

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**

**ÜRETİM SÜREÇLERİ İÇİN DİNAMİK VE TEMASSIZ OPTİK ÇAP
ÖLÇÜM SİSTEMİ**

HAZIRLAYAN

AYNUR DİDEM OKTAN KARAYEĞEN

DOKTORA TEZİ

ANKARA – 2025

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**

**ÜRETİM SÜREÇLERİ İÇİN DİNAMİK VE TEMASSIZ OPTİK ÇAP
ÖLÇÜM SİSTEMİ**

HAZIRLAYAN

AYNUR DİDEM OKTAN KARAYEĞEN

DOKTORA TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ HÜSEYİN KURTULDU

ANKARA – 2025

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı Biyomedikal Mühendisliği Doktora Programı çerçevesinde Aynur Didem OKTAN KARAYEĞEN tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 10 / 07 / 2025

Tez Adı: Üretim Süreçleri için Dinamik ve Temassız Optik Çap Ölçüm Sistemi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin KURTULDU	Başkent Üniversitesi	
Prof. Dr. Zafer DURSUNKAYA	Orta Doğu Teknik Üniversitesi	
Prof. Dr. Ziya TELATAR	Başkent Üniversitesi	
Prof. Dr. Barbaros ÇETİN	Bilkent Üniversitesi	
Dr. Öğr. Üyesi O.Erdem HABERAL	Başkent Üniversitesi	

ONAY

Prof. Dr. Dilek ÇÖKELİLER SERDAROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 18 / 07 / 2025

Öğrencinin Adı, Soyadı : Aynur Didem OKTAN KARAYEĞEN

Öğrencinin Numarası : 21820370

Anabilim Dalı : Biyomedikal Mühendisliği

Programı : Biyomedikal Mühendisliği Doktora Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin KURTULDU

Tez Başlığı : Üretim Süreçleri için Dinamik ve Temassız Optik Çap Ölçüm Sistemi

Yukarıda başlığı belirtilen Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 88 sayfalık kısmına ilişkin, 18/07/2025 tarihinde tez danışmanım tarafından turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 1'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

ONAY

Tarih: 18 / 07 / 2025

Öğrenci Danışmanı:

Dr.Öğr.Üyesi Hüseyin KURTULDU

Başta canım amcam olmak üzere, en büyük şansım aileme...

Aynur Didem OKTAN KARAYEĞEN

Temmuz-2025

TEŞEKKÜR

Sayın Dr. Öğr. Üyesi HÜSEYİN KURTULDU'ya, çalışmanın her aşamasında gösterdiği değerli rehberlik, bilimsel bakış açısı ve bu inişli çıkışlı yolculukta her zaman yanımda olduğu için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sayın Prof. Dr. Barbaros ÇETİN'e ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Orhan Erdem HABERAL'a, tez çalışmamın değerlendirme sürecindeki kıymetli katkıları ve yol gösterici eleştirileri için teşekkür ederim.

Tez savunma sunumumda yer alan değerli hocalarım Prof. Dr. Zafer DURSUNKAYA ve Prof. Dr. Ziya TELATAR'a tüm katkıları için teşekkür ederim.

Bu süreçte her aşamada gerek bilgilerini, gerek deneyimlerini paylaşmaktan sakınmayan Sayın Dr. Göksel DURKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım. Beni destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen Sinan KÖKSÜ'ya teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte yanımda olan ve desteklerini hep hissettiğim çalışma arkadaşlarıma ve hocalarıma teşekkür ederim.

İçine doğduğum ve seçtiğim aileme/arkadaşlarıma ne kadar teşekkür etsem az; iyi ki varsınız! Canım babam, annem, abim... İyi ki sizler varsınız, ne kadar şanslı olduğumu ifade edebilecek bir kelime yok... Güneş'im... Halasının bir tanesi, iyi ki doğdun! Sevgili eşim, Canım Gökay'ım, iyi ki sen! Varlığınız ve desteğinizle bu süreci baş edilebilir kıldığınız için hepinize minnettarım.

Kendimi kötü hissettiğim zamanlarda sessiz ama tarifsiz sevgileriyle yanımda olan minik dostlarıma da sonsuz teşekkürler... Dilerim dünya bir gün sizin gibi masum ruhlar için daha adil ve güzel bir yer olur. Canım Dora, sadece bakışlarıyla bile bana çok şey kattın. Seninle daha iyi bir insan oldum; iyi ki vardın! Canım Arwen, iyi ki varsın!

ÖZET

Aynur Didem OKTAN KARAYEĞEN

ÜRETİM SÜREÇLERİ İÇİN DİNAMİK VE TEMASSIZ OPTİK ÇAP ÖLÇÜM SİSTEMİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı

2025

Bu tez çalışmasında, üretim süreçlerinde hareket halindeki silindirik nesnelerin çap ölçümünü temassız ve yüksek hassasiyetle gerçekleştirebilen dört farklı optik sistem tasarlandı ve uygulamaya alındı. Geliştirilen sistemler; 360° yüzey görüntüleme, lenssiz gölge görüntüleme yöntemi, telesentrik görüntüleme, ve telesentrik gölge görüntüleme sistemi olarak sınıflandırıldı. Sistemlerin doğruluk, tekrarlanabilirlik ve gerçek zamanlı ölçüm performanslarını değerlendirmek amacıyla çeşitli çaplara sahip referans çubuklar ve endüstriyel vidalar üzerinde deneysel ölçümler gerçekleştirildi. Ölçümler, kaliper ile elde edilen referans verilerle karşılaştırıldı ve literatürdeki sistemlerle kıyaslandı.

Bu süreçte, görüntülerin işlenmesi, kenarların hassas tespiti ve çap hesaplamalarının otomatik şekilde yapılabilmesi amacıyla bir görüntü işleme yazılımı geliştirildi ve bütün analiz adımlarını içeren bir ölçüm doğrulama altyapısı oluşturuldu. Özellikle telesentrik gölge görüntüleme sisteminde, farklı açılardan alınan görüntülerde $\pm 0,02$ mm sapma ile yüksek doğruluk elde edildi. Geliştirilen yazılım sayesinde, tıbbi vidaların iç ve dış çapları otomatik olarak hesaplandı ve sistemin dişli yapıların analizinde de güvenilir ölçüm sağladığı gösterildi.

Sonuçlar, geliştirilen sistemlerin otomotiv, tıbbi cihaz üretimi ve genel endüstriyel kalite kontrol gibi alanlarda kullanılan tolerans sınırlarını başarıyla karşıladığını ortaya koydu. Ancak havacılık ve savunma sanayi gibi daha yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalar için, sistemin optik bileşenlerinde iyileştirmeler yapılması ve daha ileri kalibrasyon teknikleriyle desteklenmesi gerektiği sonucuna varıldı.

ANAHTAR KELİMELER: Telesentrik görüntüleme, gölge görüntüleme, çap ölçümü, görüntü işleme, optik metroloji

ABSTRACT

Aynur Didem OKTAN KARAYEĞEN

DYNAMIC AND NON-CONTACT OPTICAL DIAMETER MEASUREMENT SYSTEM FOR MANUFACTURING PROCESSES

Başkent University Institute of Sciences

Department of Biomedical Engineering

2025

In this thesis, we designed and implemented four distinct optical systems capable of measuring the diameter of cylindrical objects (rods and screws) in motion during production processes without contact and with high precision. The developed systems were classified as 360° surface imaging, lensless shadow imaging method, telecentric imaging, and telecentric shadow imaging system. To assess the precision, repeatability, and real-time measurement capabilities of these systems, we performed experimental measurements on reference rods and industrial screws with different diameters. The outcomes were contrasted with established systems in the literature and reference data obtained using callipers.

During this process, we developed image processing software for image analysis, precise edge detection, and automatic diameter calculations, along with a measurement verification framework that encompasses all analytical steps. Notably, the telecentric shadow imaging system achieved high accuracy, with a deviation of ± 0.02 mm in images captured from different angles. The developed software also enabled the automatic calculation of the inner and outer diameters of medical screws, demonstrating the system's reliability in analyzing gear structures.

The results indicated that the developed systems effectively met the tolerance limits required in fields such as automotive manufacturing, medical device production, and general industrial quality control. However, it was determined that for applications necessitating higher precision, such as those in the aerospace and defense industries, enhancements to the optical components of the systems are essential, along with the implementation of more advanced calibration techniques.

