda; 3,5 mm odak uzaklıklı OptiTrack kamera kullanılarak Şekil 6.1'de gösterilen farklı iki mesafede sabitlenen referans yüzey ve sondanın otomatik tespit ile elde edilen görüntü koordinatları ile aynı zamanlara ait Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'de gösterilen görüntüleri üzerinden manuel olarak okunan görüntü koordinatları karşılaştırılarak  $x$  ve  $y$  yönündeki farklar, ortalamalar ve bunlara bağlı olarak ortalama konumlama hataları Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de sunulmuştur.



Şekil 6.2. Görüntüleme mesafesi 75 cm için manuel ve otomatik okumalar

Tablo 6.1. Görüntüleme mesafesi 75 cm olan görüntüler için elde edilen sonuçlar

| Nokta No                              | Görüntü Koordinatları (piksel) |          |               |          | Farklar       |               |
|---------------------------------------|--------------------------------|----------|---------------|----------|---------------|---------------|
|                                       | Otomatik okunan                |          | Manuel okunan |          |               |               |
|                                       | $x$                            | $y$      | $x$           | $y$      | $\Delta x$    | $\Delta y$    |
| 1                                     | 213,447                        | -105,106 | 213,481       | -105,012 | -0,034        | -0,094        |
| 2                                     | 259,144                        | -120,599 | 259,511       | -120,298 | -0,367        | -0,301        |
| 3                                     | 253,838                        | -162,864 | 254,115       | -162,730 | -0,277        | -0,134        |
| 4                                     | 266,643                        | -199,995 | 266,977       | -199,861 | -0,334        | -0,134        |
| 5                                     | 283,536                        | -226,806 | 283,766       | -226,476 | -0,230        | -0,330        |
| 6                                     | 254,713                        | -253,037 | 254,992       | -253,116 | -0,279        | 0,079         |
| 7                                     | 323,92                         | -256,013 | 324,264       | -255,805 | -0,344        | -0,208        |
| 8                                     | 276,035                        | -291,213 | 276,281       | -291,109 | -0,246        | -0,104        |
| <b>Ortalama Fark (piksel)</b>         |                                |          |               |          | <b>-0,264</b> | <b>-0,153</b> |
| <b>Ortalama Fark (mikron)</b>         |                                |          |               |          | <b>-1,584</b> | <b>-0,918</b> |
| <b>Ortalama Konumlama Hatası (mm)</b> |                                |          |               |          | <b>-0,339</b> | <b>-0,197</b> |



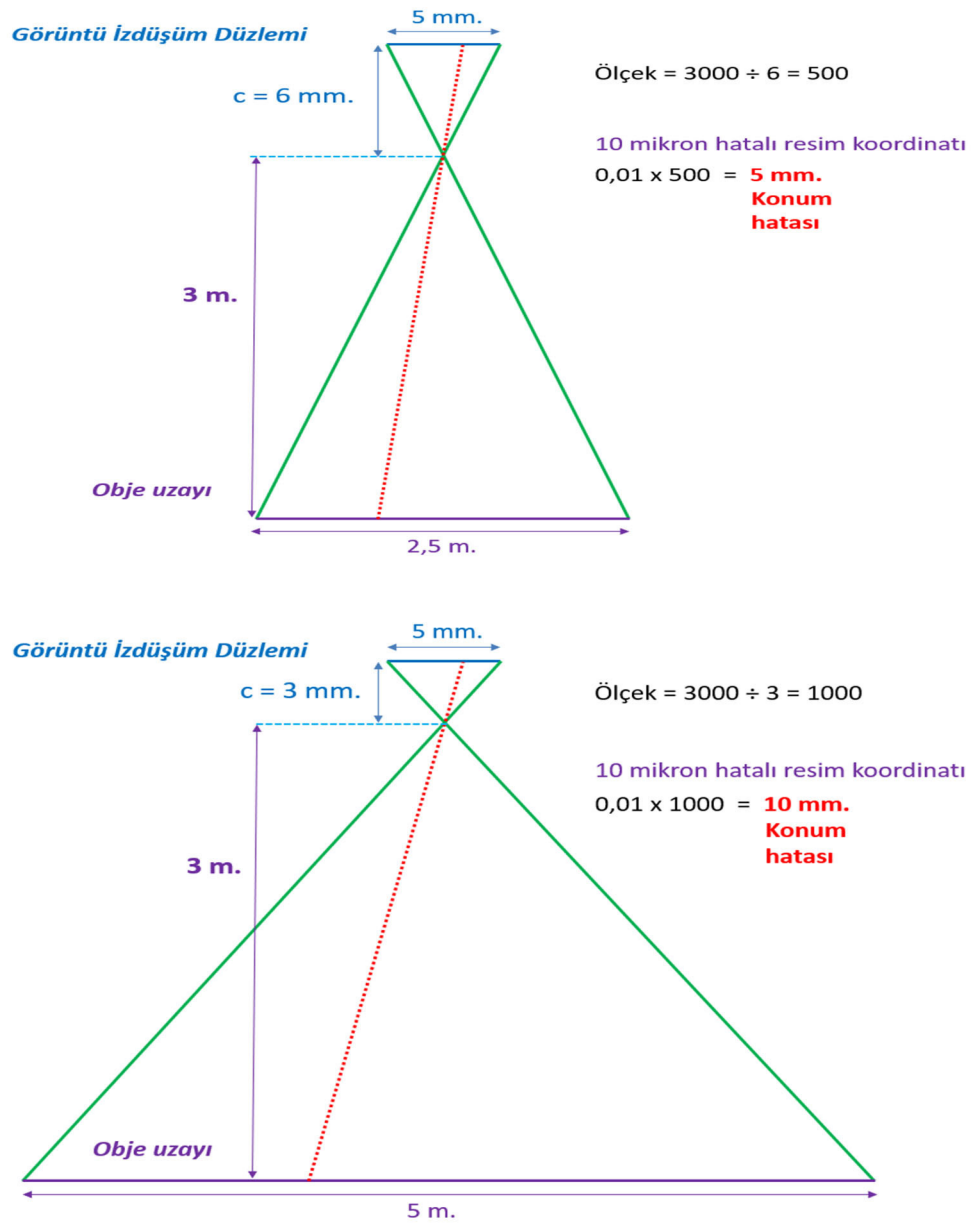
Şekil 6.3. Görüntüleme mesafesi 1,5 m için manuel ve otomatik okumalar

Tablo 6.2. Görüntüleme mesafesi 1,5 m olan görüntüler için elde edilen sonuçlar

| Nokta No                              | Görüntü Koordinatları (piksel) |          |               |          | Farklar       |              |
|---------------------------------------|--------------------------------|----------|---------------|----------|---------------|--------------|
|                                       | Otomatik okunan                |          | Manuel okunan |          |               |              |
|                                       | $x$                            | $y$      | $x$           | $y$      | $\Delta x$    | $\Delta y$   |
| 1                                     | 276,826                        | -177,508 | 276,9691      | -177,505 | -0,143        | -0,003       |
| 2                                     | 299,888                        | -184,164 | 300,0228      | -184,242 | -0,135        | 0,078        |
| 3                                     | 296,984                        | -205,698 | 297,1147      | -205,628 | -0,131        | -0,070       |
| 4                                     | 303,405                        | -224,183 | 303,5295      | -224,145 | -0,124        | -0,038       |
| 5                                     | 311,581                        | -237,502 | 311,5917      | -237,597 | -0,011        | 0,095        |
| 6                                     | 296,965                        | -250,629 | 297,1028      | -250,612 | -0,138        | -0,017       |
| 7                                     | 331,915                        | -252,311 | 332,0197      | -252,385 | -0,105        | 0,074        |
| 8                                     | 307,397                        | -269,755 | 307,5384      | -269,805 | -0,141        | 0,050        |
| <b>Ortalama Fark (piksel)</b>         |                                |          |               |          | <b>-0,116</b> | <b>0,021</b> |
| <b>Ortalama Fark (mikron)</b>         |                                |          |               |          | <b>-0,696</b> | <b>0,126</b> |
| <b>Ortalama Konumlama Hatası (mm)</b> |                                |          |               |          | <b>-0,298</b> | <b>0,054</b> |

### 6.1.2. Kamera Odak Uzaklığının Doğruluklara Etkisi

Aynı ölçüm mesafesinde, farklı odak uzaklıklı kameraların konum doğruluğuna etki eden hata miktarları farklı olmaktadır. Bunun ana nedeni ise temel olarak görüntüsü alınan yüzey ile izdüşüm yüzeyi arasındaki ölçek faktörüdür. Her ne kadar kamera kalibrasyonu ile iç yöneltme parametreleri elde edilmiş olsa da bu parametreler yardımıyla düzeltme getirilen görüntü koordinatlarındaki 1 birim hata her iki kamera ile elde edilen konumsal ölçümlerde farklı oranlarda konum hatasına sebebiyet vermektedir. Bu durum 6 mm ve 3 mm olmak üzere farklı odak uzaklıklı iki kamera için Şekil 6.4’de mono görüntüler üzerinden örnek olarak sunulmuştur.



Şekil 6.4. Görüntü koordinatlarındaki hatanın uzay koordinatlarına etkisi

### 6.1.3. Kamera Kalibrasyonunun Doğruluklara Etkisi

Uygulama bölümünde ayrıntılı olarak değinilen detaylı bilgiler ışığında, OptiTrack V120 Duo stereo kamera seti içerisinde bulunan sağ ve sol olmak üzere Tablo 6.3’de teknik özellikleri verilen her iki OptiTrack Slim3U kamera ile kalibrasyon levhasının 2 farklı mesafeden çekilen mono görüntüleri kullanılarak her kamera için ayrı olarak kalibrasyon dengelemeleri yapılmış ve dengeleme sonucunda elde edilen yeni iç yönelme parametreleri Tablo 6.4’de sunulmuştur.

Tablo 6.3. OptiTrack Slim3U kameranın teknik özellikleri

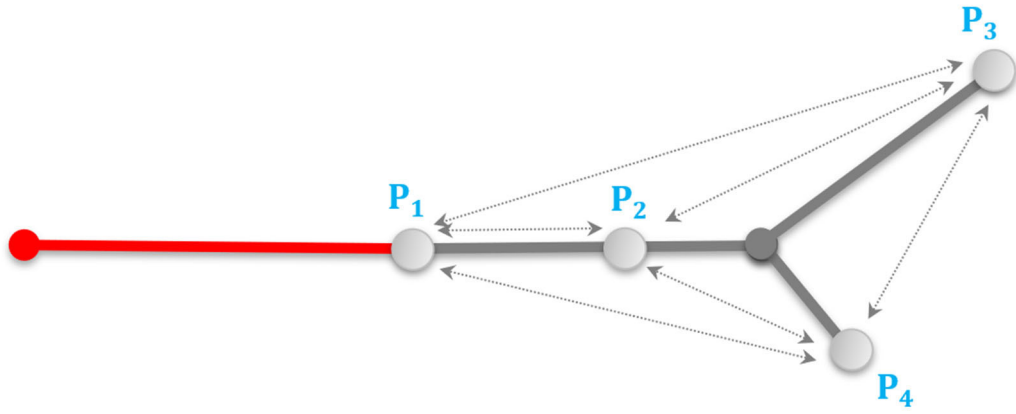
| Özellikler                             | Değerler          |
|--|-------------------|
| Odak Uzaklığı                          | 3,5 mm            |
| Görüntü Çözünürlüğü                    | 640 x 480         |
| Piksel Fiziksel Boyutu                 | 6 $\mu$ m         |
| Görüntüleyici Boyutu (İzdüşüm Düzlemi) | 3,84 mm x 2,88 mm |

Tablo 6.4. Kamera kalibrasyon sonuçları

| Parametre                            | Simge | Sol Kamera  | Sağ Kamera  |
|--------------------------------------|-------|-------------|-------------|
| Odak uzaklığı (mm)                   | $c$   | 3,562       | 3,571       |
| Asal noktanın konumu (mm)            | $x_0$ | -0,0621     | 0,0001      |
|                                      | $y_0$ | -0,0438     | -0,0825     |
| Çapsal distorsiyon katsayıları       | $k_1$ | 9,701 E-03  | 7,815 E-03  |
|                                      | $k_2$ | -7,341 E-04 | -5,439 E-05 |
|                                      | $k_3$ | 2,544 E-05  | -5,002 E-05 |
| Teğetsel distorsiyon katsayıları     | $p_1$ | -5,109 E-04 | -1,290 E-04 |
|                                      | $p_2$ | 1,618 E-04  | -7,585 E-06 |
| Diferansiyel ölçek dist. katsayıları | $b_1$ | 1,183 E-05  | 1,408 E-05  |
|                                      | $b_2$ | 1,027 E-06  | 9,421 E-06  |

Burada dikkat edilmesi gereken husus; ilave koşul olarak verilen son gözlem yani kalibrasyon levhasının her iki konumu arasındaki 3B vektörel mesafedeki bir birim ölçüm hatası odak uzaklığında ölçek oranında hataya sebep olmalıdır. Dolayısıyla, referans noktaların görüntülerde net olarak görünebileceği maksimum mesafeye kadar uzaklaşarak söz konusu ölçek mümkün olduğunca küçültülmüştür. Böylelikle, görüntü çekme noktaları arasındaki olası 3B vektörel mesafe hatasının odak uzaklığına etkisi minimize edilmiştir. Diğer bir yandan, kalibrasyon levhasının uzakta olan görüntünün de geneline yayılacak şekilde büyük olması hassasiyeti artırmaktadır. Burada ölçek; ( $\Delta h$  = her iki görüntü çekme noktası arasındaki 3B vektörel mesafe olmak üzere) basitçe  $c/\Delta h$  olarak alınabilmektedir.

Elde edilen yüksek doğruluklu iç yöneltme parametreleri kullanılarak hareketli sonda üzerinde anlık stereo ölçüm testleri yapılmıştır. Şekil 6.5’de görülen sonda üzerindeki gümüş topların gerçek zamanlı konumları ve birbirleri arasındaki çapraz mesafeleri fotogrametrik olarak hesaplanarak, önceden hassas olarak bilinen mesafelerle karşılaştırılmıştır. Sondanın ölçümler esnasında obje uzayında her zaman hareketli ve dolayısıyla da keyfi bir konumda bulunması sebebiyle testlerde çapraz mesafeler kullanılmıştır. Söz konusu testler, **Kamera Kalibrasyon Yazılımı** içerisinde bulunan stereo test özelliği kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 6.5. Sonda üzerinde irdelenen çapraz mesafeler

Farklı kalibrasyon ve parametrelerin konum doğrulukları üzerindeki etkisini görmek amacıyla aşağıdaki sıralanan kalibrasyon dengelemeleri ayrı ayrı yapılarak her birinden elde edilen parametreler yardımıyla fotogrametrik olarak çapraz mesafeler hesaplanmış ve fiziksel olarak yüksek doğrulukla önceden ölçülen mesafeler ile olan farkları hesaplanmıştır. Bu kapsamda;

- Kalibre edilmemiş varsayılan parametreler ile hesaplanan değerler Tablo 6.5’de,
- Sadece odak uzaklığı kalibrasyonunun etkisi Tablo 6.6’da,
- Odak uzaklığı + asal noktanın konumu + çapsal distorsiyon kalibrasyonunun etkisi Tablo 6.7’de,
- Odak uzaklığı + asal noktanın konumu + çapsal ve teğetsel distorsiyon kalibrasyonunun etkisi Tablo 6.8’de,
- Odak uzaklığı + asal noktanın konumu + çapsal, teğetsel ve diferansiyel ölçek distorsiyonu kalibrasyonunun etkisi Tablo 6.9’da sunulmuştur.

Tablo 6.5. Kamera kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi-1

| <b>ÇAPRAZ MESAFE</b> | <b>Fiziksel olarak yüksek doğrulukla önceden ölçülen mesafe (mm)</b> | <b>Kalibrasyonsuz kamera parametreleri kullanılarak hesaplanan mesafe (mm)</b> | <b>FARK (mm)</b> |
|----------------------|--|--|------------------|
| P1 - P2              | 50,00  | 49,04  | 0,96             |
| P1 - P3              | 137,30   | 134,14   | 3,16             |
| P1 - P4              | 103,08   | 101,61   | 1,47             |
| P2 - P3              | 88,60  | 86,28  | 2,32             |
| P2 - P4              | 55,90  | 55,34  | 0,56             |
| P3 - P4              | 61,03  | 58,33  | 2,70             |

Tablo 6.6. Kamera kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi-2

| <b>ÇAPRAZ MESAFE</b> | <b>Fiziksel olarak yüksek doğrulukla önceden ölçülen mesafe (mm)</b> | <b>Sadece odak uzaklığı kalibre edilerek hesaplanan mesafe (mm)</b> | <b>FARK (mm)</b> |
|----------------------|--|---|------------------|
| P1 - P2              | 50,00  | 49,35   | 0,65             |
| P1 - P3              | 137,30   | 135,03  | 2,27             |
| P1 - P4              | 103,08   | 102,17  | 0,91             |
| P2 - P3              | 88,60  | 86,87   | 1,73             |
| P2 - P4              | 55,90  | 55,61   | 0,29             |
| P3 - P4              | 61,03  | 58,86   | 2,17             |

Tablo 6.7. Kamera kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi-3

| <b>ÇAPRAZ MESAFE</b> | <b>Fiziksel olarak yüksek doğrulukla önceden ölçülen mesafe (mm)</b> | <b>Odak uzaklığı, asal nokta ve çapsal dist. kalibre edilerek hesaplanan mesafe (mm)</b> | <b>FARK (mm)</b> |
|----------------------|--|--|------------------|
| P1 - P2              | 50,00  | 49,94  | 0,06             |
| P1 - P3              | 137,30   | 136,76   | 0,54             |
| P1 - P4              | 103,08   | 102,60   | 0,48             |
| P2 - P3              | 88,60  | 88,17  | 0,43             |
| P2 - P4              | 55,90  | 55,46  | 0,44             |
| P3 - P4              | 61,03  | 60,94  | 0,09             |

Tablo 6.8. Kamera kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi-4

| <b>ÇAPRAZ MESAFE</b> | <b>Fiziksel olarak yüksek doğrulukla önceden ölçülen mesafe (mm)</b> | <b>Odak uzaklığı, asal nokta, çapsal ve teğetsel dist. katsayıları kalibre edilerek hesaplanan mesafe (mm)</b> | <b>FARK (mm)</b> |
|----------------------|--|--|------------------|
| P1 - P2              | 50,00  | 49,94  | 0,06             |
| P1 - P3              | 137,30   | 136,74   | 0,56             |
| P1 - P4              | 103,08   | 102,50   | 0,58             |
| P2 - P3              | 88,60  | 88,14  | 0,46             |
| P2 - P4              | 55,90  | 55,36  | 0,54             |
| P3 - P4              | 61,03  | 60,93  | 0,10             |

Tablo 6.9. Kamera kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi-5

| <b>ÇAPRAZ MESAFE</b> | <b>Fiziksel olarak yüksek doğrulukla önceden ölçülen mesafe (mm)</b> | <b>Odak uzaklığı asal nokta, çapsal, teğetsel ve dif. ölçek dist. katsayıları kalibre edilerek hesaplanan mesafe (mm)</b> | <b>FARK (mm)</b> |
|----------------------|--|---|------------------|
| P1 - P2              | 50,00  | 49,96   | 0,04             |
| P1 - P3              | 137,30   | 137,09  | 0,21             |
| P1 - P4              | 103,08   | 102,93  | 0,15             |
| P2 - P3              | 88,60  | 88,43   | 0,17             |
| P2 - P4              | 55,90  | 55,68   | 0,22             |
| P3 - P4              | 61,03  | 60,91   | 0,12             |

Tablo 6.5’den Tablo 6.9’a kadar verilen sonuçlar, ölçüm doğruluklarına gelen iyileştirmelerin daha net görülmesi amacıyla özetlenerek Tablo 6.10’da sunulmuştur. Söz konusu tablolarda sunulan sonuçlar elde edilirken kullanılan parametreler tek bir dengeleme sonucunda hesaplanan parametrelerin kısmi kullanımını ile değil, sadece tablolarda belirtilen ilgili parametrelerin bilinmeyen olarak dengelenmesi sonucunda elde edilen yeni parametrelerin kullanımı ile hesaplanan sonuçları göstermektedir. Söz konusu farklı bilinmeyenli dengelemeler ayrı ayrı yapılabilecek şekilde Kamera Kalibrasyon ve Stereo Test Yazılımı içerisine önceden eklenerek yazılımın bilimsel anlamda esnekliği artırılmıştır. Bu çalışmada yapılan kalibrasyon dengelemelerinde kullanılan görüntü koordinatları (ölçüler) ve obje uzay koordinatları (bilinenler) **EK-2** ve **EK-3**’te sunulmuştur.

Tablo 6.10. Kamera kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi (özet)

| ÇAPRAZ<br>MESAFE | A<br>(mm) | B (mm) |        |        |        |        | FARKLAR (mm) |        |        |        |        |
|------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|--------|--------|--------|--------|
|                  |           | B1     | B2     | B3     | B4     | B5     | A - B1       | A - B2 | A - B3 | A - B4 | A - B5 |
| P1 - P2          | 50,00     | 49,04  | 49,35  | 49,94  | 49,94  | 49,96  | 0,96         | 0,65   | 0,06   | 0,06   | 0,04   |
| P1 - P3          | 137,30    | 134,14 | 135,03 | 136,76 | 136,74 | 137,09 | 3,16         | 2,27   | 0,54   | 0,56   | 0,21   |
| P1 - P4          | 103,08    | 101,61 | 102,17 | 102,60 | 102,50 | 102,93 | 1,47         | 0,91   | 0,48   | 0,58   | 0,15   |
| P2 - P3          | 88,60     | 86,28  | 86,87  | 88,17  | 88,14  | 88,43  | 2,32         | 1,73   | 0,43   | 0,46   | 0,17   |
| P2 - P4          | 55,90     | 55,34  | 55,61  | 55,46  | 55,36  | 55,68  | 0,56         | 0,29   | 0,44   | 0,54   | 0,22   |
| P3 - P4          | 61,03     | 58,33  | 58,86  | 60,94  | 60,93  | 60,91  | 2,70         | 2,17   | 0,09   | 0,10   | 0,12   |

A-Fiziksel olarak yüksek doğrulukla önceden ölçülen mesafe

B-Akıcı stereo görüntülerden gerçek zamanlı (anlık) ve fotogrametrik olarak hesaplanan mesafeler

B1-Kalibrasyonsuz kamera parametreleri kullanılarak

B2-Sadece odak uzaklığı kalibre edilerek

B3-Odak uzaklığı, asal noktanın konumu ve çapsal distorsiyon katsayıları kalibre edilerek

B4-Odak uzaklığı, asal noktanın konumu, çapsal ve teğetsel distorsiyon katsayıları kalibre edilerek

B5-Odak uzaklığı asal noktanın konumu, çapsal, teğetsel ve dif. ölçek dist. katsayıları kalibre edilerek

Dengelemeler, hesaplamalar ve karşılaştırmalar neticesinde farklı tablolar halinde sunulan sonuçlar ve elde edilen bilgiler ışığında;

- Fotogrametrik kamera kalibrasyonu yapılmadan varsayılan kamera değerleri ile ölçüm yapılması durumunda sistemin doğruluk kriterlerini karşılamayacak oranda 3 mm'yi bulan ölçüm farklarının olduğu,
- Yalnızca odak uzaklığı kalibrasyonunun (bir miktar iyileştirme getirirse de) yeterince anlamlı sayılabilecek sonuçlar vermediği,
- Asal noktanın aynı zamanda distorsiyon merkezi olması sebebiyle tek başına veya odak uzaklığı ile birlikte dengelenmesinin anlamlı olmadığı ve her zaman mercek distorsiyon parametreleri (çapsal ve teğetsel) ile birlikte dengelenmesi gerektiği,
- Asal noktanın konumu, çapsal ve diferansiyel ölçek distorsiyonu katsayılarının kalibre edilmesinin sistemin ölçüm doğruluğuna önemli oranda katkı sağladığı ve ölçüm doğruluklarını 0,2 mm seviyelerine yükselttiği,
- Teğetsel distorsiyon katsayılarının kalibre edilmesinin ise kayda değer ek bir iyileştirme getirmediği ve ihmal edilebilir seviyede olduğu değerlendirilmektedir.

#### 6.1.4. Stereo Kamera Baz Kalibrasyonunun Doğruluklara Etkisi

Uygulama bölümünde ayrıntılı olarak değinilen detaylı olarak anlatıldığı üzere; kalibrasyon levhasının her iki stereo görüntü üzerine maksimum yayılacak şekilde çekilen stereo görüntüleri kullanılarak yapılan dengeleme sonucunda yüksek doğrulukla elde edilen sabit stereo kamera bazı Tablo 6.11’de sunulmuştur.

Tablo 6.11. Stereo kamera baz kalibrasyonu sonucu

| Parametre   | Değer (mm)    |
|-------------|---------------|
| Baz aralığı | 200,72 ± 0,02 |

Yapılan araştırmalar ve matematiksel hesaplamalar ışığında; kameraların birbirlerine göre rölatif olarak sabit dönüklükte (içe dönük) ve sabit baz aralıklı olarak stereo kamera seti şeklinde kullanılmasının sistemin ölçüm doğruluğuna ve tutarlılığına olumlu yönde katkı sağladığı görülmüştür. Kalibre edilen stereo kamera bazının gerçek zamanlı (anlık) ölçüm dengelemelerine ilave şart gözlemi olarak dâhil edilmesinin ölçüm doğruluklarına etkisi kapsamında;

- Dâhil edilmeden elde edilen farklar Tablo 6.12’de,
- Dâhil edilerek elde edilen farklar ise Tablo 6.13’de sunulmuştur.

Tablo 6.12. Baz kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi-1

| ÇAPRAZ MESAFE | Fiziksel olarak yüksek doğrulukla önceden ölçülen mesafe (mm) | Kalibre edilmiş stereo kamera bazı ilave şart gözlemi olarak alınmadan elde edilen mesafe (mm) | FARK (mm) |
|---------------|---|--|-----------|
| P1 - P2       | 50,00   | 50,95  | 0,95      |
| P1 - P3       | 137,30  | 139,58   | 2,28      |
| P1 - P4       | 103,08  | 104,55   | 1,47      |
| P2 - P3       | 88,60   | 90,01  | 1,41      |
| P2 - P4       | 55,90   | 56,36  | 0,46      |
| P3 - P4       | 61,03   | 61,91  | 0,88      |

Tablo 6.13. Baz kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi-2

| <b>ÇAPRAZ MESAFE</b> | <b>Fiziksel olarak yüksek doğrulukla önceden ölçülen mesafe (mm)</b> | <b>Kalibre edilmiş stereo kamera bazı ilave şart gözlemi olarak alınarak elde edilen mesafe (mm)</b> | <b>FARK (mm)</b> |
|----------------------|--|--|------------------|
| P1 - P2              | 50,00  | 49,96  | 0,04             |
| P1 - P3              | 137,30   | 137,09   | 0,21             |
| P1 - P4              | 103,08   | 102,93   | 0,15             |
| P2 - P3              | 88,60  | 88,43  | 0,17             |
| P2 - P4              | 55,90  | 55,68  | 0,22             |
| P3 - P4              | 61,03  | 60,91  | 0,12             |

Bu teknik; önceden kalibre edilen (hassas olarak hesaplanan) stereo kamera bazının ilave şart gözlemi olarak gerçek zamanlı ölçüm döngüsüne (dengelemelerine) dahil edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu sayede referans yüzeyin stereo görüntülerde küçük bir alana izdüşümü sebebiyle oluşabilen referanslama ve ölçek hatası minimize edilmekte, dolayısıyla gerçek zamanlı (anlık) olarak elde edilen dış yöneltme parametreleri çok daha yüksek doğrulukla elde edilmekte ve buna bağlı olarak da nihai konumlama ve ölçüm doğruluğu bu oranda artmaktadır. Dengelemeler, hesaplamalar ve karşılaştırmalar neticesinde elde edilen bilgiler ışığında;

- Kameraların gerçek zamanlı (anlık) DYP çözüm doğruluklarını etkileyen ana faktörün, referans yüzeyde bulunan referans nokta (gümüş top) sayısından ziyade bu noktaların görüntüler üzerindeki dağılımı yani referans yüzeyin boyutu olduğu,
- Ölçüm veya operasyon ortamının doğası gereği söz konusu referans yüzey boyutunun belirli ebatlarla sınırlı kalması gerektiği, bu sebeple de ölçümlerin iyileştirilmesi için ilave bir şartın dengelemelere dâhil edilmesi gerektiği,
- Bu ilave şart gözlemi ihtiyacını gidermek için, kullanılan kameraların sabit baz aralıklı stereo kamera seti hâlinde ve baz kalibrasyonu yapılmış olarak kullanılmasının ölçüm doğruluklarına önemli oranda katkı sağladığı ve ölçüm doğruluklarını 0,2 mm seviyelerine yükselttiği değerlendirilmektedir.