KEYWORDS: Telecentric imaging, shadow imaging, diameter measurement, image processing, optical metrology

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Problem Tanımı	1
1.2. Tezin Amacı	3
2. GENEL BİLGİLER.....	5
2.1. Çap Ölçüm Yöntemleri: Temaslı ve Temassız Sistemler.....	5
2.2. Görüntü İşleme Tabanlı Optik Ölçüm Sistemleri.....	10
2.2.1. Donanım bileşenleri.....	10
2.2.2. Hassas ölçüm için yazılım teknikleri	13
2.3. Gölge Projeksiyonu Yöntemi	18
2.4. Telesentrik Görüntüleme Sistemleri	20
2.5. Biyomedikal Uygulamalarda Çap Ölçümü	23
3. METODOLOJİ.....	26
3.1. Veri Toplama ve Analiz Yöntemleri	26
3.2. Görüntü İşleme ve Analizi	28
3.3. Optik Sistemler ve Tasarımları	37
3.3.1. 360° Görüntüleme sistemi.....	38
3.3.2. Gölge görüntüleme sistemi	53
3.3.3. Telesentrik gölge görüntüleme sistemi.....	55
3.3.4. Telesentrik Görüntüleme Sistemi.....	56
4. BULGULAR	62
4.1. Gölge Görüntüleme Sistemi.....	62
4.2. Telesentrik Gölge Görüntüleme Sistemi.....	67
4.3. Telesentrik Görüntüleme Sistemi.....	71
5. TARTIŞMA	79
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	86

KAYNAKLAR	89
EKLER	99
EK-1: ZEMAX Simülasyon Programı Optik Sistem Tasarım Parametreleri	99



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Kameranın farklı uzaklıklardaki odak mesafesinin hesaplanması.....	42
Tablo 3.2. Belirtilen uzaklık değerleri için, hareket eden ya da yanlış konumlandırılan cisimden elde edilen görüntülerdeki piksel farklılıklarının hesaplanması.....	43
Tablo 3.3. Zemax OpticStudio yazılımında, renk filtresi kullanılan tasarıma ait dört farklı dedektör konumunda elde edilen merkez koordinatları ve RMS nokta yarıçapı değerleri. Her dedektör için X ve Y eksenlerindeki RMS bileşenleri de verilmiştir.	60
Tablo 3.4. Zemax OpticStudio yazılımında, renk filtresi kullanılmayan (filtresiz) tasarıma ait dört dedektör konumunda elde edilen ışın verileri. Her dedektör için ışının merkez konumu (X ve Y), RMS nokta yarıçapı ile X ve Y bileşenlerine ait değerler verilmiştir.	61
Tablo 4.1. Orijinal ve 8'er piksel atlamalı örnekleme ile elde edilen kalibrasyon verilerine ait çap ölçüm sonuçları.	65
Tablo 4.2. Kalibrasyonla birlikte bilinmeyen çapta çubuklarla ölçümden elde edilen çap değerleri.....	67
Tablo 4.3. Şekil 4.13'teki farklı açı konfigürasyonlarına göre elde edilen vida görüntülerinden ölçülen iç ve dış çap değerleri.	77
Tablo 5.1. Dinamik/temassız optik çap ölçüm sistemlerinin karşılaştırılması (geçtiğimiz ~20 yıldaki seçilmiş çalışmalar). Her satır aydınlatmayı, tekniği, çözünürlüğü, aralığı, hassasiyeti, maliyeti ve uygulama alanını gösterir. (STD = ölçümün standart sapması)	84
Tablo 5.2. Biyomedikal uygulamalardaki standart çap toleransları ve önerilen optik sistemlerin kullanılabilirliği.....	85

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Telesentrik lenslerle oluşturulmuş gölge projeksiyon tabanlı optik çap ölçüm sisteminin şematik gösterimi.	21
Şekil 3.1. İki paralel çizgi arasındaki en kısa mesafenin geometrik olarak belirlenmesi.....	26
Şekil 3.2. İki boyutlu düzlemde iki nokta arasındaki Öklidyen uzaklığın geometrik temsili	27
Şekil 3.3. İki boyutlu düzlemde iki çizgi arasındaki en kısa Öklidyen mesafenin geometrik gösterimi	27
Şekil 3.4. Farklı konumlara yerleştirilmiş 8 mm referans çubuğuna ait simüle edilmiş dijital görüntüler: a) Sol kenara yakın yerleştirilmiş çubuk görüntüsü, b) Görüş alanının merkezine yerleştirilmiş çubuk görüntüsü, c) Sağ kenara yakın yerleştirilmiş çubuk görüntüsü.....	30
Şekil 3.5. Farklı açılarda döndürülen 8 mm referans çubuğuna ait simüle edilmiş dijital görüntüler: a) 0° döndürülmüş çubuk görüntüsü, b) 5° döndürülmüş çubuk görüntüsü, c) 15° döndürülmüş çubuk görüntüsü, d) 25° döndürülmüş çubuk görüntüsü.	30
Şekil 3.6. SBM yönteminin 15° döndürülmüş çubuk görüntüsünde farklı segmentler için oluşturduğu hata dağılımı: a) Segment 1, 5, 10, 20 ve 40 için ROI [%] aralığında genel hata dağılımı, b) ROI = 40–60 aralığına ait detaylı segment analizi, c) ROI = 80–100 aralığına ait detaylı segment analizi.	32
Şekil 3.7. SBM yönteminin 25° döndürülmüş çubuk görüntüsünde farklı segmentler için oluşturduğu hata dağılımı: a) Segment 1, 5, 10, 20 ve 40 için ROI [%] aralığında genel hata dağılımı, b) ROI = 40–60 aralığına ait detaylı segment analizi, c) ROI = 80–100 aralığına ait detaylı segment analizi.	33
Şekil 3.8. ROI %50 sabit iken SBM yönteminin segment 1, 5, 10, 20 ve 40 için açıya bağlı çap ölçüm hataları: a) 0°–25° arası genel eğilim, b) 12°–18° aralığına ait detaylı hata incelemesi.....	34
Şekil 3.9. ROI %90 sabit iken SBM yönteminin segment 1, 5, 10, 20 ve 40 için açıya bağlı çap ölçüm hataları: a) 0°–25° arası genel eğilim, b) 12°–18° aralığına ait detaylı hata incelemesi.....	35
Şekil 3.10. SBM yöntemiyle Segment 5 için interpolasyon değerinin hata üzerindeki etkisi: a) Dönme derecesi 25° iken farklı ROI değerleri, b) ROI = %90 iken 0°–25° arası farklı dönme derecelerine karşılık hata dağılımı.....	36
Şekil 3.11. SBM ve DBM yöntemlerinin dönme açısı ve ROI değerine karşı çap ölçüm hatalarının karşılaştırılması: a) ROI = %50, b) ROI = %90	37

Şekil 3.12.	360° görüntüleme için altı aynalı bi-telesentrik optik sistem tasarımının şematik gösterimi.	41
Şekil 3.13.	Düzlemsel bir aynaya dik doğrultuda gelen ışığın, aynanın eğimine bağlı olarak yansıma yönünün değişimini gösteren geometrik model. Ayna eğim açısı (θ), gelen ışık ile yüzey normali arasındaki açı (α) ve yansıma açısı (β) ile ilişkinin gösterimi.	41
Şekil 3.14.	İki aynalı optik sistem kullanılarak kameradan elde edilen örnek görüntü	42
Şekil 3.15.	Farklı ayna açılarında gerçekleştirilen ayna–ışık kaynağı konfigürasyonları: a) 45°, b) 28°, c) 18°	45
Şekil 3.16.	İki aynalı optik sistemin COMSOL simülasyonu ve eşit optik yol uzunluğu hedefiyle yapılan tasarım modeli: a) COMSOL simülasyonu ile oluşturulan iki aynalı sistemin 3D yüzey analiz modeli, b) Eşit optik yol uzunlukları sağlamak üzere geliştirilen iki aynalı sistemin şematik tasarımı.	45
Şekil 3.17.	Ayna açıları (θ , α , β), yatay konumlar (w_1 , w_2), düşey konumlar (h_1 , h_2 , h_3) ve nesne çapı ($2r$) arasındaki ilişkilerin gösterildiği geometrik model.....	46
Şekil 3.18.	Bi-telesentrik optik sistemin üç aşaması: a) COMSOL’da oluşturulan optik model, b) fiziksel kurulumun üstten görünümü, c) sistemden alınan gerçek kamera görüntüsü.....	47
Şekil 3.19.	Nesne, kamera ve ışık kaynağının karşılıklı konumlandırıldığı sistem tasarımı. a) Nesne–kamera–ışık kaynağı düzeninin şematik gösterimi, b) Laboratuvar ortamında kurulan fiziksel sistem görünümü.	48
Şekil 3.20.	10 mm odak uzaklığı ve minimum diyafram açıklığıyla, farklı nesne–ekran mesafelerinde elde edilen gölge görüntüleri. a) Referans, b) 18 mm, c) 25 mm, d) 38 mm mesafe.....	49
Şekil 3.21.	10 mm odak uzaklığı ve minimum diyafram açıklığıyla, farklı nesne–ekran mesafelerinde elde edilen gölge görüntüleri. a) Referans, b) 18 mm, c) 25 mm, d) 38 mm mesafe.....	49
Şekil 3.22.	Matematiksel model: ayna açısı α , ayna genişliği w ve cisim–ayna mesafesi d ile tanımlanan kenar ve merkez konumları	50
Şekil 3.23.	Analitik model sonuçlarına göre kurulan dört aynalı görüntüleme düzeni: a) Kamera ve dört aynadan oluşan optik şema, b) Aynalar, ışık kaynağı ve referans çubuğun yerleşimi.	51
Şekil 3.24.	Sabitlenen sistemin farklı açılardan görünümü: (a) Sistemin genel görünümü, (b) Görüntüleme bölümü, (c) Kameradan alınan görüntü (6 mm çubuk).	52
Şekil 3.25.	İki kameralı gölge ölçüm sisteminin şematik diyagramı	53
Şekil 3.26.	LED Aydınlatmalı Gölge Görüntüleme Sistemi.....	54