### 6.1.5. Referans Yüzeyin Boyut ve Geometrisinin Doğruluklara Etkisi

Referans yüzey, operasyon veya ölçüm ortamında oluşturulan obje uzay koordinat sisteminin referansını teşkil etmektedir. YKN mantığıyla aynı olacak şekilde üzerinde bulunan referans noktaların yani gümüş topların obje uzay koordinatlarının yüksek doğruluklarla bilinmesi gerekmektedir. Ancak bu sayede gerçek zamanlı kamera dış yöneltme parametreleri yüksek doğruluklarla çözülebilmekte ve bu oranda da yüksek doğruluklu ve tutarlı konum bilgisi üretilebilmektedir.

Söz konusu referans yüzeyin boyutlarının belirli sınırlar içerisinde kalması gerektiği ve noktaların düzlem üzerindeki konumlarının tespit kolaylığı açısından özel bir şekilde (formda) olması gerektiğine ilişkin detaylı bilgiler sistem tasarımı bölümünde verilmiştir.

Bu bölümde değinilmesi gereken en önemli nokta ise referans yüzey üzerinde bulunan gümüş topların aynı düzlemde veya serbest formda olmasının ölçüm doğruluklarında herhangi bir etkisinin olup olmadığıdır. Bu kapsamda; uzayın merkezi izdüşümü, eş-doğrusallık (kolinearite) ve fotogrametrik uzaysal geriden kestirme esasları üzerinden gidilecek olursa;

- Referans düzlem üzerindeki gümüş topların obje uzay koordinatları bilinmektedir ve bu koordinatlar bütün dengelemelerin, hesaplamaların ve çözümlerin ana referansıdır.
- Aynı düzlemde veya serbest formda olsalar bile obje uzay koordinatlarının aynı doğrulukla bilinmesi durumunda uzaysal geriden kestirmede değişen hiçbir şey olmayacaktır.
- Referans yüzeyin ölçüm doğruluklarına getireceği en önemli katkı, boyutu ve ölçüm mesafesine göre izdüşüm düzlemlerinde görüntüler üzerine ne kadar alana yayıldığıdır ki bunun da belirli oranlarda kısıtlı kalacağı ve bu darboğazın aşılması için de baz kalibrasyonunun yapılarak hesaplamalara dâhil edilmesi gerektiğine önceki bölümlerde değinilmiştir.
- Durum böyle olsa bile aynı düzlemde tasarlanarak en azından referans yüzey noktalarının Z koordinatlarını aynı değerde tutmanın görsel kontrol amaçlı olarak daha uygun olacağı değerlendirilmektedir.

### 6.1.6. Sonda Geometrisinin Doğruluklara Etkisi

Operasyon ve ölçümlerde kullanılan sonda ise referans yüzeyin aksine gerçek zamanlı olarak koordinatları hesaplanan objemizdir. Bu hesaplamada; önce sonda üzerindeki gümüş topların anlık obje uzay koordinatları fotogrametrik uzaysal ileriden kestirme ile hesaplanmakta sonra ise sondanın yüksek doğruluklu içsel koordinatları yardımıyla yapılan dengeleme sonucunda elde edilen dönüklük parametreleri kullanılarak 3B benzerlik dönüşümü ile sonda ucuna koordinat taşınmaktadır. Bu konu detaylı olarak “Gerçek Zamanlı Ölçüm Döngüsü” kapsamında anlatılmıştır.

Dolayısıyla; sonda üzerindeki gümüş toplara ait anlık obje uzay koordinatları ne kadar sağlıklı elde edilirse o nispette sağlıklı dönüşüm parametreleri hesaplanmakta ve yine o nispette sağlıklı sonda uç koordinatları (X, Y, Z) üretilmektedir. Bu sebeple, sonda üzerindeki gümüş topların anlık obje uzay koordinatlarını uzayda geometrik bir form üzerinde sabit tutmak sisteme hem ilave bir kontrol özelliği kazandıracak hem de matematiksel olarak ilave bir iyileştirme getirecektir. Söz konusu bu iyileştirme için kullanılacak en mantıklı yol ise sonda üzerindeki gümüş topları geometrik olarak aynı düzlem üzerine yerleştirmekten geçmektedir.

Bu sayede; gerçek zamanlı ölçüm döngüsü içerisinde sonda üzerindeki gümüş topların obje uzay koordinatları hesaplandıktan sonra uzayda aynı düzlemde olma şartı üzerine yapılan ilave bir dengeleme ile söz konusu obje uzay koordinatları düzeltilmekte ve müteakip dengeleme ve hesaplamalara geçilmektedir. Bu kapsamda yapılan testler neticesinde elde edilen değerler Tablo 6.14’de sunulmuştur.

Tablo 6.14. Düzlemsellik şartının anlık ölçüm doğruluklarına etkisi

| ÇAPRAZ<br>MESAFE | A<br>(mm) | B (mm) |        | FARKLAR (mm) |        |
|------------------|-----------|--------|--------|--------------|--------|
|                  |           | B1     | B2     | A – B1       | A – B2 |
| P1 - P2          | 50,00     | 48,89  | 49,96  | 1,11         | 0,04   |
| P1 - P3          | 137,30    | 135,22 | 137,09 | 2,08         | 0,21   |
| P1 - P4          | 103,08    | 101,77 | 102,93 | 1,31         | 0,15   |
| P2 - P3          | 88,60     | 86,32  | 88,43  | 2,28         | 0,17   |
| P2 - P4          | 55,90     | 54,76  | 55,68  | 1,14         | 0,22   |
| P3 - P4          | 61,03     | 59,08  | 60,91  | 1,95         | 0,12   |

A-Fiziksel olarak yüksek doğrulukla önceden ölçülen mesafe

B-Akıcı stereo görüntülerden gerçek zamanlı (anlık) ve fotogrametrik olarak hesaplanan mesafeler

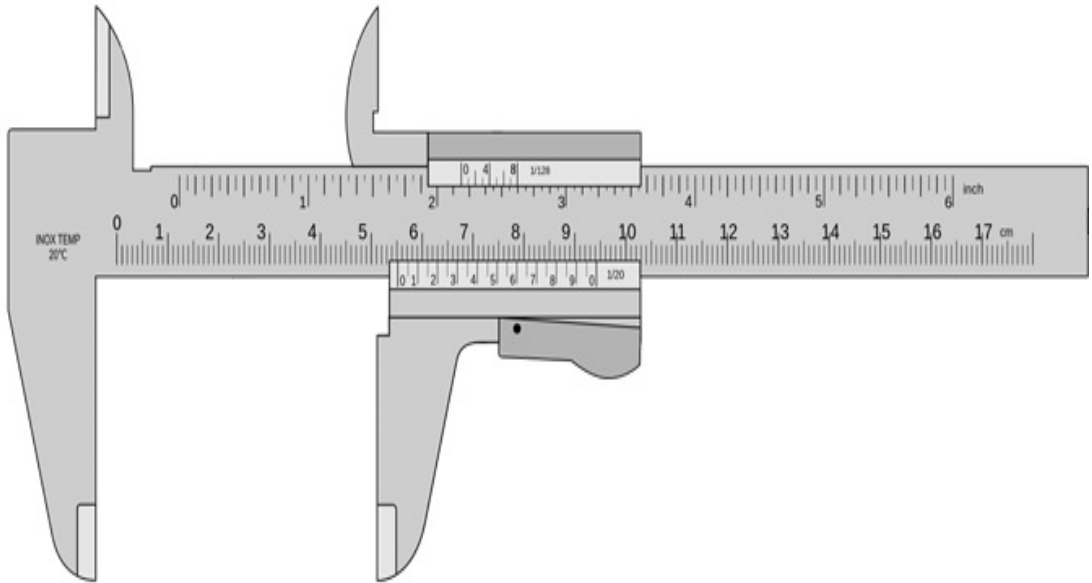
B1- Düzlemsellik şartı dahil edilmeden elde edilen mesafe

B2- Düzlemsellik şartı dahil edilerek elde edilen mesafe

## 6.2. Gerçek Zamanlı Stereo Ölçüm Doğrulukları

Önceki bölümlerde elde edilen bulgulara ek olarak sistemin ölçüm doğruluğu, tutarlılığı ve hassasiyetini incelemek amacıyla ilave bazı testler icra edilerek sonuçları irdelenmiştir. Bu kapsamda;

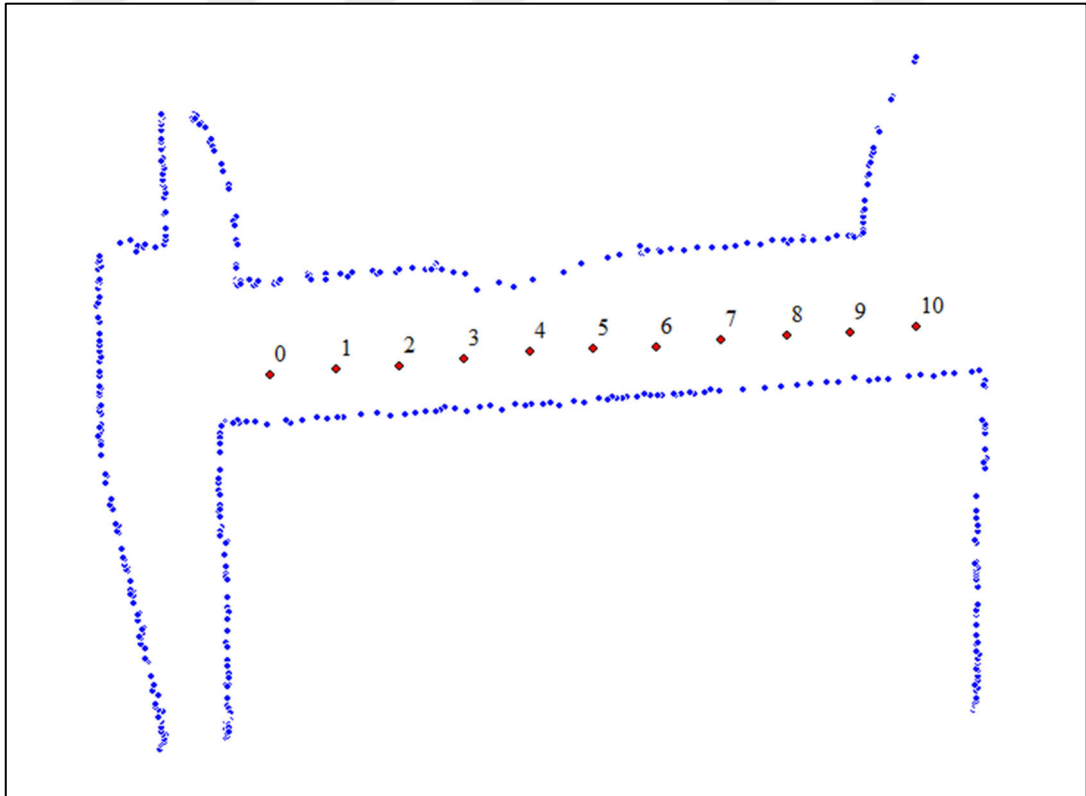
- Bilinen yüzey ve mesafeler üzerindeki ölçüm doğrulukları bağlamında, hareketli sonda ile, Şekil 6.6'da gösterilen kumpas üzerinden 3B yüzey çıkarımı yapılarak, 0-10 cm arasındaki her 1 cm'nin konumu özel nokta olarak kaydedilmiş ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Kumpasa üzerinde toplanan 3B yüzey ve özel nokta okumaları Şekil 6.7'de, özel nokta okuma değerlerine ilişkin karşılaştırma ise Tablo 6.15'de sunulmuştur.
- Yüzey toplama modunda, kamera platformu referans yüzeye göre sabit ve sonda ucu bir noktada sabit iken sondanın kendisi dairesel olarak hareket ettirilerek sonda ucu obje uzay koordinatları kaydedilmiş ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Elde edilen okuma değerlerine ait dağılım grafiği Şekil 6.8'de sunulmuştur.
- Yüzey toplama modunda, sonda referans yüzeye göre sabit ve sonda ucu bir noktada sabit iken kamera platformu hareket ettirilerek sonda ucu obje uzay koordinatları kaydedilmiş ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Elde edilen okuma değerlerine ait dağılım grafiği Şekil 6.9'da sunulmuştur.



Şekil 6.6. Gerçek zamanlı ölçüm testlerinde kullanılan kumpas

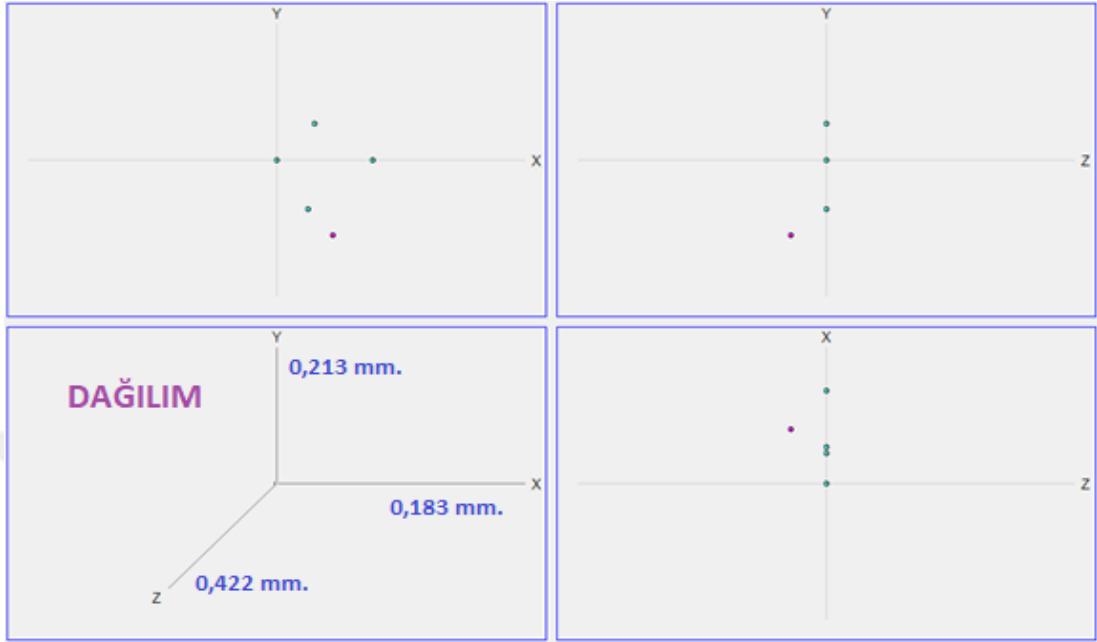
Tablo 6.15. Görüntüleme mesafesi 1 metre iken ölçüm değerleri ve doğrulukları

| Nokta No                  | Kumpas üzerinde bilinen mesafeler A (mm) | Kumpas üzerindeki sonda okumaları (mm) |        |        |                       | FARKLAR (mm)<br>A - B |
|---------------------------|--|--|--------|--------|-----------------------|-----------------------|
|                           |  | Objeye Uzaklıklar                      |        |        | Hesaplanan mesafe (B) |                       |
|                           |  | X                                      | Y      | Z      |                       |                       |
| 1                         | 0,00                                     | 168,69                                 | -43,56 | -68,28 | 0,00                  | 0,00                  |
| 2                         | 10,00                                    | 178,70                                 | -42,54 | -67,35 | 10,10                 | -0,10                 |
| 3                         | 20,00                                    | 188,81                                 | -42,08 | -67,27 | 20,20                 | -0,20                 |
| 4                         | 30,00                                    | 198,78                                 | -41,03 | -67,03 | 30,22                 | -0,22                 |
| 5                         | 40,00                                    | 208,72                                 | -39,93 | -66,67 | 40,23                 | -0,23                 |
| 6                         | 50,00                                    | 218,69                                 | -39,40 | -66,44 | 50,21                 | -0,21                 |
| 7                         | 60,00                                    | 228,63                                 | -39,09 | -66,04 | 60,15                 | -0,15                 |
| 8                         | 70,00                                    | 238,59                                 | -38,03 | -65,63 | 70,17                 | -0,17                 |
| 9                         | 80,00                                    | 248,49                                 | -37,43 | -65,13 | 80,10                 | -0,10                 |
| 10                        | 90,00                                    | 258,51                                 | -36,97 | -64,92 | 90,12                 | -0,12                 |
| 11                        | 100,00                                   | 268,57                                 | -35,86 | -64,42 | 100,25                | -0,25                 |
| <b>Ortalama Fark (mm)</b> |  |  |        |        |                       | <b>-0,18</b>          |

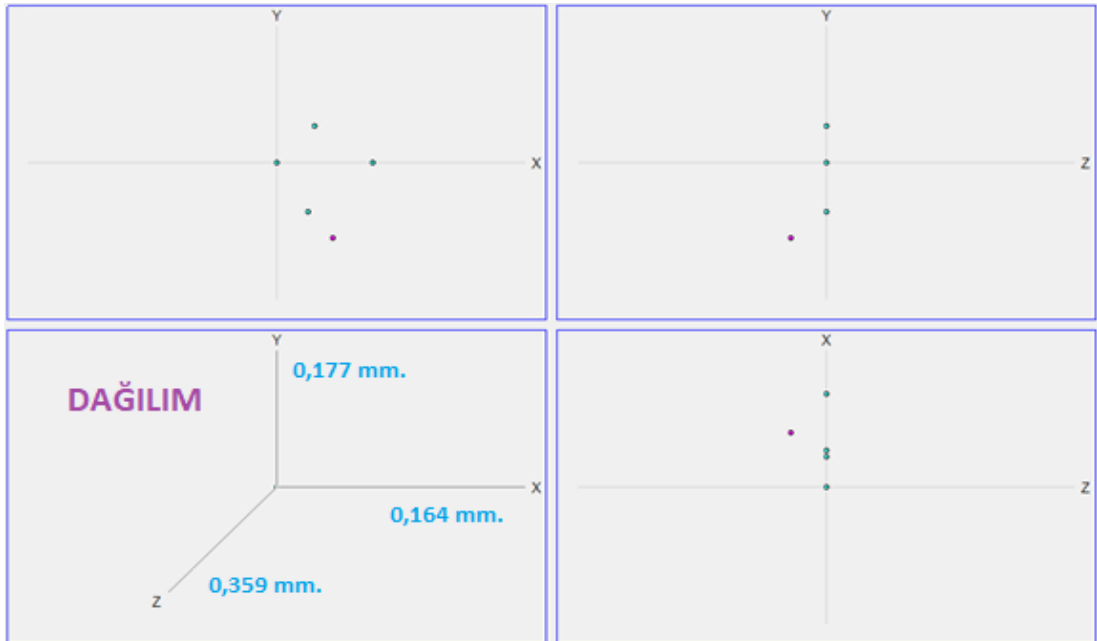


Şekil 6.7. Görüntüleme mesafesi 1 metre iken toplanan 3B yüzey ve noktalar

Kamera platformu referans yüzeye göre sabit ve sonda ucu bir noktada sabit iken sondanın dairesel olarak hareket ettirilerek elde edilen sonda ucu obje uzay koordinatlarına ait dağılım grafiği Şekil 6.8’de görülmektedir.



Sonda referans yüzeye göre sabit ve sonda ucu bir noktada sabit iken kamera platformu hareket ettirilerek elde edilen sonda ucu obje uzay koordinatlarına ait dağılım grafiği Şekil 6.9’da görülmektedir.



## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu doktora çalışmasında; ölçüm doğruluklarının hayati öneme sahip olduğu cerrahi operasyonlar için gerekli mekânsal ölçümlerin fotogrametrik yöntemlerle, yüksek doğrulukla ve 3B olarak yapılabildiği bir **Cerrahi Navigasyon Sistemi** ve bu sistemin doğruluğunu destekleyen **Kamera Kalibrasyon Sistemi** başta olmak üzere diğer alt bileşenler için gerekli donanım ve yazılımlar hayata geçirilerek sistem üzerinde kapsamlı doğruluk araştırmaları yapılmıştır.

Cerrahi navigasyon uygulamalarında amaç; ameliyat öncesi elde edilen bilgisayarlı tomografi (CT veya MR) görüntüleri ile ameliyat bölgesi anatomisi arasında bağlantı kurarak, cerrahi aletlerin tutma, kesme gibi fonksiyona sahip uç kısımlarını ilgili vücut bölgesinin karmaşık anatomisi içinde takip etmektir. Bu teknoloji ile kritik yapı ve organların bölgeleri kolaylıkla belirlenmekte ve gerekli cerrahi müdahale bu yapılara zarar vermeden hassas bir şekilde yapılabilmektedir.

Cerrahi navigasyonda en önemli unsur doğruluktur. Bu doğruluk, monitörde tomografi üzerinde gösterilen nokta ile anatomi içinde bulunan gerçek noktanın birbiri ile örtüşme derecesidir. Görüntüleme (tomografi tekniği) hatası, üç boyutlu yapılandırma hatası, hastanın hareket etmesine bağlı hatalar ve izleme sistemi hatası gibi nedenler doğruluğu etkileyebilmektedir. Bu kapsamda; öncelikli olarak stereo fotogrametri, dengeleme hesabı, dengelemede ileri uygulamalar gibi bilimsel temeller ve bu temellerin belirli yazılım dilleri üzerindeki uygulamalarına dayalı ve pratiğe yönelik detaylı çalışmalar yapılarak ilgili konular üzerinde hakimiyet sağlanmıştır. Müteakiben, sistemin oluşturulması için gerekli bütün donanım ve yazılım gereksinimleri irdelenerek detaylı bir sistem tasarımı ile sistemin ana parametreleri ve iskeleti sağlıklı bir şekilde en baştan ortaya konmuştur.

Stereo fotogrametri temel olarak; uzayın merkezi izdüşümü ve uzayda 3B benzerlik dönüşümünü esas almaktadır. Bu sebeple, söz konusu uzayın merkezi izdüşüm geometrisi ne kadar sağlıklı oluşturulursa o oranda doğru ve güvenilir 3B (stereo) konum bilgisi elde edilmektedir. Bu geometriyi sağlıklı olarak ortaya koymanın yolu ise kamera iç yöneltme parametrelerinin kalibrasyon dengelemeleri yardımıyla önceden belirlenmesinden ve konumları yüksek doğruluklarla bilinen referans noktalar (YKN) yardımıyla senkronize stereo görüntü çiftlerinin gerçek zamanlı olarak yine yüksek doğrulukla yöneltmesinden geçmektedir.

Sistemin donanım ve yazılım tasarımının yansırı bu çalışmada; lim doğruluklarının hayati öneme sahip olduğu cerrahi navigasyon uygulamalarında kullanılan sistem ve kameraların ileri dengeleme teknikleriyle fotogrametrik kalibrasyonları yapılarak elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu kapsamda elde edilen bulgular ışığında;

- Fotogrametrik kamera kalibrasyonu yapılmadan varsayılan kamera değerleri ile lim yapılması durumunda sistemin doğruluk kriterlerini karşılamayacak oranda 2-3 mm seviyelerinde lim farklarının olduğu,
- Yalnızca odak uzaklığı kalibrasyonunun (bir miktar iyileştirme getirse de) yeterince anlamlı sayılabilecek sonuçlar vermediği,
- Asal noktanın aynı zamanda distorsiyon merkezi olması sebebiyle tek başına veya odak uzaklığı ile birlikte dengelenmesinin anlamlı olmadığı ve her zaman mercek distorsiyon parametreleri ile birlikte dengelenmesi gerektiği,
- Asal noktanın konumu, çapsal ve diferansiyel ölçek distorsiyonu katsayılarının kalibre edilmesinin sistemin lim doğruluğuna önemli oranda katkı sağladığı ve lim doğruluklarını 0,2 mm seviyelerine yükselttiği,
- Teğetsel distorsiyon katsayılarının kayda değer ek bir iyileştirme getirmediği ve ihmal edilebilir seviyede olduğu değerlendirilmektedir.

Kamera kalibrasyonu kapsamında elde edilen bulgular ışığında ayrıca, tek mesafeden çekilen bir görüntü ile i yöneltme parametrelerinin komple dengelemesi yapılamayacağı değerlendirilmektedir. Bunun nedeni; i yöneltme parametrelerinin dengelemede iteratif olarak optimizasyonu esnasında distorsiyon parametreleri olması gerekene yakınsarken, özellikle odak uzaklığı ( $c$ ) ve  $Z_0$  değerleri olması gerekenden daha farklı bir değere yakınsayabilmektedir yani odak uzaklığı olması gerekenden daha büyük veya daha küçük bir değere, buna paralel olarak da  $Z_0$  daha farklı bir değere yakınsamakta, hatta bazı durumlarda yakınsamak yerine ıraksamakta ve dengeleme çözümsüz olarak sonsuz döngüye girmektedir. Bu ıraksama durumunu ortadan kaldırmak ve özellikle odak uzaklığını doğru değere yakınsatmak için elde mevcut olan ilave bir şart gerekmektedir. Bu ilave şartı sağlamak için, aynı referans yüzeyin en az ikinci bir mesafeden çekilen görüntüsü kullanılmalıdır. Aksi takdirde her iterasyonda odak uzaklığına gelecek düzeltme diğer bilinmeyenlere dağıtılmaktadır.

Bu durumda yeni görüntüden elde edilen referans noktalara ait görüntü koordinatlarının ve ilave şart gözlemi (ölçümü) olarak görüntü çekim noktaları arasındaki 3B ofset mesafenin dengelemeye dâhil edilmesi gerekmektedir.

Fotogrametrik kamera kalibrasyonu ile uzayın merkezi izdüşüm geometrisi sağlıklı olarak ortaya korsa da anlık ölçüm doğruluklarını etkileyen diğer bir faktör ise kameraların anlık ve gerçek zamanlı olarak mutlak yöneltme işlemidir. Bu işlem YKN kullanımına benzer şekilde oluşturulan referans yüzey üzerinde bulunan referans noktalar yardımıyla yapılmaktadır fakat, referans yüzeyin her iki görüntüde de mecburen küçük bir alana izdüşümü sebebiyle anlık görüntülerin öteleme ve dönüklükleri olumsuz yönde etkilenmekte, bu olumsuz etki ise nihai ölçüm doğruluklarına yansımaktadır. Milimetre altında ölçüm doğruluğu gerektiren cerrahi navigasyon sistemlerinde söz konusu bu olumsuz etkiyi minimize etmek için elde olan bütün ilave koşulların gerçek zamanlı çözümlere ve dengelemelere dâhil edilmesi gerekmektedir. Bu sayede, mümkün olan en yüksek gerçek zamanlı konumsal doğruluklara ulaşmak mümkün hale gelmektedir.

Hava fotogrametrisinden farklı olarak, anlık hareket tespiti ve gerçek zamanlı konum ölçümlerinin yapıldığı bu tarz sistemlerde iki kamera aynı anda senkronize bir şekilde operasyon ortamını görüntülemek üzere sabit bir baz aralığında stereo kamera seti olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada ayrıca; kamera iç yöneltme parametrelerine ilave olarak, sabit olan stereo kamera bazı da ileri dengeleme teknikleriyle kalibre edilmiş ve gerçek zamanlı konum çözümlerine ilave koşul (şart) olarak dâhil edilmiştir. Söz konusu ilave koşulun ölçüm sağlığında önemli artış sağladığı ve konum doğruluklarını  $\pm 0,2$  mm seviyelerine yükselttiği belirlenmiştir.

Her ne kadar sistemin ölçüm tutarlılığını ve doğruluğunu artırmak için ilave kalibrasyonlar yapılarak gerekli koşullar girilse de referans yüzey ile ölçümlerin yapılacağı bölgenin kameraların alım ekseni yönünde aynı hizada ve birbirlerine yakın olarak sabitlenmesinin olası bütün ölçüm hatalarını minimum seviyede tutmak için önemli ve gerekli olduğu değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada hayat geçirilen sistemin diğer bir özelliği ise; gerçek zamanlı konum ölçümleri esnasında kameralardan akışkan olarak gelen her stereo görüntü çifti için kamera dış yöneltme parametrelerinin dinamik olarak hesaplanmasıdır. Bu özellik sayesinde, sağlıklı ölçüm ve görüntüleme sınırları içerisinde kalmak kaydıyla stereo kamera platformunun konumu isteğe bağlı (keyfi) olarak değiştirilebilmektedir.