Şekil 3.27.	İki kameralı sistemden alınan görüntüler: (a) Kamera 1, (b) Kamera 2. SBM metoduda göre hesaplanan piksel tabanlı çap değerleri sırasıyla 331,15 (Kamera 1) ve 318,70 (Kamera 2) olarak belirlendi.....	54
Şekil 3.28.	Telesentrik gölge görüntüleme sistemine ait optik düzenek: (a) Optik bileşenlerin şematik gösterimi. Sistemde sırasıyla bir ayna (M), iki yakınsak lens [L1: 25 mm odak uzaklığı, L2: 35 mm odak uzaklığı], bir iğne deliği (PH), bir objektif lens (OBJ), bir bant geçiren filtre (F), bir akromatik lens (L4) ve bir ekran (S) bulunmaktadır. (b) Gerçek sistemden bir kesit görüntüsü.	55
Şekil 3.29.	Kamera tarafından yakalanan bir çubuğun anlık görüntüsü	56
Şekil 3.30.	Telesentrik gölge görüntüleme sisteminin tasarımı ve kurulumu: (a) Optik sistemin şematik yerleşimi. Şemada; odak uzaklıkları sırasıyla 100 mm ve 35 mm olan iki yakınsak lens (L1 ve L2), bir iğne deliği (PH), bir bant geçiren filtre (F) ve iki adet akromatik lens (L3 ve L4) yer almaktadır. (b) İki adet 2 inç çapında akromatik lens kullanılarak oluşturulan fiziksel sistem görüntüsü.	57
Şekil 3.31.	Telesentrik sistem ile elde edilen gri seviye görüntü üzerinde, farklı derinlikteki çubukların (bkz. Şekil 3.30(b)) çaplarının karşılaştırmalı piksel analizi	58
Şekil 3.32.	Zemax OpticStudio yazılımında oluşturulan telesentrik gölge görüntüleme sisteminin optik tasarımı. Sistem; iki iğne deliği (PH1 ve PH2), dört optik lens (L1–L4) ve bir kamera sensöründen oluşmaktadır. Işınlardan izlediği yollar, sistemin odaklama ve kolimasyon karakteristiğini yansıtabilecek şekilde simüle edilmiştir.	59
Şekil 4.1.	a) Kamera 1 ve b) Kamera 2 ile alınan kalibrasyon verisine göre her bir piksel için hesaplanan çözünürlük değerlerinin renk haritası ile gösterimi....	63
Şekil 4.2.	Farklı örnekleme aralıklarıyla (2, 4 ve 8 piksel) yapılan interpolasyon sonucu elde edilen piksel çözünürlüğü dağılımları: (a–c) Kamera 1, (d–f) Kamera 2. (a,d): 2 piksel, (b,e): 4 piksel, (c,f): 8 piksel örnekleme aralığına karşılık gelmektedir.	63
Şekil 4.3.	Gerçek veriler ile interpolasyon sonuçları arasındaki farkların renkli harita ile görselleştirilmesi: (a–b–c) Kamera 1 ve (d–e–f) Kamera 2 görüntüleri için fark dağılımları (a,d): 2 piksel, (b,e): 4 piksel, (c,f): 8 piksel örnekleme aralığına karşılık gelmektedir.	64
Şekil 4.4.	12,5 mm çapındaki referans çubuk ile yapılan kalibrasyon sonucunda farklı gün ve zamanlarda (x ekseninde) elde edilen çap ölçüm değerleri ile bunlara ait standart hata çubukları. Kırmızı kesikli çizgiler, hedef çap değeri ve tolerans sınırlarını göstermektedir.	66
Şekil 4.5.	Gerçek zamanlı analizde, 6 mm çaplı çubuk için x ekseninde boyunca farklı y konumlarında ölçülen çap hatalarının ortalama dağılımı	68

Şekil 4.6.	Gerçek zamanlı analizde, 6 mm çaplı çubuk için farklı y konumlarında ölçüm hatalarının standart sapma dağılımı	69
Şekil 4.7.	6 mm nominal çapa sahip bir çubuğun 20 mm × 40 mm'lik ölçüm alanlarındaki a) DBM yöntemi ile b) SBM yöntemi ile elde edilen mutlak hatanın yüzdesi	70
Şekil 4.8.	20 mm nominal çapa sahip bir çubuğun 10 mm × 40 mm'lik ölçüm alanlarındaki a) DBM yöntemi ile b) SBM yöntemi ile elde edilen mutlak hatanın yüzdesi	71
Şekil 4.9.	a) DBM, b) SBM yöntemiyle elde edilen kalibrasyon verisine ait yüzde hata dağılımını gösteren renk haritası.	73
Şekil 4.10.	(a–d) Referans çubuğunun sistem görüş alanı içerisinde farklı konum ve açılarda elde edilen gölge görüntüleri.....	74
Şekil 4.11.	Telesentrik görüntüleme sistemiyle ölçülen referans çubuğa ait yazılım ekran çıktısı (ölçülen çap: 4.834 mm, standart sapma: ±0.008 mm).....	75
Şekil 4.12.	Geliştirilen sistem ile 10 mm nominal çapa sahip endüstriyel vidanın çap ölçüm sonuçları.....	76
Şekil 4.13.	(a,c,e) Telesentrik görüntüleme sistemi ile elde edilen vida görüntülerinde, farklı açılarda (72°, 90°, 104°) vida dişlerinin tespiti. (b,d,f) Diş profillerine dikdörtgen uyumlaması uygulanarak elde edilen iç ve dış çap tespiti sonuçları.	77

SİMGELER VE KISALTMALAR

μm	Mikrometre
2B	İki Boyutlu
3B	Üç Boyutlu
CCD	Charge-Coupled Device (Yük Bağlantılı Aygıt)
CMM	Coordinate Measuring Machine (Koordinat Ölçüm Makinesi)
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor (Tamamlayıcı Metal-Oksit Yarıiletken)
CNN	Convolutional Neural Network (Evrişimsel Sinir Ağı)
D	Nominal çap (mm)
d	Ölçülen dış çap (mm)
DBM	Distance-based Measurement (Mesafe Tabanlı Ölçüm)
DOF	Depth of Field (Alan Derinliği)
f	Odak uzaklığı (mm)
FOV	Field of View (Görüş Alanı)
h	Vida dış yüksekliği (mm)
LED	Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
mm	Milimetre
ms	Milisaniye
N	Ölçüm sayısı
NSC	Non-Sequential Component (Sıralı Olmayan Bileşen)
p	Piksel boyutu (mm/piksel)
PVS	Pinhole Vision System (İğne Deliği Görüntüleme Sistemi)
px	Piksel
QA/QC	Quality Assurance / Quality Control (Kalite Güvence / Kalite Kontrol)
ROI	Region of Interest (İlgi Alanı)
rpm	Revolutions Per Minute (Dakikadaki Devir Sayısı)
SBM	Slope-Based Measurement (Eğim Tabanlı Ölçüm)
STD	Standard Deviation / Ölçümün standart sapması (μm veya %)
t_{exp}	Pozlama süresi (ms)
TVS	Telecentric Vision System (Telesentrik Görüntüleme Sistemi)
USB	Universal Serial Bus (Evrensel Seri Veri Yolu)
v	Hedef nesnenin hızı (m/s)
$x_{\text{up}}, x_{\text{down}}$	Üst ve alt kenar koordinatları (piksel)
z	Nesne ile kamera arasındaki mesafe (mm)
Δx	Kenarlar arası piksel mesafesi
θ	Açı (derece veya radyan)
μ	Ortalama değer
σ	Standart sapma

1. GİRİŞ

1.1. Problem Tanımı

Günümüzde üretim süreçleri giderek daha hassas, esnek ve otomasyona uygun hale gelmektedir. Özellikle silindirik ürünlerin üretiminde, kalite standartlarını karşılayabilmek için çapın üretim hattı boyunca anlık ve sürekli izlenmesine duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Çapta meydana gelebilecek küçük değişimler parçanın dayanımı, işlevselliği ve uyumu üzerinde önemli etkilere neden olabilir. Yüksek hacimli üretim ortamlarında, insan eliyle yapılan son kontroller zaman alıcı ve maliyetli olduğu gibi, rastgele örnekleme yöntemi çoğu zaman tolerans dışı ürünlerin gözden kaçmasına neden olabilir. Örneğin, tecrübeli bir çalışanın bir parçadaki onlarca özelliği manuel olarak ölçmesi neredeyse bir saat sürebilir. Bu da Endüstri 4.0 prensipleriyle uyumlu, insan müdahalesi gerektirmeyen, karanlık fabrika altyapısına entegre edilebilecek otomatik ölçüm sistemlerinin gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Temaslı ölçüm cihazları, örneğin kumpas veya mikrometre gibi aletler, hassas veya yumuşak yüzeylere sahip ürünlerde deformasyona ve yüzey hasarına neden olabileceği için sürekli ölçüm uygulamaları ve otomasyon sistemleri için uygun değildir. Bu tür manuel ölçüm yöntemleri, hem zaman alıcıdır hem de üretim hattı ile entegre çalışamaz. Buna karşılık, temassız ve otomatik çap ölçüm sistemleri; üretim hattına entegre edilerek anlık ve sürekli izleme olanağı sağlar, hurda oranını ve yeniden işleme ihtiyaçlarını azaltır, kaliteyi koruyarak üretim maliyetlerini düşürür. Ayrıca, malzeme tüketimindeki mikrometre düzeyindeki sapmalar bile, günümüzün rekabetçi ve kaynakların sınırlı olduğu üretim ortamında, hem maliyet hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli etkiler yaratır. Otomatik izleme sistemlerinin, üretimin her aşamasında kesintisiz veri toplayabilmesi, üretim sürecinin dijitalleştirilmesi açısından da büyük önem taşır. Tutarlı ve dar toleranslar içerisinde üretilmiş ürünler, müşteri memnuniyetinin sağlanması ve firmanın güvenilirliğinin korunması açısından da kritik önemdedir. Özetle, sanayide çap kontrolü yalnızca kaliteyle ilgili değil, aynı zamanda ekonomik verimlilik, dijital dönüşüm ve sürdürülebilirlik açısından da önemlidir.