Bu özelliğin avantajı ise; fark edilmeyecek kadar küçük fakat ölçüm doğruluklarını etkileyecek kadar önemli olası istem dışı kamera platformu hareketlerinin olumsuz etkilerinin de önüne geçilmesidir. Gerçek zamanlı olarak üretilen konum bilgilerinin (X, Y, Z) her zaman referans yüzey üzerinde tanımlı olan obje uzay koordinat sisteminde olması sebebiyle burada dikkat edilmesi gereken; operasyon veya ölçümler esnasında referans yüzey ile ölçümü yapılan bölgenin birbirlerine göre rölatif olarak olası yer değişiminin ardışık ölçümlerin tutarlılığını bozmasının önüne geçmek adına söz konusu ikilinin operasyon öncesinde birbirlerine çok iyi sabitlenmesi hususudur.

Sistem doğruluğunu etkileyen önemli etkenlerden biri de **Otomatik Objeye Tespit Yazılımı** tarafından gümüş toplara ait elde edilen gerçek zamanlı stereo görüntü koordinatlarıdır. Uygulanan fotogrametrik teknikler ne kadar sağlıklı ve kontrollü olursa olsun bir uzay noktasının görüntü koordinatları sağlıklı olarak elde edilmediği sürece doğru konumsal bilgiye ulaşılamaz. Görüntü koordinatlarındaki hatalar en çok alım eksenine doğrultusundaki koordinatı (Z) etkilemektedir. Bu kapsamda; otomatik olarak tespit edilen görüntü koordinatları ile aynı görüntülerden manuel olarak okunan görüntü koordinatları karşılaştırılmış ve otomatik olarak tespit edilen görüntü koordinatlarının belirlenen doğruluk kriterini karşıladığı görülmüştür.

Sistemde kullanılan referans yüzeyler, ölçüm ortamında oluşturulan obje uzay koordinat sistemine referans teşkil etmektedir. YKN mantığıyla aynı olacak şekilde üzerinde bulunan referans noktaların yani gümüş topların obje uzay koordinatlarının yüksek doğruluklarla bilinmesi gerekmektedir. Ancak bu sayede gerçek zamanlı kamera dış yönelme parametreleri yüksek doğruluklarla çözülebilmekte ve bu oranda da yüksek doğruluklu ve tutarlı konum bilgisi üretilebilmektedir. Elde edilen bilgiler ışığında; söz konusu referans yüzey boyutlarının belirli sınırlar içerisinde kalması gerektiği, tespit kolaylığı açısından noktaların referans yüzey üzerindeki konumlarının özel bir şekilde (formda) olması gerektiği ve referans nokta konumlarını geometrik olarak aynı düzlem üzerinde tasarlayarak Z koordinatlarını aynı değerde tutmanın görsel kontrol amaçlı olarak daha uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Sistemde kullanılan sondalar ise referans yüzeyin aksine gerçek zamanlı olarak koordinatları hesaplanan hareketli objelerdir. Bu hesaplamada; önce sonda üzerindeki gümüş topların anlık obje uzay koordinatları fotogrametrik uzaysal ileriden kestirme ile hesaplanmakta sonra ise sondanın yüksek doğruluklu içsel koordinatları yardımıyla yapılan dengeleme sonucunda elde edilen dönüklük parametreleri kullanılarak 3B

benzerlik dönüşümü ile sonda ucuna koordinat taşınmaktadır. Dolayısıyla; sonda üzerindeki gümüş toplara ait anlık obje uzay koordinatları ne kadar sağlıklı elde edilirse o nispete sağlıklı dönüşüm parametreleri hesaplanmakta ve yine o nispete sağlıklı sonda uç koordinatları (X, Y, Z) üretilmektedir. Bu sebeple, sonda üzerindeki gümüş topların gerçek zamanlı obje uzay koordinatlarını uzayda geometrik bir form üzerinde sabit tutmak hem sisteme ilave bir kontrol özelliği kazandırmakta hem de matematiksel açıdan dengelemelere iyileştirme getirmektedir. Söz konusu bu iyileştirme için kullanılacak en mantıklı yol ise sonda üzerindeki gümüş topları geometrik olarak aynı düzlem üzerine yerleştirmekten geçmektedir. Bu sayede; uzayda aynı düzlemde olma şartı üzerine yapılan ilave bir optimizasyon dengelemesi ile söz konusu obje uzay koordinatları iyileştirilmektedir.

Fotogrametrik yöntemlerle çalışan cerrahi navigasyon sistemleri ile yapılan stereo fotogrametrik ölçümlerin doğruluk ve duyarlılığı için sistem tasarımı bölümünde detaylı olarak ortaya konulan esaslar ışığında; kamera odak uzaklığı, kamera görüş açısı, görüntü çözünürlüğü, stereo baz mesafesi, görüntüleme mesafesi, görüntüleme alanı, referans yüzey ve sondaların boyut ve geometrileri gibi bileşenlerin sistem tasarımı esnasında arzu edilen hedef ve doğruluk kriterlerine göre sağlıklı bir şekilde en baştan belirlenmesi gerekmektedir.

Yapılan çalışmalar ve ortaya konulan donanım ve yazılımlar dikkate alındığında bu doktora çalışmasında; tezin ilgili bölümlerinde detaylı olarak anlatılan cerrahi navigasyon ölçümlerinin doğruluk ve tutarlılıkları üzerine yoğunlaşarak navigasyon modülü ve navigasyon işlemleri belirli bir seviyede bırakılmıştır. Farklı format ve yapıdaki çok katmanlı (multiframe) DICOM verilerinin (CT, MRI, vb.) okunması, navigasyon modülünde gösterilen farklı eksenlerde dinamik olarak görüntülenmesi ve kullanım kolaylığı sunan etkin cerrahi navigasyon fonksiyonlarının kazandırılması kapsamında geliştirilecek algoritma ve kodlamalar sayesinde söz konusu sistemin birçok anatomik bölgenin cerrahi müdahale işlemlerinde güvenle kullanılabilir hale geleceği değerlendirilmektedir. Gerçek zamanlı ve yüksek doğruluklu ölçümler göz önüne alındığında ise; ana modül üzerine, navigasyon modülüne benzer olarak ihtiyaca yönelik geliştirilecek yeni modüller sayesinde sadece cerrahi işlemlerde değil, obje tasarım, tersine mühendislik, obje deformasyonu, üretim kalite kontrolü, kompleks ve karmaşık yapıdaki araç veya cihazların ulaşılamayan bölgelerine ait kapsamlı ölçümler gibi birçok alanda da sistemin kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

## KAYNAKLAR

- Acharya, T. and Ray, A.K., (2005). *Image Processing: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- Alturki, A.S., (2017). *Principal Point Determination for Camera Calibration*. PhD Thesis, University of Dayton, Dayton (USA), 104.
- Anonim, (2021a). *Sayısal Kameralar için Fotogrametrik Kamera Kalibrasyonu*. <http://www.fotogrametrik.com/dersler/kalibrasyon> (Erişim tarihi: 07.05.2021)
- Anonymous, (2021b). *Sensor Distortion Models and Adjustment Techniques*. <http://www.photogrammetrics.com/crs/distortion> (Erişim Tarihi: 17.05.2021)
- Anonymous, (2018a). *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. <http://isprs.org/society/Default.aspx> (Erişim Tarihi:02.09.2018)
- Anonymous, (2018b). *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. <https://www.asprs.org/publication/pers-journals> (Erişim Tarihi:02.09.2018)
- Anonymous, (2017a). *Ağ İşlemler Arası İletişim için Adlandırılmış Kanal Kullanma*. <https://docs.microsoft.com/tr-tr/dotnet/standard/io> (Erişim Tarihi:30.03.2017)
- Basu, M., (2002). *Gaussian Based Edge Detection Methods a Survey*. IEEE Transactions on Systems, New Jersey.
- Beyer, H., (1991). *An Introduction to Photogrammetric Camera Calibration (Technical Report)*. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH, Zurich.
- Bradski, G. and Kaehler, A., (2008). *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. O'Reilly Media, 16-17, CA , California.
- Brown, D.C., (1966). Decentering distortion of lenses. *Photogrammetric Engineering*, 32(3), 444-462.
- Brown, D.C., (1971). Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37(8), 855–866.
- Bukhari, F., Dailey, M.N., (2013). Automatic radial distortion estimation from a single image. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 45(1), 31-45.
- Canny, J., (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 679-700, New Jersey.
- Canon (2011). *PowerShot 220HS Digital Compact Camera*. Erişim Tarihi:24.04.2021, <https://global.canon/en/c-museum/product/dcc601.html>
- Ceseracciu, E., Sawacha, Z. and Cobelli C., (2014). Comparison of markerless and marker-based motion capture technologies through simultaneous data collection during gait: proof of concept. *Plos One*, 9, 3-12.
- Clarke, T.A. & Fryer, J.F. (1998). The development of camera calibration methods and models. *Photogrammetric Record*, 16(91), 51-66.

- Crane, R., (1997). *A Simplified Approach to Image Processing: Classical and Modern Techniques in C*. Prentice Hall PTR, New Jersey.
- Cronk, S., Fraser, C.S. and Hanley, H.B., (2006). Automatic calibration of colour digital cameras. *Photogrammetric Record*, 21(116), 355-372.
- Dal, Teoman. (2021). *Cerrahi Navigasyon Yöntemlerinin Başlıca Avantajları*. <https://www.teomandal.com/cerrahi-navigasyon>, (Erişim Tarihi: 23.04.2021).
- Dal, Teoman. (2021). *Cerrahi Navigasyonun Özellikle Faydalı Olduğu Durumlar*. <https://www.teomandal.com/cerrahi-navigasyon>, (Erişim Tarihi: 23.04.2021).
- Dörstel, C., Jacobsen, K. and Stallmann, D., (2003). DMC-Photogrammetric accuracy calibration aspects and generation of synthetic DMC images. *Photogrammetric Week (Optical 3D Measurement Techniques VI)*, 1-5 September, 74-82, Stuttgart, Germany.
- DPreview (2002). *Foveon's Revolutionary X3 Sensor*. Erişim Tarihi: 10.06.2021, <https://www.dpreview.com/articles/7559294753/foveonx3/>
- Duda, R. and Hart, P., (1972). Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM*, 15, 11-15. Doi: 10.1145/361237.361242.
- Durgut, T. ve Maraş, E.E., (2021). Fotogrametrik cerrahi navigasyon uygulamalarında kamera ve sistem kalibrasyonunun ölçüm doğruluklarına etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(3), 640-649. Doi: 10.35414/akufemubid.851780.
- Fraser, C.S., (1997). Digital camera self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 52, 149-159.
- Fraser, C.S. and Al-Ajlouni, S., (2006). Zoom-dependent camera calibration in close range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(9), 1017-1026.
- Fraser, C.S., (2013). Automatic camera calibration in close range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 79(4), 381-388. Doi: 0099-1112/13/7904-381.
- Fryer, J.G. and Brown, D.C., (1986). Lens distortion in close range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 52(2), 51-58.
- Fryer, J.G., (1992). Recent developments in camera calibration for close-range applications. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 29(5), 594-599.
- Fryer, J.G. and Goodin, D.J., (1989). In-flight aerial camera calibration from photography of linear features. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 55(12), 1751-1754.
- Fryer, J.G and Fraser, C.S., (1986). On the calibration of underwater cameras. *Photogrammetric Record*. 12(67), 73-85.

- Fryer, J.G., (1989). Camera calibration in non-topographic photogrammetry. *ASPRS*, 59-69.
- Fryer, J.G., (1996). Camera calibration. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles Publishing, Scotland, 156-179.
- Functionnl-Neurosurgery-FN (2017). *Neuronavigation*. Erişim Tarihi: 03.03.2021, <https://neurologicalsurgery.in/disease/brain-tumors/treatments/neuronavigation>
- Gürbüz, H., (2006). *Genel Fotogrametri-I*. Birlik Matbaacılık-Yayıncılık, Ankara.
- Hallert, B., (1963). The method of least squares applied to multicollimator camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, 29(5), 836-840.
- Heuvel, F.A., (1999). Vanishing point detection for architectural photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32:5, 652-659.
- Hildreth, E.C., (1985). *Edge Detection*. Artificial Intelligence Laboratory, MIT-AI:858, Massachusetts.
- Hothmer, J., (1958). Possibilities and limitations for elimination of distortion in aerial photographs. *Photogrammetric Record*, 2(12), 426-445.
- Hough, P.V.C., (1962). *Method and Means of Recognizing Complex Patterns*, US Patent 3069654.
- Ioannou, D., Huda, W. and Laine, A.F., (1999). Circle recognition through a 2D Hough transform and radius histogramming. *Image and Vision Computing*, 17:1, 15-26.
- Jain, N., and Jain, N., (2012). Coin recognition using circular hough transform. *International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering*, 2:3, 101-104.
- Kaptein, B.L., Valstar, E.R., Stoel, B.C., Rozing, P.M. and Reiber, J.H., (2004). Evaluation of three pose estimation algorithms for model-based roentgen stereophotogrammetric analysis. *Journal of Engineering in Medicine*, 218:4, 231-238. Doi: 10.1243/0954411041561036218.
- Karlı, F., (2004). *Orta ve Yüksek Çözünürlüklü Dijital Kameraların Fotogrametrik Potansiyellerinin Araştırılması*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeodezi Ve Fotogrametri Anabilim Dalı, Trabzon, 240.
- Karlı, F. ve Ayhan, E., (2005). Orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kameraların metrik performanslarının belirlenmesi. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 28 Mart - 1 Nisan, Ankara, Türkiye.
- Khalil, O.A., (2002). Solutions for exterior orientation in photogrammetry: a review, *Photogrammetric Record*, 17:100, 615-634.
- Kraus, K., (2008). *Fotogrametri*. (çev. O. Altan, S. Külür, G. Toz, H. Demirel, Z. Duran, M. Çelikoyan), Nobel Dağıtım, Ankara.