Sanayideki bu durumun yanı sıra benzer bir ihtiyaç biyomedikal araştırma ve uygulamalarda da ortaya çıkmaktadır. Hipodermik iğneler, kateterler, stentler, damar greftleri ve anjiyoplasti balonları gibi birçok tıbbi cihaz, belirli çap toleransları çerçevesinde üretilmelidir. Milimetrenin hatta mikrometrenin altındaki sapmalar bile sıvı akış dinamiğini

etkileyebilir veya uyumsuzluğa yol açarak hastada rahatsızlığa ya da ciddi klinik komplikasyonlara neden olabilir. Örneğin, sadece birkaç yüz mikrometre daha kalın bir kateter, hastada ağrıya ya da doku zararına neden olabilir. Bu nedenle, üretim sırasında bu tür ürünlerin çaplarının sürekli ve temassız şekilde izlenmesi, hem ürün kalitesini artırmakta hem de sahada yaşanabilecek problemlerin önüne geçer.

Endüstriyel ve biyomedikal alanlardaki bu ikili önem, hem makro düzeyde üretim kalitesi hem de mikro düzeyde analiz için daha gelişmiş çap ölçüm yöntemlerine olan ihtiyacı artırır. Ancak çap ölçümünün bu kadar önemli olmasına rağmen, yüksek doğrulukla, sürekli ve temassız ölçüm gerçekleştirmek oldukça zordur. Geleneksel yöntemler, genellikle sürecin durdurulmasını ve fiziksel temas gerektirdiğinden, hareketli veya hassas nesneler için uygun değildir. Bu da optik, temassız ölçüm yöntemlerini öne çıkarmaktadır. Fakat bu yöntemlerin de kendi sınırlamaları vardır. İğne deliği görüntüleme sistemleri (PVS - Pinhole Vision Systems) ve telesentrik görüntüleme sistemleri (TVS - Telecentric Vision Systems) en yaygın kullanılan optik ölçüm sistemleridir. PVS sistemleri geniş görüş alanı sağlasa da, kamera kalibrasyonuna çok duyarlıdır ve nesnenin konumu veya uzaklığı değiştiğinde ölçüm doğruluğu düşer. TVS sistemleri ise odak uzaklığındaki küçük değişikliklerden etkilenmeden mikrometre düzeyinde doğruluk sağlayabilir, ancak dar bir görüş alanına sahiptirler ve büyük nesnelerin veya konumlanan nesnelerin ölçümünde sınırlayıcı olabilirler.

Fabrika ortamındaki çevresel etkiler – titreşim, sıcaklık değişimi, hızlı hareket eden hedefler – optik ölçümleri daha da zorlaştırır. Lazer triangülasyon veya gölge görüntüleme gibi sistemler, yüksek kontrast sunmaları açısından avantajlıdır; ancak titreşim ve hizalama hatalarına karşı duyarlıdır. Yüksek hızlı üretim hatlarında bu sistemlerin net görüntü sağlayabilmesi için özel titreşim sönümleyici sistemler gerekebilir. Ayrıca parlak veya mat yüzeyler, görüntülerin kenar netliğini etkileyebilir; bu nedenle adaptif algoritmalar veya özel aydınlatmalar kullanılması gerekir. Çap ölçümündeki bir diğer zorluk da hareketli nesnelerin eksenel hizalama hatasıdır. Örneğin konveyörde dönen bir şaft ya da ekstrüde edilen bir tıbbi tüp, yalpalama, eğilme veya titreşim sergileyebilir. Bu gibi durumlarda, nesnenin sabit ve dik konumda olduğunu varsayan klasik optik mikrometre sistemleri yanıltıcı sonuçlar verebilir. Dolayısıyla hem endüstriyel hem de biyomedikal ortamlarda güvenilir ve sürekli çap ölçümü için yeni çözümlere ihtiyaç duyulur.

Son yıllarda, bu zorluklara çözüm bulmak amacıyla birçok araştırmacı çap ölçüm teknolojileri üzerine çalışmalar yürütmektedir. Örneğin Sun vd. [1], farklı uzaklıklardan çekilen iki görüntüyü karşılaştırarak 5 µm hata payı ile çap ölçebilen bir dijital görüntüleme

yöntemi geliştirmiştir. Liu vd. [2] ise lazer ışını yansıması ve görüntü işleme algoritmaları ile laboratuvar ortamında 25 μm 'den daha az hata ile ölçüm yapmıştır. Wang vd. [3] tarafından geliştirilen çift kameralı, çift telesentrik sistem, büyük şaftların çevrimiçi olarak ölçülmesini mümkün kılmış; ayrıca, tek bir telesentrik lensin sağlayamayacağı geniş görüş alanı ile mikrometre düzeyinde doğruluk sunmuştur. Bu tür sistemlerde gerçek zamanlı kalibrasyon, yüksek hızlı kameralar ve gelişmiş görüntü işleme algoritmaları gibi yenilikler sayesinde üretim hatlarındaki uygulamalar daha güvenilir hale gelmiştir. Bu tez çalışmasının motivasyonu da tam olarak buradan kaynaklanmaktadır: Hareketli ve pozisyonu değişken nesnelerde, sürekli, temassız ve yüksek doğrulukta çap ölçümü yapabilen bir sisteme duyulan ihtiyaç.

1.2. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı; endüstriyel ve biyomedikal uygulamalarda, hareketli ve konumu değişken nesnelerin çap ölçümünü sürekli, temassız ve yüksek doğrulukla gerçekleştirebilen özgün bir optik sistem geliştirmektir. Bu kapsamda, dört farklı optik sistem geliştirildi: 360° yüzey görüntüleme, lenssiz gölge görüntüleme, telesentrik görüntüleme ve telesentrik gölge görüntüleme sistemleri. Bu sistemler, farklı uygulama senaryolarına uygun olacak şekilde tasarlandı. Yüzey yansıtıcılığı gibi etkilere bağımsız olarak çalışan bu yöntemler, hareketli nesnelerde bile güvenilir sonuçlar verdi. Sistem, yüksek çözünürlüklü kamera, kolime LED ışık kaynağı ve özel görüntü işleme algoritmalarının bir araya gelmesiyle, alt piksel düzeyinde kenar tespiti sağlayarak çap tahminini gerçekleştirir. Bu sistemin en büyük yeniliğı, silindirik nesneler doğrusal olmayan hareketler sergilese veya farklı yönelimlerde bulunsada dahi çapı yüksek hassasiyetle ölçebilmesidir. Yani ölçüm için nesnenin sabitlenmesine veya eksenel olarak hizalanmasına gerek kalmadan ölçüm yapılabilir. Donanımsal ve yazılımsal entegrasyon sayesinde sistem, kalibrasyon hatalarını sürekli olarak düzelterek çap takibini güvenilir bir şekilde gerçekleştirebilmektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında sanayi ve biyomedikal alanlardaki güncel çap ölçüm ihtiyaçlarına çözüm sunmak üzere özgün bir optik sistem tasarlandı ve geliştirildi. Bu sistemler sayesinde hareketli nesneler gerçek zamanlı olarak temas olmadan ve yüksek doğrulukla ölçülebilecek; böylece kalite kontrol süreçleri iyileştirilmekte ve bilimsel çalışmalarda güvenilir veri sağlanabilmektedir.

Bu tezde önerilen optik çap ölçüm sistemlerinin tasarımı, hem temel optik prensiplere hem de görüntü işleme temelli yöntemlere dayanır. Geliştirilen sistemlerin arka planını daha

iyi kavrayabilmek adına, bu bölümün devamında çap ölçüm yöntemleri, görüntü işleme tabanlı sistemlerin yapısı, kullanılan optik prensipler ve biyomedikal uygulama alanları hakkında temel bilgiler sunuldu. Bu bilgiler, izleyen bölümlerde detaylandırılacak olan özgün sistem tasarımlarının anlaşılmasını kolaylaştırmayı amaçlar.