- Linder, W., (2009). *Digital Photogrammetry - A Practical Course*. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Luhmann, T., Hastedt, H. and Tecklenburg, W., (2006). Modelling of chromatic aberration for high precision photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5), 173-178.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. and Boehm, J., (2014). *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. Walter de Gruyter GmbH, Berlin.
- Nakiboğlu, M., Demir, C., (2006). *Dengeleme Hesabı (Dengeleme-1)*. Harita Genel Komutanlığı, Ankara.
- Nakiboğlu, M., Demir, C., (2006). *Dengeleme İleri Uygulamalar (Dengeleme-2)*. Harita Genel Komutanlığı, Ankara.
- NDI (2021). How optical measurement works. *Optical Measurement*, Erişim: 17.06.2021, <https://www.ndigital.com/technology/optical-overview/>
- OptiTrack (2016). *V120 Duo Stereo Camera Technical Specifications*. Erişim: 10.01.2016, <https://optitrack.com/cameras/v120-duo/>
- Parker, J.R., (2011). *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*. Wiley Publishing, Indianapolis.
- Prewitt, J., (1970). *Object Enhancement and Extraction, Picture Processing and Psychopictorics*. New York Academic Press, New York.
- Qidwai, U. and Chen, C., (2010). *Digital Image Processing: An Algorithmic Approach with MATLAB*. CRC Press, Florida.
- Rahmani, A. and Khalilzadeh, F. (2016). Real time eye detection using edge detection and euclidean distance. *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology (IJMEC)*, 6, 2849-2855.
- Sampath, A., Moe, D. and Christopherson, J., (2012). Two methods for self-calibration of digital camera. *International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39(B1), 261-266.
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J.H. and Wackrow, R., (2012). Parameterising internal camera geometry with focusing distance. *The Photogrammetric Record*, 27, 210-226.
- Seifozakerini, S., Yau, W., Mao, K. and Nejati, H., (2018). Hough transform implementation for event-based systems: concepts and challenges. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 12, 1-18. Doi:12. 10.3389/Fncom.2018.00103.
- Sobel, I., (1970). *Camera Models and Perception*. Doctoral Dissertation, Stanford University, Dept Of Computer Science, California, 100.
- Song, M., Civco, D. and Hurd, J., (2005). A competitive pixel-object approach for land covers classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26:22, 4981-4997.

- Stamatopoulos, C., (2011). *Orientation and Calibration of Long Focal Length Cameras in Digital Close-Range Photogrammetry*. PhD Thesis, Dept. of Infrastructure Engineering, University of Melbourne, Melbourne, 170.
- Stein, G.P., (1996). Lens distortion calibration using point correspondences. *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 602-608.
- Swaminathan, R., Nayar, S., (2000). Non-metric calibration of wide-angle lenses and polycameras. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(10), 1172-1178.
- Taubin, G., (1991). Estimation of planar curves, surfaces, and nonplanar space curves defined by implicit equations with applications to edge and range image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(11), 1115-1138.
- TB (2021). *DaVinci Robotic Surgical System*. Erişim Tarihi: 27.05.2021, <https://tucsonbariatric.com/procedures/davinci-robotic-surgical-system>
- Tong, Y., Wang, H., Pi, D., and Zhang, Q., (2006). Fast algorithm of hough transform-based approaches for fingerprint matching in intelligent control and automation. *WCICA 2006 The Sixth World Congress*, 21-23 June, 10425-10429, Dalian, China.
- Tsai, R.Y., (1992). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the shelf TV cameras and lenses. *Radiometry pp*, 221-244.
- Tutak, T. ve Güder, Y., (2014). Matematiksel modellemenin tanımı, kapsamı ve önemi. *Turkish Journal of Educational Studies*, TURK-JES-1:1, 173-190.
- Wang, A., Qiu, T., Shao, L.,(2009). A simple method of radial distortion correction with centre of distortion estimation. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 35(3), 165-172.
- Wang, J., Shi, F., Zhang, J., Liu, Y., (2008). A new calibration model of camera lens distortion. *Pattern Recognition*, 41, 607-615.
- Wang, S., Tseng, Y.H., (2000). Automatic self-calibration of digital cameras for close-range photogrammetry. *IAPRS*, 33, 7.
- Yang, W.Y., (2011). Geometric calibration of IR camera using trinocular vision. *Lightwave Technology*, 29:24, 3797-3803. Doi: 10.1109/JLT.2011.2170812.
- Yıldız, F., Karabörk, H., Yakar, M. and Yılmaz, H.M., (2005). Yersel fotogrametride kullanılan metrik olmayan dijital kameraların kalibrasyonunda kullanılan yazılımların incelenmesi üzerine bir çalışma. *Harita Dergisi*, 134, 61-70.
- Zhang, Z., (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330-1334.

## EKLER

### EK-1 Kolinearite Eşitliklerinin Doğrusallaştırılması

$$\Delta X = X - X_0 \quad , \quad \Delta Y = Y - Y_0 \quad , \quad \Delta Z = Z - Z_0$$

$$Z_x = r_{11}\Delta X + r_{21}\Delta Y + r_{31}\Delta Z$$

$$Z_y = r_{12}\Delta X + r_{22}\Delta Y + r_{32}\Delta Z$$

$$N = r_{13}\Delta X + r_{23}\Delta Y + r_{33}\Delta Z$$

$$x = -c \frac{Z_x}{N} \quad , \quad y = -c \frac{Z_y}{N} \quad \text{Olmak üzere;}$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial X_0} = -\frac{c}{N^2} (r_{13}Z_x - r_{11}N) \qquad \frac{\partial f_y}{\partial X_0} = -\frac{c}{N^2} (r_{13}Z_y - r_{12}N)$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial Y_0} = -\frac{c}{N^2} (r_{23}Z_x - r_{21}N) \qquad \frac{\partial f_y}{\partial Y_0} = -\frac{c}{N^2} (r_{23}Z_y - r_{22}N)$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial Z_0} = -\frac{c}{N^2} (r_{33}Z_x - r_{31}N) \qquad \frac{\partial f_y}{\partial Z_0} = -\frac{c}{N^2} (r_{33}Z_y - r_{32}N)$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial \omega} = -\frac{c}{N} \left[ (\Delta Y r_{33} - \Delta Z r_{23}) \frac{Z_x}{N} - \Delta Y r_{31} + \Delta Z r_{21} \right]$$

$$\frac{\partial f_y}{\partial \omega} = -\frac{c}{N} \left[ (\Delta Y r_{33} - \Delta Z r_{23}) \frac{Z_y}{N} - \Delta Y r_{32} + \Delta Z r_{22} \right]$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial \varphi} = \frac{c}{N} \left[ (Z_x \cos \kappa - Z_y \sin \kappa) \frac{Z_x}{N} + N \cos \kappa \right]$$

$$\frac{\partial f_y}{\partial \varphi} = \frac{c}{N} \left[ (Z_x \cos \kappa - Z_y \sin \kappa) \frac{Z_y}{N} - N \sin \kappa \right]$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial \kappa} = -c \frac{Z_y}{N} \qquad \frac{\partial f_y}{\partial \kappa} = c \frac{Z_x}{N}$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial X} = -\frac{c}{N^2} (r_{11}N - r_{13}Z_x) \qquad \frac{\partial f_y}{\partial X} = -\frac{c}{N^2} (r_{12}N - r_{13}Z_y)$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial Y} = -\frac{c}{N^2} (r_{21}N - r_{23}Z_x) \qquad \frac{\partial f_y}{\partial Y} = -\frac{c}{N^2} (r_{22}N - r_{23}Z_y)$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial Z} = -\frac{c}{N^2} (r_{31}N - r_{33}Z_x) \qquad \frac{\partial f_y}{\partial Z} = -\frac{c}{N^2} (r_{32}N - r_{33}Z_y)$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial c} = -\frac{Z_x}{N} \qquad \frac{\partial f_y}{\partial c} = -\frac{Z_y}{N}$$

## EK-2 Kalibrasyon Dengelemelerinde Kullanılan Ölçümler (Sol Kamera)

İlk görüntüden okunan 88 nokta.

| NO | Objeye Uzak Koordinatları (mm) |        |      | Görüntü Koordinatları (piksel) |        | NO | Objeye Uzak Koordinatları (mm) |        |      | Görüntü Koordinatları (piksel) |        |
|----|--------------------------------|--------|------|--------------------------------|--------|----|--------------------------------|--------|------|--------------------------------|--------|
|    | X                              | Y      | Z    | x                              | y      |    | X                              | Y      | Z    | x                              | y      |
| 1  | 40,98                          | 215,18 | 0,50 | 13,50                          | 20,49  | 45 | 220,85                         | 135,09 | 0,50 | 550,99                         | 273,90 |
| 2  | 40,98                          | 75,02  | 0,50 | 21,82                          | 430,75 | 46 | 240,83                         | 135,09 | 0,50 | 609,87                         | 275,47 |
| 3  | 240,83                         | 215,18 | 0,50 | 624,23                         | 30,25  | 47 | 40,98                          | 155,11 | 0,50 | 14,96                          | 202,04 |
| 4  | 240,83                         | 75,02  | 0,50 | 596,40                         | 448,31 | 48 | 60,97                          | 155,11 | 0,50 | 72,00                          | 203,16 |
| 5  | 60,97                          | 75,02  | 0,50 | 77,48                          | 433,57 | 49 | 80,95                          | 155,11 | 0,50 | 130,38                         | 204,27 |
| 6  | 80,95                          | 75,02  | 0,50 | 133,07                         | 436,08 | 50 | 100,94                         | 155,11 | 0,50 | 189,81                         | 205,27 |
| 7  | 100,94                         | 75,02  | 0,50 | 189,71                         | 439,09 | 51 | 120,92                         | 155,11 | 0,50 | 249,94                         | 206,22 |
| 8  | 120,92                         | 75,02  | 0,50 | 247,72                         | 440,79 | 52 | 140,91                         | 155,11 | 0,50 | 311,33                         | 207,70 |
| 9  | 140,91                         | 75,02  | 0,50 | 306,25                         | 442,82 | 53 | 160,89                         | 155,11 | 0,50 | 372,48                         | 209,04 |
| 10 | 160,89                         | 75,02  | 0,50 | 364,42                         | 444,39 | 54 | 180,88                         | 155,11 | 0,50 | 433,68                         | 210,55 |
| 11 | 180,88                         | 75,02  | 0,50 | 423,11                         | 445,74 | 55 | 200,86                         | 155,11 | 0,50 | 494,21                         | 212,02 |
| 12 | 200,86                         | 75,02  | 0,50 | 480,97                         | 446,66 | 56 | 220,85                         | 155,11 | 0,50 | 554,42                         | 213,98 |
| 13 | 220,85                         | 75,02  | 0,50 | 539,17                         | 447,52 | 57 | 240,83                         | 155,11 | 0,50 | 613,69                         | 215,31 |
| 14 | 40,98                          | 95,04  | 0,50 | 19,96                          | 375,98 | 58 | 40,98                          | 175,13 | 0,50 | 13,84                          | 142,10 |
| 15 | 60,97                          | 95,04  | 0,50 | 75,43                          | 377,93 | 59 | 60,97                          | 175,13 | 0,50 | 71,54                          | 142,65 |
| 16 | 80,95                          | 95,04  | 0,50 | 132,42                         | 380,59 | 60 | 80,95                          | 175,13 | 0,50 | 130,58                         | 143,28 |
| 17 | 100,94                         | 95,04  | 0,50 | 189,47                         | 382,86 | 61 | 100,94                         | 175,13 | 0,50 | 190,00                         | 143,83 |
| 18 | 120,92                         | 95,04  | 0,50 | 248,45                         | 385,06 | 62 | 120,92                         | 175,13 | 0,50 | 251,23                         | 144,69 |
| 19 | 140,91                         | 95,04  | 0,50 | 307,17                         | 386,39 | 63 | 140,91                         | 175,13 | 0,50 | 312,50                         | 145,63 |
| 20 | 160,89                         | 95,04  | 0,50 | 366,83                         | 388,27 | 64 | 160,89                         | 175,13 | 0,50 | 374,36                         | 147,20 |
| 21 | 180,88                         | 95,04  | 0,50 | 425,78                         | 389,21 | 65 | 180,88                         | 175,13 | 0,50 | 435,98                         | 149,00 |
| 22 | 200,86                         | 95,04  | 0,50 | 484,90                         | 390,55 | 66 | 200,86                         | 175,13 | 0,50 | 497,13                         | 150,49 |
| 23 | 220,85                         | 95,04  | 0,50 | 543,30                         | 391,17 | 67 | 220,85                         | 175,13 | 0,50 | 557,41                         | 152,53 |
| 24 | 240,83                         | 95,04  | 0,50 | 601,32                         | 392,35 | 68 | 240,83                         | 175,13 | 0,50 | 617,28                         | 154,30 |
| 25 | 40,98                          | 115,07 | 0,50 | 17,47                          | 318,99 | 69 | 40,98                          | 195,16 | 0,50 | 13,19                          | 81,10  |
| 26 | 60,97                          | 115,07 | 0,50 | 73,95                          | 321,04 | 70 | 60,97                          | 195,16 | 0,50 | 72,14                          | 81,96  |
| 27 | 80,95                          | 115,07 | 0,50 | 130,87                         | 323,10 | 71 | 80,95                          | 195,16 | 0,50 | 130,86                         | 81,73  |
| 28 | 100,94                         | 115,07 | 0,50 | 189,03                         | 324,86 | 72 | 100,94                         | 195,16 | 0,50 | 191,00                         | 82,04  |
| 29 | 120,92                         | 115,07 | 0,50 | 248,37                         | 326,79 | 73 | 120,92                         | 195,16 | 0,50 | 252,07                         | 82,59  |
| 30 | 140,91                         | 115,07 | 0,50 | 308,50                         | 328,59 | 74 | 140,91                         | 195,16 | 0,50 | 314,00                         | 83,45  |
| 31 | 160,89                         | 115,07 | 0,50 | 368,63                         | 329,77 | 75 | 160,89                         | 195,16 | 0,50 | 375,86                         | 84,86  |
| 32 | 180,88                         | 115,07 | 0,50 | 428,94                         | 331,03 | 76 | 180,88                         | 195,16 | 0,50 | 438,42                         | 86,51  |
| 33 | 200,86                         | 115,07 | 0,50 | 488,29                         | 332,36 | 77 | 200,86                         | 195,16 | 0,50 | 499,33                         | 88,39  |
| 34 | 220,85                         | 115,07 | 0,50 | 547,40                         | 333,54 | 78 | 220,85                         | 195,16 | 0,50 | 560,41                         | 90,59  |
| 35 | 240,83                         | 115,07 | 0,50 | 605,42                         | 334,56 | 79 | 240,83                         | 195,16 | 0,50 | 620,85                         | 92,70  |
| 36 | 40,98                          | 135,09 | 0,50 | 15,83                          | 261,44 | 80 | 60,97                          | 215,18 | 0,50 | 71,94                          | 20,08  |
| 37 | 60,97                          | 135,09 | 0,50 | 72,79                          | 262,69 | 81 | 80,95                          | 215,18 | 0,50 | 131,82                         | 19,75  |
| 38 | 80,95                          | 135,09 | 0,50 | 130,54                         | 263,99 | 82 | 100,94                         | 215,18 | 0,50 | 191,87                         | 19,67  |
| 39 | 100,94                         | 135,09 | 0,50 | 189,27                         | 265,75 | 83 | 120,92                         | 215,18 | 0,50 | 253,57                         | 20,06  |
| 40 | 120,92                         | 135,09 | 0,50 | 249,18                         | 267,10 | 84 | 140,91                         | 215,18 | 0,50 | 315,03                         | 20,92  |
| 41 | 140,91                         | 135,09 | 0,50 | 310,00                         | 268,88 | 85 | 160,89                         | 215,18 | 0,50 | 377,44                         | 22,02  |
| 42 | 160,89                         | 135,09 | 0,50 | 370,76                         | 270,37 | 86 | 180,88                         | 215,18 | 0,50 | 439,84                         | 23,82  |
| 43 | 180,88                         | 135,09 | 0,50 | 431,05                         | 271,31 | 87 | 200,86                         | 215,18 | 0,50 | 501,70                         | 25,86  |
| 44 | 200,86                         | 135,09 | 0,50 | 491,49                         | 272,88 | 88 | 220,85                         | 215,18 | 0,50 | 563,00                         | 28,06  |