Bu tez çalışmasının temel amacı; endüstriyel ve biyomedikal uygulamalarda, hareketli ve konumu değişken nesnelerin çap ölçümünü sürekli, temassız ve yüksek doğrulukla gerçekleştirebilen özgün bir optik sistem geliştirmektir. Bu amaca yönelik olarak, tez çalışmasının kapsamı ve yapısı, takip eden bölümlerde detaylandırılmıştır: Giriş Bölümü (Bölüm 1), çalışmanın problem tanımını, temaslı ve temassız çap ölçüm yöntemlerini, görüntü işleme tabanlı optik ölçüm sistemlerinin donanım ve yazılım bileşenlerini, gölge projeksiyonu ve telesentrik görüntüleme prensiplerini ve biyomedikal uygulamalardaki çap ölçümünün önemini ele almaktadır. Ardından, Genel Bilgiler Bölümü (Bölüm 2), çap ölçüm yöntemleri, görüntü işleme tabanlı optik sistemlerin yapısı, kullanılan optik prensipler ve biyomedikal uygulama alanları hakkında temel bilgiler sunarak, izleyen bölümlerde detaylandırılacak özgün sistem tasarımlarının anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır. Metodoloji Bölümü (Bölüm 3), veri toplama ve analiz yöntemlerini, kullanılan görüntü işleme tekniklerini ve geliştirilen dört farklı optik sistemin (360° yüzey görüntüleme, lenssiz gölge görüntüleme, telesentrik gölge görüntüleme ve telesentrik görüntüleme sistemleri) tasarımlarını ayrıntılı olarak sunmaktadır. Bulgular Bölümü (Bölüm 4), gölge görüntüleme, telesentrik gölge görüntüleme ve telesentrik görüntüleme sistemlerinden elde edilen deneysel ölçüm sonuçlarını doğruluk, tekrarlanabilirlik ve gerçek zamanlı performans açısından değerlendirmekte; bu bulgular, çeşitli çaplara sahip referans çubuklar ve endüstriyel vidalar üzerinde gerçekleştirilen testlere dayanmaktadır. Tartışma Bölümü (Bölüm 5), geliştirilen sistemlerin endüstriyel çap ölçümündeki avantajlarını ve sınırlılıklarını literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırmalı olarak ele almakta ve sonuçların önemini vurgulamaktadır. Son olarak, Sonuç ve Öneriler Bölümü (Bölüm 6) ise tez çalışmasının temel katkılarını özetlemekte, geliştirilen sistemlerin biyomedikal ve endüstriyel uygulamalardaki potansiyelini ortaya koymakta ve havacılık, savunma sanayii gibi daha yüksek hassasiyet gerektiren uygulama alanlarına yönelik gelecekteki çalışmalara dair öneriler sunmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Çap Ölçüm Yöntemleri: Temaslı ve Temassız Sistemler

Yüzey metrolojisi teknikleri genel olarak temaslı ve temassız sistemler olarak kategorize edilir. Geleneksel çap ölçüm yöntemlerine bakıldığında yaygın olarak temas gerektiren yöntemlerin kullanıldığı görülür. Bu ölçüm teknikleri ölçüm yüzeyinde mikro düzeyde hasara neden olabilir. Ayrıca küçük alandan veri alındığı için doğruluk konusunda sınırlandırmalardan bahsedilebilir. Temassız ölçüm yapan optik yöntemler hız ve hassasiyet konusunda avantajlıdır. Lazer tarama gibi temassız yaklaşımlar ölçümlerin dinamik olmasını ve tekrarlanabilirliğin yüksek olmasını sağlar. Ancak, bu sistemler tasarımlarında kullanılan özel elemanlar nedeniyle yüksek maliyetli olabilir [4]. Temassız sistemlerdeki son yenilikler arasında ölçüm doğruluğunu artırmak için dönen difüzörler ve özel filtreler yer alır [5]. Büyük ölçekli ve serbest biçimli yüzeyler için, konfokal tarama yöntemleri tercih edilen çözüm olmaya devam etmektedir ve veri birleştirme gerektiren doğrudan alan ölçümlerinden daha iyi performans sunar. X-ışını bilgisayarlı tomografisi serbest biçimli yüzey ölçümleri için umut vadetse de, dış metrolojisi gibi alanlarda tam olarak uygulanabilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır [6].

Temassız yüzey ölçüm teknikleri, temaslı yöntemlere göre avantajları nedeniyle son yıllarda ön plana çıktı. Lazerler ve dijital kameralar gibi teknolojilerden yararlanan bu teknikler nokta tabanlı, çizgi tabanlı ve alan tabanlı yaklaşımlar olarak sınıflandırılabilir [7]. PVS ve TVS dahil olmak üzere iki boyutlu (2B) yüzey ölçüm sistemleri, temassız yöntemler kategorisine girer. PVS, bir kamera/sensör ve bir ışık kaynağından oluşur. Kamera kalibrasyonunun çok hassas bir şekilde yapılmasını gerektirir. Aksi takdirde nesne sabit bir noktada konumlandırılmadıkça doğru ölçüm alınamayacaktır. TVS, ışının optik eksene paralel olmasını sağlayan (kolime ışık) bir lens sistemi içerir. Bu sistemler, yüksek hassasiyetle ve gerçek zamanlı olarak geniş görüş alanlarını ölçme yeteneği sunarak, dik pürüzsüz yüzeyler, pürüzlü yüzeyler ve opak yüzeyler dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için uygun hale gelir [5]. Üç boyutlu (3B) yüzey ölçüm tekniklerinin geliştirilmesi, alanın uygulamalarını ultra ince film ölçümünden dermatolojik kanser çalışmalarına ve eklem protezi yüzey değişimi ve kalp kapakçığı conta kalitesi gibi biyomühendislik uygulamalarına kadar genişletir [8].

Çap ölçümüne yönelik son gelişmeler, optik sistemlerin ve lazer üçgenleme tekniklerinin iyileştirilmesine odaklanır. Optik stokastik gradyan inişi ile yapılandırılmış

ışığın otomatik olarak ayarlanması, sistem modellemesi veya ön kalibrasyon gereksinimi olmadan 3B ölçüm doğruluğunu artırma konusunda umut verici sonuçlar ortaya koydu [9]. Optik 3B şekil ölçüm teknikleri, özellikle yapılandırılmış ışık ve lazer tarama yöntemleri, doğrulukları ve verimlilikleri nedeniyle çeşitli endüstrilerde önem kazandı [10]. Bu yöntemler ölçüm aralığı ve otomasyon açısından avantajlar sunar, ancak aynı zamanda mekansal çözünürlük ve genel maliyetlerin artması sebebi ile sınırlamalara sahiptir. Nesne boyutu tahmini yaparken kullanılan gri tonlamalı ortalama tekniklerinin basit piksel sayımından daha üstün performans göstererek daha düşük hata oranları ve farklı görüntü kontrastlarında daha tutarlı sonuçlar verdiği görüldü [11].

Lazer tabanlı ölçüm teknolojileri çeşitli zorluklar barındırır. Kalibrasyon hassasiyeti, en önemli sorunlardan biridir. Kalibrasyonda yapılan hatalar, modal parametre çıkarımında ve ölçüm belirsizliğinde hatalara neden olabilir. Titreşim, özellikle modal analiz uygulamalarında ölçüm doğruluğunu etkileyebilir [12]. Tarama hızı sınırlamaları veri toplamayı etkiler. Bu zorluklara rağmen, lazer tabanlı teknolojiler, geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında yüksek hassasiyetli 3B verileri yakalamak ve hızlı ölçümler sağlamak gibi avantajlar sunmaktadır. Devam eden araştırmalar, bu sınırlamaları ele alarak ölçüm doğruluğunu ve sistem entegrasyonunu iyileştirmeyi amaçlar [13].

Gölge projeksiyonu ve telesentrik lensler, yüksek hassasiyetli 3B ölçümler için umut vadeden tekniklerdir. Telesentrik lensler, ölçeklendirilmiş görünümüler üretmek perspektif hatalarını ortadan kaldırır. Bu da görüntülenen nesnenin konumuna ya da kameraya mesafesine bağlı olmaksızın doğru boyut ölçümleri sağlar [14]. Telesentrik lensler kullanan mikroskopik saçak projeksiyon sistemleri, küçük hacimlerde yaklaşık 10 μm 'lik doğruluklara ulaştı [15]. Elektronik olarak odak ayarlanabilir lense sahip çift telesentrik yapılandırılmış ışık sistemi, 1200 μm derinlik aralığında 5,86 μm 'lik bir mekansal çözünürlük ve 4,08 μm 'lik bir kök ortalama kare hatası elde etti [14]. Gerçek zamanlı yeniden yapılandırma için Fourier dönüşümü ve faz kaydırma algoritmalarını kullanan mikro ölçekli 3B ölçümler için stereoskopik mikroskop tabanlı sistemler geliştirildi [16].

Lazer üçgenleme, lazer ile bir yüzey arasındaki mesafeyi ölçmek için bir lazer ve bir kamera kullanan bir tekniktir. Başka bir yöntem, yapılandırılmış aydınlatma altında lazer üçgenleme tekniğine dayanır; burada lazer düzlemleri, şarj bağlantılı bir cihaz kamerası (CCD) tarafından algılanan test nesnesi üzerinde çizgiler çizer. Demeyere vd. bu yöntemi başka bir çalışmada kullandı [17]. Yarıçapı hesaplamak için iki yaklaşım önerilir. Bunlar “üç teğet yöntemi” ve gradyan iniş yöntemidir. Üç teğet yöntemi, bir dairenin tamamen üç teğetiyle tanımlandığı özelliğine dayanır. Bu, bir çemberin çapının, çembere teğet olan ve zıt

kenarlarında bulunan iki nokta arasındaki mesafeye eşit olduğu ilkesinden ortaya çıkar. Bir gradyan iniş yaklaşımı, bir fonksiyonun minimum veya maksimumunu bulmak için kullanılan gradyan iniş optimizasyon algoritmasına dayanır. Deneysel çalışmalar sonucunda üç teğet tekniğinin performansı bir nebze daha iyi bulundu. Üç teğet yaklaşımı, küre geometrisinin (yarıçap ve konum) başlangıç değerlendirmesini gerektirmediğinden, kullanımı daha basittir ve daha hızlı, bilinen ve sabit bir hesaplama süresine sahiptir. 2,5 m'ye kadar olan mesafeler için, çapı 10 ile 30 cm olan küresel nesnelerin kabaca %1'lik bir genel doğruluğa sahip olduğu rapor edildi.

Diğer projede [1], şaft çapları bir kamera ve bir arka plan ışığı kullanılarak ölçüldü. Kamera ile ölçülmek istenen mil (şaft) sabit bir konumda, belirli bir açıyla ya da mesafede sabitlenmedi. Kamera, yüksek hassasiyette sonuçlar elde etmek için milin konumu ve çapına göre kalibre edildi. Hassas ölçüm aletleriyle karşılaştırıldığında bu prosedürün kullanılmasından elde edilen bulgular, ortalama hatanın 0,005 mm olduğunu gösterdi.

Hao vd. [16] tarafından yapılan bir çalışmada, makine görü sistemlerinin ölçüm doğruluğunu artırmak ve millerin çapını doğru bir şekilde ölçme ihtiyacını karşılamak amacıyla bir yeni ölçüm şeması sunuldu. Geleneksel endüstriyel lenslerle donatılmış makine görü sistemlerinin doğruluğu sınırlı olabilir ve hassas çap ölçümleri için yeterli olmayabilir. Bu nedenle, bu çalışmada, daha yüksek bir ölçüm doğruluğu elde etmek amacıyla yeni bir yaklaşım önerildi. Çalışmada öncelikle, iki görüntüye dayalı olarak çap ölçümü için bir yöntem geliştirildi. Bu yöntem, PVS, benzer üçgenler ve teğet özellik teoremleri gibi optik prensipleri temel alarak türetildi. Bu temel prensipler kullanılarak, iki farklı nesne mesafesinde elde edilen görüntülerin analizi ve karşılaştırılması yoluyla çap ölçümü gerçekleştirildi. Bu yaklaşım ile, hassas ve doğru ölçümler yapmayı hedeflendi. Bir transmisyon vidalı mil üzerinde deneyler yapıldı ve bu yöntem ile sistematik hataların yaklaşık olarak 2 μm ve belirsizliklerin ise 4,9 μm olduğu belirlendi.

Liu ve vd. [2] tarafından yapılan bir çalışmada, bir lazer ışığı ile yapılandırılmış bir ışık deseni oluşturuldu ve bu desen, mil yüzeyine yansıtıldı. Yansıyan desen, bir kamera tarafından algılandı ve görüntü işleme algoritmaları kullanılarak çap ölçümü gerçekleştirildi. Araştırmacılar, yapılan deneysel çalışmalarla, geliştirilen yöntemin yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik sağladığını gösterdi. Ölçüm hatalarının 25 μm 'den az olduğu bildirildi.

Gölge projeksiyonu ve telesentrik lensler, yüksek hassasiyetli 3B ölçümler için umut vadeden tekniklerdir. Telesentrik lensler, ölçeklendirilmiş görünümler üreterek perspektif hatalarını ortadan kaldırır. Bu da görüntülenen nesnenin konumuna ya da kameraya mesafesine bağlı olmaksızın doğru boyut ölçümleri sağlar [14]. Telesentrik lensler kullanan

mikroskobik saçak projeksiyon sistemleri, küçük hacimlerde yaklaşık 10 μm 'lik doğruluklara ulaştı [15]. Elektronik olarak odak ayarlanabilir lense sahip çift telesentrik yapılandırılmış ışık sistemi, 1200 μm derinlik aralığında 5,86 μm 'lik bir mekansal çözünürlük ve 4,08 μm 'lik bir kök ortalama kare hatası elde etti [14]. Gerçek zamanlı yeniden yapılandırma için Fourier dönüşümü ve faz kaydırma algoritmalarını kullanan mikro ölçekli 3B ölçümler için stereoskopik mikroskop tabanlı sistemler geliştirildi [16].

Fizik prensipleri ile mühendislik yaklaşımlarının birleştirilmesi ile günümüz endüstrisinde yüksek hassasiyetli ölçüm sağlayan sistemler üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır. Gölge projeksiyonu tekniği, telesentrik lensin çalışma prensibi ve kamera kalibrasyonu gibi tekniklerin birleştirilmesi ile çap ölçümü için hassas sistemler geliştirilebilir.

Gölge projeksiyonu, nesnelerin geometrik özelliklerini belirlemek için kullanılır. Bir ışık kaynağı nesne üzerine yönlendirilir ve cismin bir ekranın üzerine gölgesinin düşmesi sağlanır. Bu nesnenin boyutu, geometrik özellikleri bir kamera ya da sensör kullanılarak alınan bilgi neticesinde belirlenebilir. Özellikle telesentrik lensler ile kullanıldığı zaman, bu yöntem, ölçümde oluşabilecek hataların minimum seviyede olmasını sağlar [18]. Telesentrik lensler, paralel ışık demetleri ile birlikte nesne ve algılayıcı sensör/kamera arasındaki uzaklığa bağlı olmaksızın cismin boyutunun ölçülebilmesine olanak tanır. Nesne ve kamera arasındaki uzaklık değişse bile gölge görüntüsünün boyutunda değişiklik olmaz. Paralel ışık huzmesi içerisinde cismin konumundan bağımsız olan bu ölçümle birlikte sistem hizalamasından kaynaklanacak olası problemlerin önüne geçilir [19].

Kamera kalibrasyonu, optik ölçüm sistemlerinin ölçüm doğruluğunu ve sistem performansını etkileyen önemli bir yönüdür. Huang vd. [20], doğru projektör kalibrasyonu zorluğunu ele alarak kamera-projektör sistemini optimize etmek için doğrudan doğrusal dönüşüm ve demet ayarlamasını birleştiren bir kalibrasyon yöntemi önerdi. Ayrıca, projeksiyon deseni hassasiyetini iyileştirmek için bütünlük bir yöntem sundular. Caja vd. [21] çalışmalarında, 3B koordinatları 2B görüntü koordinatlarına dönüştürmek için bir matematiksel model geliştirerek optik ölçüm makinelerinin optik sistem kalibrasyonuna odaklandı. Kalibrasyon için bir ızgara bozulma deseni ve kamera ve geometrik bozulma parametrelerindeki belirsizliği tahmin etmek için ise Monte Carlo yöntemlerini kullandılar. Bai vd. [22], büyük nesneleri ölçmek için gerekli olan Büyük Ölçekli Metroloji fotogrametrik sistemlerinde kamera kalibrasyonuna yönelik iki farklı yaklaşımı karşılaştırdılar. Bu çalışmalar, optik ölçüm sistemlerinin güvenilirliğini ve hassasiyetini sağlamada doğru kalibrasyon prosedürlerinin önemini vurgular. Benzersiz görüntüleme

özellikleri nedeniyle, telesentrik optik ölçüm sistemleri geliştirilirken özel kalibrasyon teknikleri kullanılmasına ihtiyaç duyulur. Son araştırmalarda bu sistemler için kalibrasyon yöntemlerini iyileştirmeye odaklanıldı. Chen vd. [23], geleneksel modellere kıyasla %55,37'ye kadar daha yüksek doğrulukla sonuçlanan, ana noktayı içeren geliştirilmiş bir projeksiyon modeli önerdi. Liu vd. [24], doğru bir 3B referans hedefine olan ihtiyacı ortadan kaldıran analitik bir telesentrik projektör-kamera kalibrasyon modeli ve iki adımlı bir kalibrasyon prosedürü sundu. Rao vd. [25], geleneksel 2B düzlemsel kalibrasyonu iki adımlı bir rafine etme süreciyle birleştiren ve 0,07 piksellik bir yeniden projeksiyon hatası elde eden esnek bir kalibrasyon algoritması geliştirdi. Küçük görüş alanı (FOV) ve alan derinliği (DOF) telesentrik lenslere sahip kameralar için Liao vd. [26], içsel ve dışsal parametreleri doğru bir şekilde kurtaran yeni bir kalibrasyon yöntemi sundu. Bu gelişmeler, çeşitli uygulamalarda telesentrik optik ölçüm sistemlerinde doğruluğu ve güvenilirliği artırır.

Başka bir çalışma [27], tutarsız bir ışık kaynağı ve telesentrik optik kullanıldı. Yoğunluk bağımlılığının maksimum türevinin konumuna bağlı olarak, görüntüdeki nesne kenarı tanımlanır. Önerilen yöntemin hatası hem teorik hem de deneysel olarak hesaplandı. Deneysel tahmin için çeşitli çaplara sahip beş kalibrasyon silindirin çoklu ölçümleri yapıldı. Sistem, çapı 10 mm'ye kadar olan nesneleri ölçmek için yapılandırıldığında, silindirik nesne çapı ölçümlerinin sonuçlarında elde edilen ortalama karekök sapması 0,24 μm düzeyindedir ve bu da $2,4 \times 10^{-5}$ 'lik bir bağıl ölçüm hatasına karşılık gelir.

Optik tasarımdaki son araştırmalar, görüntü kalitesini artırmak ve üretim hassasiyetini azaltmak için hata analizi ve optimizasyon tekniklerine odaklanır. Kumar Gowda vd. [28], optik tasarım parametrelerini iyileştirmek ve hata fonksiyonlarını azaltmak için küresel ve asferik elemanlar kullanan bir optimizasyon modeli önerdi. Ayrıca, görüntüleme kalitesini iyileştirmek için sıralı ışın izleme algoritmaları ve çeşitli tasarım aşamalarını kullanarak yüksek yoğunluklu, sapmasız kamera lens sistemleri için optimizasyon tekniklerini araştırdılar.