İkinci görüntüden okunan 96 nokta, ilk görüntü ile aradaki 3B ofset: 958,50 mm.

| NO | Objeye Uzay Koordinatları (mm) |        |      | Görüntü Koordinatları (piksel) |        | NO | Objeye Uzay Koordinatları (mm) |        |      | Görüntü Koordinatları (piksel) |        |
|----|--------------------------------|--------|------|--------------------------------|--------|----|--------------------------------|--------|------|--------------------------------|--------|
|    | X                              | Y      | Z    | x                              | y      |    | X                              | Y      | Z    | x                              | y      |
| 1  | 40,98                          | 215,18 | 0,50 | 270,06                         | 159,59 | 49 | 240,83                         | 135,09 | 0,50 | 372,02                         | 203,53 |
| 2  | 40,98                          | 75,02  | 0,50 | 268,60                         | 232,52 | 50 | 260,82                         | 135,09 | 0,50 | 382,19                         | 203,81 |
| 3  | 260,82                         | 215,18 | 0,50 | 383,51                         | 162,10 | 51 | 40,98                          | 155,11 | 0,50 | 269,08                         | 190,95 |
| 4  | 260,82                         | 75,02  | 0,50 | 381,49                         | 234,47 | 52 | 60,97                          | 155,11 | 0,50 | 279,82                         | 191,37 |
| 5  | 60,97                          | 75,02  | 0,50 | 279,05                         | 232,80 | 53 | 80,95                          | 155,11 | 0,50 | 290,13                         | 191,37 |
| 6  | 80,95                          | 75,02  | 0,50 | 289,09                         | 232,94 | 54 | 100,94                         | 155,11 | 0,50 | 300,58                         | 191,79 |
| 7  | 100,94                         | 75,02  | 0,50 | 299,82                         | 232,94 | 55 | 120,92                         | 155,11 | 0,50 | 310,90                         | 191,93 |
| 8  | 120,92                         | 75,02  | 0,50 | 309,86                         | 233,08 | 56 | 140,91                         | 155,11 | 0,50 | 320,93                         | 192,21 |
| 9  | 140,91                         | 75,02  | 0,50 | 320,03                         | 233,22 | 57 | 160,89                         | 155,11 | 0,50 | 331,38                         | 192,49 |
| 10 | 160,89                         | 75,02  | 0,50 | 330,48                         | 233,64 | 58 | 180,88                         | 155,11 | 0,50 | 341,84                         | 192,49 |
| 11 | 180,88                         | 75,02  | 0,50 | 340,66                         | 233,64 | 59 | 200,86                         | 155,11 | 0,50 | 351,87                         | 192,62 |
| 12 | 200,86                         | 75,02  | 0,50 | 350,83                         | 233,92 | 60 | 220,85                         | 155,11 | 0,50 | 362,18                         | 192,90 |
| 13 | 220,85                         | 75,02  | 0,50 | 361,01                         | 234,06 | 61 | 240,83                         | 155,11 | 0,50 | 372,22                         | 193,18 |
| 14 | 240,83                         | 75,02  | 0,50 | 371,04                         | 234,06 | 62 | 260,82                         | 155,11 | 0,50 | 382,53                         | 193,32 |
| 15 | 40,98                          | 95,04  | 0,50 | 268,88                         | 222,07 | 63 | 40,98                          | 175,13 | 0,50 | 269,64                         | 180,78 |
| 16 | 60,97                          | 95,04  | 0,50 | 279,05                         | 222,07 | 64 | 60,97                          | 175,13 | 0,50 | 279,95                         | 181,06 |
| 17 | 80,95                          | 95,04  | 0,50 | 289,65                         | 222,49 | 65 | 80,95                          | 175,13 | 0,50 | 290,41                         | 181,06 |
| 18 | 100,94                         | 95,04  | 0,50 | 299,68                         | 222,63 | 66 | 100,94                         | 175,13 | 0,50 | 300,58                         | 181,20 |
| 19 | 120,92                         | 95,04  | 0,50 | 309,99                         | 222,91 | 67 | 120,92                         | 175,13 | 0,50 | 310,90                         | 181,61 |
| 20 | 140,91                         | 95,04  | 0,50 | 320,03                         | 223,04 | 68 | 140,91                         | 175,13 | 0,50 | 321,21                         | 181,61 |
| 21 | 160,89                         | 95,04  | 0,50 | 330,62                         | 223,32 | 69 | 160,89                         | 175,13 | 0,50 | 331,80                         | 181,89 |
| 22 | 180,88                         | 95,04  | 0,50 | 340,80                         | 223,18 | 70 | 180,88                         | 175,13 | 0,50 | 341,98                         | 182,03 |
| 23 | 200,86                         | 95,04  | 0,50 | 351,11                         | 223,60 | 71 | 200,86                         | 175,13 | 0,50 | 352,29                         | 182,45 |
| 24 | 220,85                         | 95,04  | 0,50 | 361,14                         | 223,88 | 72 | 220,85                         | 175,13 | 0,50 | 362,32                         | 182,45 |
| 25 | 240,83                         | 95,04  | 0,50 | 371,46                         | 224,02 | 73 | 240,83                         | 175,13 | 0,50 | 372,92                         | 183,01 |
| 26 | 260,82                         | 95,04  | 0,50 | 381,63                         | 224,16 | 74 | 260,82                         | 175,13 | 0,50 | 382,95                         | 182,87 |
| 27 | 40,98                          | 115,07 | 0,50 | 268,74                         | 211,48 | 75 | 40,98                          | 195,16 | 0,50 | 269,50                         | 169,77 |
| 28 | 60,97                          | 115,07 | 0,50 | 279,47                         | 211,90 | 76 | 60,97                          | 195,16 | 0,50 | 280,23                         | 170,32 |
| 29 | 80,95                          | 115,07 | 0,50 | 289,65                         | 212,03 | 77 | 80,95                          | 195,16 | 0,50 | 290,13                         | 170,46 |
| 30 | 100,94                         | 115,07 | 0,50 | 299,68                         | 212,17 | 78 | 100,94                         | 195,16 | 0,50 | 300,86                         | 170,88 |
| 31 | 120,92                         | 115,07 | 0,50 | 309,99                         | 212,45 | 79 | 120,92                         | 195,16 | 0,50 | 310,76                         | 170,74 |
| 32 | 140,91                         | 115,07 | 0,50 | 320,59                         | 212,59 | 80 | 140,91                         | 195,16 | 0,50 | 321,49                         | 171,16 |
| 33 | 160,89                         | 115,07 | 0,50 | 330,62                         | 212,73 | 81 | 160,89                         | 195,16 | 0,50 | 331,80                         | 171,58 |
| 34 | 180,88                         | 115,07 | 0,50 | 340,94                         | 213,01 | 82 | 180,88                         | 195,16 | 0,50 | 342,53                         | 171,58 |
| 35 | 200,86                         | 115,07 | 0,50 | 351,25                         | 213,15 | 83 | 200,86                         | 195,16 | 0,50 | 352,15                         | 172,00 |
| 36 | 220,85                         | 115,07 | 0,50 | 361,70                         | 213,57 | 84 | 220,85                         | 195,16 | 0,50 | 363,02                         | 172,28 |
| 37 | 240,83                         | 115,07 | 0,50 | 371,74                         | 213,71 | 85 | 240,83                         | 195,16 | 0,50 | 373,06                         | 172,55 |
| 38 | 260,82                         | 115,07 | 0,50 | 382,05                         | 214,26 | 86 | 260,82                         | 195,16 | 0,50 | 383,51                         | 172,69 |
| 39 | 40,98                          | 135,09 | 0,50 | 269,02                         | 201,02 | 87 | 60,97                          | 215,18 | 0,50 | 279,95                         | 159,87 |
| 40 | 60,97                          | 135,09 | 0,50 | 279,47                         | 201,44 | 88 | 80,95                          | 215,18 | 0,50 | 290,69                         | 160,15 |
| 41 | 80,95                          | 135,09 | 0,50 | 289,92                         | 202,00 | 89 | 100,94                         | 215,18 | 0,50 | 301,14                         | 160,15 |
| 42 | 100,94                         | 135,09 | 0,50 | 299,82                         | 201,86 | 90 | 120,92                         | 215,18 | 0,50 | 311,59                         | 160,71 |
| 43 | 120,92                         | 135,09 | 0,50 | 310,55                         | 202,14 | 91 | 140,91                         | 215,18 | 0,50 | 321,49                         | 160,71 |
| 44 | 140,91                         | 135,09 | 0,50 | 320,87                         | 202,28 | 92 | 160,89                         | 215,18 | 0,50 | 332,22                         | 160,85 |
| 45 | 160,89                         | 135,09 | 0,50 | 331,04                         | 202,70 | 93 | 180,88                         | 215,18 | 0,50 | 342,25                         | 161,27 |
| 46 | 180,88                         | 135,09 | 0,50 | 341,21                         | 202,84 | 94 | 200,86                         | 215,18 | 0,50 | 352,71                         | 161,54 |
| 47 | 200,86                         | 135,09 | 0,50 | 351,81                         | 203,11 | 95 | 220,85                         | 215,18 | 0,50 | 362,88                         | 161,82 |
| 48 | 220,85                         | 135,09 | 0,50 | 361,98                         | 203,11 | 96 | 240,83                         | 215,18 | 0,50 | 373,47                         | 162,10 |

### EK-3 Kalibrasyon Dengelemelerinde Kullanılan Ölçümler (Sağ Kamera)

İlk görüntüden okunan 88 nokta.