Araştırmadaki veri toplama prosedürleri, bilgilerin dikkatli bir şekilde ölçülmesini, kaydedilmesini ve işlenmesini içerir. Sistem kurulumu, kamera optimizasyonu, görüntü eldesi ve sonrasında görüntü işleme ve veri analizi adımları birbirini takip eder.

Endüstriyel görüntüleme sistemlerinde, özellikle üretim hatlarında, net ve doğru görüntüler yakalamak için doğru kamera pozlamasını ayarlamak önemlidir. Pozlama süresi, kamera sensörünün ışığa ne kadar süre maruz kalacağını kontrol eder. Daha uzun pozlama süreleri daha fazla ışığa izin vererek daha parlak görüntüler elde edilmesini sağlarken, daha kısa süreler ışık alımını azaltarak daha karanlık görüntüler oluşturur. Sistem tasarımında ve

analizinde yeterli parlaklık ile hareket bulanıklığını en aza indirmek arasında doğru dengeyi bulmak zorluk çıkarır. Yüksek hızlı üretim hatları için, daha kısa pozlama süreleri genellikle sensör görüntüyü yakalarken nesneler hareket ettiğinde oluşan hareket bulanıklığını önlemek için daha iyi bir seçimdir. Bu ayarlama hareketi dondurmaya yardımcı olur ve daha keskin görüntüler üretir. Ancak, daha kısa pozlama süreleri yakalanan ışık miktarını azaltarak daha karanlık görüntüler elde edilmesine yol açar. Bunu çözmek için, kameranın kazancını artırabilir ve bu da sensörün ışığa duyarlılığını artırabilir veya üretim alanındaki aydınlatmayı iyileştirilebilir. Bu işlemlerin dezavantajları da bulunmaktadır. Kazancı artırmak görüntüyü aydınlatırken, aynı zamanda gürültüye de neden olabilir. Bu nedenle önce aydınlatmayı optimize etmek daha doğru bir adım olacaktır. Pozlamayı optimize ederken, görüntülenen nesnelerin hızını dikkate almak önemlidir. Daha hızlı hareket eden öğeler daha kısa pozlama süreleri gerektirirken, daha yavaş veya hareketsiz nesnelerin bulanıklık riski olmadan daha uzun pozlama sürelerinde görüntüleri alınabilir. Farklı pozlama ayarlarını test etmek ve sistemi gerçek üretim koşulları altında kalibre etmek, en iyi sonuçları elde etmek için önemlidir. Görüntü parlaklığı ve netliği arasında iyi bir denge sağlamak için aydınlatma ve kazanç ayarlamaları da test edilmelidir [29], [30].

Literatürde lazer kullanılan çap ölçüm çalışmalarına rastlansa da lazer tarama yönteminin doğruluğu titreşimden ve tarama hızından etkilenebilir [31]. Bu çalışmada önerilen yöntemlerde ışık kaynağı olarak LED kullanılmış ve gölge görüntüleme yöntemiyle çap tahmini yapıldı. Özetleyecek olursak, uzamsal yönelimlerinden bağımsız olarak doğrusal olmayan hareket sergileyen yuvarlak nesnelerin çapının hassas ölçümü için tasarlanmış yeni bir optik sistem tasarlandı. Önerilen sistemler, ölçülmekte olan nesnenin konumuna doğal olarak duyarlı olan geleneksel yöntemlerin sınırlamalarının üstesinden geldiği için mevcut yaklaşımlara göre önemli bir ilerlemeyi temsil eder. Hem donanım hem de yazılım bileşenlerinin entegrasyonu sayesinde optik sistemimiz, çok çeşitli endüstriyel ve bilimsel uygulamalar için umut verici bir çözüm sunarak yüksek derecede hassasiyet ve güvenilirlik elde eder.

2.2. Görüntü İşleme Tabanlı Optik Ölçüm Sistemleri

2.2.1. Donanım bileşenleri

Endüstriyel kalite kontrolünde hassas çap ölçümü esastır, çünkü mikrometre seviyesindeki tutarsızlıklar bile parça performansını etkileyebilir. Geleneksel dokunmatik

ölçüm cihazları veya mikrometreler verimsizdir ve yüzeylere zarar verebilir. Çağdaş yöntemler, olağanüstü hassasiyetle hızlı, temassız ölçümler için görüntü tabanlı optik cihazları kullanır. Son 15 yılda, yüksek çözünürlüklü kameralardaki gelişmeler, gelişmiş aydınlatma (özellikle LED'ler) ve gelişmiş görüntü işleme algoritmaları, üretimde çap ölçümlerinin doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır. Bazı görüntü sistemleri artık koordinat ölçüm makinelerine (CMM'ler) benzer şekilde yaklaşık 1 μm doğruluklara ulaşmaktadır. Çağdaş optik ölçüm teknikleri yüksek çözünürlüklü dijital kameralara dayanır. Son on yılda, sensör çözünürlükleri karmaşık ayrıntıları yakalamak için son derece ince piksel aralıklarına (2–5 μm) sahip birkaç on megapiksele yükseldi. Krank millerini incelemek için kullanılan çift kameralı bir sistem [3], 5480×3648 (yaklaşık 20 MP) çözünürlüğe ve 2,4 μm piksel boyutuna sahip kameralar kullandı. Azaltılmış piksel boyutu, temel uzaysal çözünürlüğü artırarak, alanın birkaç milimetresi içinde 0,01 mm' den küçük nesnelerin ölçülmesini sağlar. Yükseltilmiş çözünürlüklerde, kırınım ve lens kalitesi gibi optik elemanlar kritik öneme sahip olur ve doğru lenslerin kullanılmasını gerektirir. Önemli bir değişiklik, telesentrik lenslerin artık çap ölçümü için sıklıkla kullanılmasıdır. Telesentrik optikler paralel ışınlar üretir ve dolayısıyla perspektiften kaynaklanan bozulmayı ortadan kaldırır. Bu, bir nesnenin görüntüsünün boyutlarının, alandaki derinliğinden bağımsız olarak sabit kaldığını gösterir. Bu, gerçek formu koruduğu için çapları ölçmek için en uygun yöntemdir. Telesentrik görüntüleme, silindirik bir bileşenin kenarları bozulmamış gibi görüldüğü için gelişmiş doğruluk (genellikle birkaç mikrometre içinde) sunar. Örneğin 2018 yılında yapılan bir çalışmada [32], telesentrik bir görüş sistemi küçük şaftları ölçerken yaklaşık 0,01 mm (10 μm) doğruluk elde etti. Bir çalışmada [33], kesme takımlarının çaplarını ölçmek için telesentrik bir lens kullanıldı; öngörüldüğü gibi, görüş alanı kısıtlıydı ve yalnızca küçük bileşenler tamamen çerçeve içinde yer aldı. Sonuç olarak, telesentrik yapılandırmalar doğruluk için ölçüm aralığından ödün verir [34]. Bazı gelişmiş sistemler çok sayıda kamera veya lens kullanarak bu sorunu aşar. Örneğin, çift telesentrik bir kamera sisteminin büyük bir şafta (yaklaşık 100 mm) sahipken yine de çok hassas (mikrometre seviyesinde) olması önerilmiştir. 2022'de yayınlanan bir çalışmada[3], büyük krank mili çaplarını ölçmek için iki hizalanmış telesentrik kamera kullandı ve 100 mm üzerinde ~ 1 μm hassasiyet (standart sapma $\sim 0,0004$ mm) elde etti; bu da bir CMM'ye benzer. Başka bir yol, şaftın zıt taraflarında paralel ışık huzmeleri olan iki kamera kullanarak her iki kenarı aynı anda yakalayarak geniş çapı ölçmek [35]. Bu donanım çözümleri, donanım ve yazılımın nasıl birlikte çalışabileceğini gösterir: optik kurulum, görüntü işlemeyi kolaylaştırmak için tasarlanmıştır (örneğin, bozulmayı azaltarak veya her iki kenarı yakalayarak), bu da genel doğruluğu artırır.

Tüm sistemler telesentrik lensler kullanmaz. Bazıları daha geniş bir görüş alanı için geleneksel iğne deliği lensleri (standart endüstriyel kamera lensleri) kullanır. İğne deliği optikleri daha büyük nesneleri kapsayabilir; ancak, yazılım kalibrasyon modelleri aracılığıyla düzeltme gerektiren perspektif hataları ortaya çıkarırlar. Wei ve Tan [36], bozulma terimleri ve bilinen bir referans şaftına karşı kalibrasyon ile perspektif projeksiyon modellemesini kullanarak şaft çaplarını ölçmek için bir iğne deliği kamera tekniği tanıttılar. Sistemleri, farklı test parçalarında çap ölçümlerinde yaklaşık 7–8 μm 'lik ortalama bir hataya ulaştı. Benzer şekilde, Sun vd. [1] dama tahtası hedefi kullanarak kameranın pozunu şafta göre kalibre ederek iğne deliği kamera doğruluğunu iyileştirdi ve statik şaftlarda $\sim 5 \mu\text{m}$ ortalama hata üretti. Bu örnekler, titiz kalibrasyon ve modelleme yoluyla standart kameraların önemli bir doğruluğa ulaşabileceğini göstermektedir; ancak, telesentrik yapılandırmalar 2B ölçümlerde en yüksek hassasiyeti elde etmek için üstün olmaya devam etmektedir. Görüş alanı ile doğruluk arasındaki dengeyi optimize etmek için çift delikli ve karışık telesentrik ve delikli sistemler gibi hibrit yaklaşımlar ortaya çıkar.