| NO | Objeye Uzaklık Koordinatları (mm) |        |      | Görüntü Koordinatları (piksel) |        | NO | Objeye Uzaklık Koordinatları (mm) |        |      | Görüntü Koordinatları (piksel) |        |
|----|-----------------------------------|--------|------|--------------------------------|--------|----|-----------------------------------|--------|------|--------------------------------|--------|
|    | X                                 | Y      | Z    | x                              | y      |    | X                                 | Y      | Z    | x                              | y      |
| 1  | 60,97                             | 215,18 | 0,50 | 16,48                          | 37,72  | 45 | 240,83                            | 135,09 | 0,50 | 555,20                         | 279,49 |
| 2  | 60,97                             | 75,02  | 0,50 | 34,25                          | 440,67 | 46 | 260,82                            | 135,09 | 0,50 | 614,47                         | 280,04 |
| 3  | 260,82                            | 215,18 | 0,50 | 624,89                         | 32,05  | 47 | 60,97                             | 155,11 | 0,50 | 22,49                          | 216,67 |
| 4  | 260,82                            | 75,02  | 0,50 | 604,09                         | 454,12 | 48 | 80,95                             | 155,11 | 0,50 | 78,12                          | 216,70 |
| 5  | 80,95                             | 75,02  | 0,50 | 87,93                          | 442,70 | 49 | 100,94                            | 155,11 | 0,50 | 134,80                         | 216,94 |
| 6  | 100,94                            | 75,02  | 0,50 | 142,99                         | 444,94 | 50 | 120,92                            | 155,11 | 0,50 | 192,82                         | 216,55 |
| 7  | 120,92                            | 75,02  | 0,50 | 198,02                         | 446,97 | 51 | 140,91                            | 155,11 | 0,50 | 252,64                         | 216,94 |
| 8  | 140,91                            | 75,02  | 0,50 | 255,06                         | 448,74 | 52 | 160,89                            | 155,11 | 0,50 | 312,85                         | 216,94 |
| 9  | 160,89                            | 75,02  | 0,50 | 312,52                         | 450,54 | 53 | 180,88                            | 155,11 | 0,50 | 374,39                         | 217,56 |
| 10 | 180,88                            | 75,02  | 0,50 | 370,63                         | 451,55 | 54 | 200,86                            | 155,11 | 0,50 | 435,46                         | 217,88 |
| 11 | 200,86                            | 75,02  | 0,50 | 429,00                         | 452,48 | 55 | 220,85                            | 155,11 | 0,50 | 496,92                         | 218,43 |
| 12 | 220,85                            | 75,02  | 0,50 | 487,95                         | 453,08 | 56 | 240,83                            | 155,11 | 0,50 | 556,98                         | 219,05 |
| 13 | 240,83                            | 75,02  | 0,50 | 545,94                         | 453,12 | 57 | 260,82                            | 155,11 | 0,50 | 618,05                         | 219,21 |
| 14 | 60,97                             | 95,04  | 0,50 | 31,08                          | 386,44 | 58 | 60,97                             | 175,13 | 0,50 | 19,88                          | 157,46 |
| 15 | 80,95                             | 95,04  | 0,50 | 84,96                          | 388,49 | 59 | 80,95                             | 175,13 | 0,50 | 76,46                          | 157,30 |
| 16 | 100,94                            | 95,04  | 0,50 | 140,41                         | 390,18 | 60 | 100,94                            | 175,13 | 0,50 | 133,24                         | 156,60 |
| 17 | 120,92                            | 95,04  | 0,50 | 197,00                         | 392,02 | 61 | 120,92                            | 175,13 | 0,50 | 192,33                         | 156,15 |
| 18 | 140,91                            | 95,04  | 0,50 | 253,97                         | 393,31 | 62 | 140,91                            | 175,13 | 0,50 | 252,09                         | 155,89 |
| 19 | 160,89                            | 95,04  | 0,50 | 312,69                         | 394,86 | 63 | 160,89                            | 175,13 | 0,50 | 313,09                         | 155,40 |
| 20 | 180,88                            | 95,04  | 0,50 | 371,51                         | 395,43 | 64 | 180,88                            | 175,13 | 0,50 | 374,71                         | 155,58 |
| 21 | 200,86                            | 95,04  | 0,50 | 431,01                         | 396,25 | 65 | 200,86                            | 175,13 | 0,50 | 436,56                         | 155,97 |
| 22 | 220,85                            | 95,04  | 0,50 | 490,11                         | 396,68 | 66 | 220,85                            | 175,13 | 0,50 | 498,16                         | 156,15 |
| 23 | 240,83                            | 95,04  | 0,50 | 549,11                         | 396,99 | 67 | 240,83                            | 175,13 | 0,50 | 559,57                         | 157,07 |
| 24 | 260,82                            | 95,04  | 0,50 | 608,06                         | 396,96 | 68 | 260,82                            | 175,13 | 0,50 | 620,25                         | 157,70 |
| 25 | 60,97                             | 115,07 | 0,50 | 27,49                          | 331,44 | 69 | 60,97                             | 195,16 | 0,50 | 18,59                          | 98,69  |
| 26 | 80,95                             | 115,07 | 0,50 | 82,47                          | 332,44 | 70 | 80,95                             | 195,16 | 0,50 | 74,43                          | 96,96  |
| 27 | 100,94                            | 115,07 | 0,50 | 138,24                         | 333,99 | 71 | 100,94                            | 195,16 | 0,50 | 132,75                         | 96,12  |
| 28 | 120,92                            | 115,07 | 0,50 | 195,01                         | 335,03 | 72 | 120,92                            | 195,16 | 0,50 | 191,63                         | 94,60  |
| 29 | 140,91                            | 115,07 | 0,50 | 253,67                         | 335,66 | 73 | 140,91                            | 195,16 | 0,50 | 252,10                         | 94,24  |
| 30 | 160,89                            | 115,07 | 0,50 | 312,84                         | 336,91 | 74 | 160,89                            | 195,16 | 0,50 | 313,07                         | 93,43  |
| 31 | 180,88                            | 115,07 | 0,50 | 372,68                         | 337,76 | 75 | 180,88                            | 195,16 | 0,50 | 375,29                         | 93,09  |
| 32 | 200,86                            | 115,07 | 0,50 | 432,49                         | 338,21 | 76 | 200,86                            | 195,16 | 0,50 | 437,09                         | 93,27  |
| 33 | 220,85                            | 115,07 | 0,50 | 492,75                         | 338,56 | 77 | 220,85                            | 195,16 | 0,50 | 499,89                         | 94,13  |
| 34 | 240,83                            | 115,07 | 0,50 | 552,39                         | 339,18 | 78 | 240,83                            | 195,16 | 0,50 | 561,04                         | 94,53  |
| 35 | 260,82                            | 115,07 | 0,50 | 611,47                         | 339,50 | 79 | 260,82                            | 195,16 | 0,50 | 622,92                         | 95,26  |
| 36 | 60,97                             | 135,09 | 0,50 | 24,84                          | 274,32 | 80 | 80,95                             | 215,18 | 0,50 | 74,15                          | 36,36  |
| 37 | 80,95                             | 135,09 | 0,50 | 80,11                          | 275,33 | 81 | 100,94                            | 215,18 | 0,50 | 131,54                         | 34,48  |
| 38 | 100,94                            | 135,09 | 0,50 | 136,01                         | 275,96 | 82 | 120,92                            | 215,18 | 0,50 | 191,54                         | 33,43  |
| 39 | 120,92                            | 135,09 | 0,50 | 194,02                         | 276,98 | 83 | 140,91                            | 215,18 | 0,50 | 251,80                         | 31,50  |
| 40 | 140,91                            | 135,09 | 0,50 | 252,98                         | 277,06 | 84 | 160,89                            | 215,18 | 0,50 | 313,39                         | 31,13  |
| 41 | 160,89                            | 135,09 | 0,50 | 312,95                         | 278,00 | 85 | 180,88                            | 215,18 | 0,50 | 375,49                         | 30,43  |
| 42 | 180,88                            | 135,09 | 0,50 | 373,00                         | 278,08 | 86 | 200,86                            | 215,18 | 0,50 | 438,60                         | 30,77  |
| 43 | 200,86                            | 135,09 | 0,50 | 434,23                         | 278,71 | 87 | 220,85                            | 215,18 | 0,50 | 500,56                         | 30,95  |
| 44 | 220,85                            | 135,09 | 0,50 | 494,75                         | 278,94 | 88 | 240,83                            | 215,18 | 0,50 | 563,04                         | 31,42  |

İkinci görüntüden okunan 96 nokta, ilk görüntü ile aradaki 3B ofset: 976,20 mm.

| NO | Objeye Uzaklık Koordinatları (mm) |        |      | Görüntü Koordinatları (piksel) |        | NO | Objeye Uzaklık Koordinatları (mm) |        |      | Görüntü Koordinatları (piksel) |        |
|----|-----------------------------------|--------|------|--------------------------------|--------|----|-----------------------------------|--------|------|--------------------------------|--------|
|    | X                                 | Y      | Z    | x                              | y      |    | X                                 | Y      | Z    | x                              | y      |
| 1  | 40,98                             | 215,18 | 0,50 | 279,81                         | 161,59 | 49 | 240,83                            | 135,09 | 0,50 | 381,74                         | 202,78 |
| 2  | 40,98                             | 75,02  | 0,50 | 279,82                         | 232,92 | 50 | 260,82                            | 135,09 | 0,50 | 391,63                         | 202,92 |
| 3  | 260,82                            | 215,18 | 0,50 | 392,01                         | 161,86 | 51 | 40,98                             | 155,11 | 0,50 | 279,44                         | 192,46 |
| 4  | 260,82                            | 75,02  | 0,50 | 391,18                         | 233,33 | 52 | 60,97                             | 155,11 | 0,50 | 289,89                         | 192,46 |
| 5  | 60,97                             | 75,02  | 0,50 | 289,99                         | 233,19 | 53 | 80,95                             | 155,11 | 0,50 | 300,06                         | 192,46 |
| 6  | 80,95                             | 75,02  | 0,50 | 299,89                         | 233,05 | 54 | 100,94                            | 155,11 | 0,50 | 310,10                         | 192,46 |
| 7  | 100,94                            | 75,02  | 0,50 | 310,06                         | 233,19 | 55 | 120,92                            | 155,11 | 0,50 | 320,27                         | 192,46 |
| 8  | 120,92                            | 75,02  | 0,50 | 320,10                         | 233,05 | 56 | 140,91                            | 155,11 | 0,50 | 330,59                         | 192,60 |
| 9  | 140,91                            | 75,02  | 0,50 | 330,27                         | 233,05 | 57 | 160,89                            | 155,11 | 0,50 | 340,54                         | 192,51 |
| 10 | 160,89                            | 75,02  | 0,50 | 340,59                         | 233,19 | 58 | 180,88                            | 155,11 | 0,50 | 351,07                         | 192,49 |
| 11 | 180,88                            | 75,02  | 0,50 | 350,62                         | 233,33 | 59 | 200,86                            | 155,11 | 0,50 | 361,00                         | 192,49 |
| 12 | 200,86                            | 75,02  | 0,50 | 360,80                         | 233,33 | 60 | 220,85                            | 155,11 | 0,50 | 371,66                         | 192,42 |
| 13 | 220,85                            | 75,02  | 0,50 | 370,97                         | 233,61 | 61 | 240,83                            | 155,11 | 0,50 | 381,38                         | 192,60 |
| 14 | 240,83                            | 75,02  | 0,50 | 381,14                         | 233,19 | 62 | 260,82                            | 155,11 | 0,50 | 391,73                         | 192,70 |
| 15 | 40,98                             | 95,04  | 0,50 | 279,99                         | 222,98 | 63 | 40,98                             | 175,13 | 0,50 | 279,46                         | 181,93 |
| 16 | 60,97                             | 95,04  | 0,50 | 289,89                         | 222,98 | 64 | 60,97                             | 175,13 | 0,50 | 289,85                         | 182,07 |
| 17 | 80,95                             | 95,04  | 0,50 | 299,92                         | 223,26 | 65 | 80,95                             | 175,13 | 0,50 | 299,88                         | 182,07 |
| 18 | 100,94                            | 95,04  | 0,50 | 310,10                         | 223,12 | 66 | 100,94                            | 175,13 | 0,50 | 310,06                         | 182,07 |
| 19 | 120,92                            | 95,04  | 0,50 | 320,13                         | 223,12 | 67 | 120,92                            | 175,13 | 0,50 | 320,51                         | 182,07 |
| 20 | 140,91                            | 95,04  | 0,50 | 330,17                         | 223,26 | 68 | 140,91                            | 175,13 | 0,50 | 330,40                         | 182,07 |
| 21 | 160,89                            | 95,04  | 0,50 | 340,34                         | 223,26 | 69 | 160,89                            | 175,13 | 0,50 | 340,72                         | 182,35 |
| 22 | 180,88                            | 95,04  | 0,50 | 350,94                         | 222,98 | 70 | 180,88                            | 175,13 | 0,50 | 350,89                         | 182,07 |
| 23 | 200,86                            | 95,04  | 0,50 | 360,69                         | 223,40 | 71 | 200,86                            | 175,13 | 0,50 | 361,35                         | 182,35 |
| 24 | 220,85                            | 95,04  | 0,50 | 371,01                         | 223,12 | 72 | 220,85                            | 175,13 | 0,50 | 371,62                         | 182,28 |
| 25 | 240,83                            | 95,04  | 0,50 | 381,18                         | 223,26 | 73 | 240,83                            | 175,13 | 0,50 | 381,83                         | 182,49 |
| 26 | 260,82                            | 95,04  | 0,50 | 391,21                         | 223,26 | 74 | 260,82                            | 175,13 | 0,50 | 391,73                         | 182,07 |
| 27 | 40,98                             | 115,07 | 0,50 | 279,58                         | 212,53 | 75 | 40,98                             | 195,16 | 0,50 | 279,53                         | 171,90 |
| 28 | 60,97                             | 115,07 | 0,50 | 289,75                         | 212,95 | 76 | 60,97                             | 195,16 | 0,50 | 290,13                         | 172,04 |
| 29 | 80,95                             | 115,07 | 0,50 | 299,92                         | 212,95 | 77 | 80,95                             | 195,16 | 0,50 | 300,02                         | 171,90 |
| 30 | 100,94                            | 115,07 | 0,50 | 310,10                         | 212,95 | 78 | 100,94                            | 195,16 | 0,50 | 310,06                         | 171,90 |
| 31 | 120,92                            | 115,07 | 0,50 | 320,13                         | 212,95 | 79 | 120,92                            | 195,16 | 0,50 | 319,95                         | 171,90 |
| 32 | 140,91                            | 115,07 | 0,50 | 330,03                         | 212,95 | 80 | 140,91                            | 195,16 | 0,50 | 330,96                         | 171,90 |
| 33 | 160,89                            | 115,07 | 0,50 | 340,48                         | 213,09 | 81 | 160,89                            | 195,16 | 0,50 | 340,86                         | 171,90 |
| 34 | 180,88                            | 115,07 | 0,50 | 351,08                         | 212,95 | 82 | 180,88                            | 195,16 | 0,50 | 351,03                         | 171,90 |
| 35 | 200,86                            | 115,07 | 0,50 | 361,11                         | 212,95 | 83 | 200,86                            | 195,16 | 0,50 | 360,93                         | 171,90 |
| 36 | 220,85                            | 115,07 | 0,50 | 371,01                         | 213,09 | 84 | 220,85                            | 195,16 | 0,50 | 371,80                         | 172,04 |
| 37 | 240,83                            | 115,07 | 0,50 | 381,04                         | 213,09 | 85 | 240,83                            | 195,16 | 0,50 | 381,91                         | 171,98 |
| 38 | 260,82                            | 115,07 | 0,50 | 391,63                         | 213,09 | 86 | 260,82                            | 195,16 | 0,50 | 392,01                         | 172,04 |
| 39 | 40,98                             | 135,09 | 0,50 | 279,72                         | 202,64 | 87 | 60,97                             | 215,18 | 0,50 | 289,71                         | 161,31 |
| 40 | 60,97                             | 135,09 | 0,50 | 289,75                         | 202,36 | 88 | 80,95                             | 215,18 | 0,50 | 299,88                         | 161,45 |
| 41 | 80,95                             | 135,09 | 0,50 | 299,92                         | 202,50 | 89 | 100,94                            | 215,18 | 0,50 | 310,06                         | 161,45 |
| 42 | 100,94                            | 135,09 | 0,50 | 310,10                         | 202,36 | 90 | 120,92                            | 215,18 | 0,50 | 320,65                         | 161,45 |
| 43 | 120,92                            | 135,09 | 0,50 | 320,27                         | 202,78 | 91 | 140,91                            | 215,18 | 0,50 | 330,68                         | 161,45 |
| 44 | 140,91                            | 135,09 | 0,50 | 330,31                         | 202,78 | 92 | 160,89                            | 215,18 | 0,50 | 340,72                         | 161,59 |
| 45 | 160,89                            | 135,09 | 0,50 | 340,76                         | 202,78 | 93 | 180,88                            | 215,18 | 0,50 | 351,03                         | 161,45 |
| 46 | 180,88                            | 135,09 | 0,50 | 350,80                         | 202,64 | 94 | 200,86                            | 215,18 | 0,50 | 361,76                         | 161,59 |
| 47 | 200,86                            | 135,09 | 0,50 | 361,11                         | 202,92 | 95 | 220,85                            | 215,18 | 0,50 | 371,52                         | 161,45 |
| 48 | 220,85                            | 135,09 | 0,50 | 371,01                         | 202,78 | 96 | 240,83                            | 215,18 | 0,50 | 381,97                         | 161,73 |