Aydınlatma, iyi kenar algılama için önemli bir donanım parçasıdır. Modern sistemler genellikle güvenilir, parlak ve kontrolü kolay oldukları için LED ışıklar kullanır. LED arka aydınlatmalar genellikle yüksek kontrastlı silüetler oluşturmak için kullanılır ve LED halka ışıklar genellikle kenarları önden eşit şekilde aydınlatmak için kullanılır. Örneğin, Che vd. [37] şaft çaplarına bakmak için LED arka aydınlatmalı yüksek çözünürlüklü bir kamera kullandılar. Işık, parlak bir arka plana karşı net siyah bir nesnenin öne çıkmasını sağlayarak kenarları bulmayı kolaylaştırır. Tutarlı, dağınık aydınlatma parlamayı azaltır ve ölçülen kenarların parçanın gerçek kenarlarıyla hizalanmasını sağlar. LED' ler, hareket bulanıklığını gidermek için üretim hattında dönen şaftlar gibi hızlı hareket eden parçaları 'donduran' yüksek frekanslarda vurulabilir. Birçok endüstriyel sistem, çalışan makinelerin çaplarını ölçmek için kamera pozlamasıyla zamanlanan kısa LED darbeleri kullanır.

Yapılandırılmış ışık teknikleri, geleneksel aydınlatma yöntemlerinin yanı sıra çapı ölçmek için kullanıldı. Lazer çizgisi veya birçok lazer çizgisi gibi yapılandırılmış bir ışık kaynağı nesneye yayılır. Bir veya daha fazla kamera, nesnenin yapılandırmasını belirlemek için çizginin dönüşümünü izler. Tan vd. [34], dönen bir şafta yansıtılan bir lazer çizgisi şeridine sahip bir sistemi tartışmaktadır. Şerit, eğimli yüzeydeki bir elipsin bir parçasına benzemektedir. Görüntüdeki elipsi inceleyerek, şaftın çapını belirlemek için geometrik ilkeler kullanılabilir (bir elips, bir lazer ışığı düzlemi silindirik bir yüzeyle kesiştiğinde oluşur). Bir torna tezgahında ölçüm yapma prosedürü gösterilmiştir: 1250 rpm'de dönen 36 mm çapında bir şaft kullanılarak, yapılandırılmış ışık tekniği 0,019 mm'lik (19 μm)

maksimum ortalama bir hata kaydetti - bu birçok mühendislik uygulaması için yeterlidir. Yapılandırılmış ışık, belirli konumsal değişiklikleri karşılama kabiliyeti nedeniyle makine üzerindeki ölçümler için avantajlıdır. Şerit, genişliği üzerinden çapı kodlarken aynı anda bileşenle birlikte kayar. Diğer araştırmacılar [38], çok satırlı projektörler kullanarak bu kavramı genişlettiler. Üç satırlı bir lazer sistemi ve bir kamera, çelik çubukların çapını, yuvarlaklığını ve düzlüğünü değerlendirmek için kullanıldı ve çap olarak %0,8'in altında bir hata oranı elde edildi. Başka bir çalışmada ise [39], özel mikroskop optikleriyle donatılmış bir çizgi lazerinin, şerit merkez çizgisini belirleyerek ve mikro ölçekli çubuklar veya teller gibi küçük boyutlar için bir daire yerleştirerek 2 μm 'den daha az bir doğruluk elde ettiği bildirildi.

Literatürde, hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın, uygun aydınlatmanın gerekliliğini vurgulanır. Aydınlatma, herhangi bir optik artefakt eklemekten birbirinden çok farklı sınırlar oluşturmaktadır. Telesentrik arka aydınlatmalar (kolimasyonlu LED arka aydınlatmalar), alan boyunca düzgün kenar tanımı sağlamak için yaygın olarak kullanılır. Bir yöntemde [40], yeni bir çap algoritması için deneysel yapılandırma olarak telesentrik lensler ve uygun aydınlatma ile donatılmış endüstriyel bir kamera (özellikle kolimasyonlu bir LED arka aydınlatma) kullanıldı. Aydınlatmanın tutarlılığı çok önemlidir; bir çalışma [19], tutarsız bir ışık kaynağının kenar algılamada gürültüyü artırabileceğini gösterdi. Bunun yerine, alt mikrometre hassasiyetine ulaşmak için telesentrik lens ile düzenlenmiş dağınık aydınlatma kullandı. Özetle, çağdaş sistemler, daha ileri yazılım analizi için keskin kenarlar ve geometrik olarak önemli özellikler ile karakterize edilen görüntüler üretmek için yüksek kaliteli optikleri sabit LED aydınlatma (genellikle arka aydınlatma) veya lazerle yapılandırılmış ışıkla birleştirir.

2.2.2. Hassas ölçüm için yazılım teknikleri

Donanımın net bir görüntü üretmesinin ardından, yazılım algoritmaları nesnenin sınırlarını hassas bir şekilde belirler. Temel bir işlem hattı, kenar tespitiyle başlar; bu adım, görüntüdeki hangi piksellerin bir bölgenin sınırında olabileceğini belirlemeyi içerir. Geleneksel kenar algılama yöntemleri (Sobel, Canny vb.) hâlâ ön işlem adımı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. 2022 yılında yapılan bir krank mili ölçüm araştırmasında [3], ilk olarak mil profilinin temel kenar piksellerini tespit etmek için Canny operatörü kullanılmıştır. Ancak, yalnızca piksel düzeyindeki kenarlar hassas ölçüm (metroloji) için yeterli değildir çünkü piksel kuantizasyonu doğruluğu sınırlar; kenardaki tek bir piksel, mikrometrelerce hata payı anlamına gelebilir. Bu nedenle, alt piksel (sub-pixel) kenar

konumlandırma yaklaşımları son on yılda önemli ölçüde gelişmiştir. Bu teknikler, kenar konumunun tahminini bir pikselin çok daha küçük bir kısmına kadar iyileştirerek, genellikle 0.1 piksel veya daha iyi bir hassasiyet elde eder (bu da gerçek dünyadaki ölçümlerde mikrometre seviyesinde bir doğruluk anlamına gelir).

Yaygın bir yöntem kenar enterpolasyonudur. Yakın bir kenar pikseli tanımlandıktan sonra, o kenar boyunca yerel gri tonlamalı yoğunluk profili incelenir. Kavram, gerçek kenarın koyudan aydınlığa doğru piksellerin geçiş bölgesinde bulunduğunu varsayar. İkinci dereceden veya daha yüksek dereceli enterpolasyon, yoğunluğun bir eşiği geçtiği veya bir alt piksel konumunda maksimum bir gradyana ulaştığı noktayı belirleyebilir. Wang vd. [3] tarafından geliştirilen çift kamera sistemi, daha doğru tepe tahmini için bir parbole uyması için gradyan görüntüsündeki bir kenar pikselini çevreleyen üç yoğunluk değerini kullanan bir Lagrange ikinci dereceden enterpolasyon yöntemini kullanmıştır. Bunu her iki görüntü ekseninde uygulayarak, kenar noktası için daha kesin x , y koordinatlarını hesaplarlar. Yazarlar, bu enterpolasyon tekniğinin hem basit hem de gerçek zamanlı uygulamalar için yeterince hızlı olduğunu ve standart gürültü koşulları altında 0,01 ile 0,02 piksel arasında değişen alt piksel hatalarıyla iyi yerelleştirme hassasiyeti elde ettiğini gözlemlemektedir. Alt piksel çıkarma işlemlerini uyguladıktan sonra, kalibrasyon hedeflerine düz çizgiler başarıyla yerleştirdiler ve yaklaşık 5×10^{-4} mm'lik tekrarlanabilirlikle mesafeleri ölçtüler. Benzer şekilde, diğer akademisyenler alt piksel kenar algoritmaları önerdiler: bazıları kenar yoğunluk profiline Gauss veya hiperbolik teğet eğrileri uygularken, diğerleri kenar konumunu gelişmiş hassasiyetle belirlemek için moment tabanlı teknikler (örn. Zernike momentleri) kullandılar. Amaç, gerçek kenarın piksel ızgarasını kesişme biçimini doğru bir şekilde modelleyerek piksellerin ayrık özelliklerini aşmak ve böylece temel bir piksel haritasından daha hassas bir kesişim elde etmektir. Dikkat çeken bir metodoloji, son zamanlarda ilgi çeken kısmi piksel veya alan tabanlı alt piksel yöntemidir. Bu yöntem yalnızca tek bir boyuttaki yoğunluk profilini analiz etmekle kalmaz, aynı zamanda bir piksel içinde tasvir edilen nesnenin gerçek alanını da hesaba katar. Poyraz vd. tarafından 2024 yılında yapılan bir çalışma [40], çap değerlendirmesi için bir alt piksel sayma tekniği sundu. Yaklaşımları pikselleri tam pikseller (tamamen nesnenin içinde) ve geçiş pikselleri (sınırdaki bulunan, nesne tarafından kısmen işgal edilenler) olarak kategorilere ayırır. Geçiş pikselleri içindeki ögenin kesirli alanını hesaplayarak (gri tonlamalı normalizasyonla), dairesel nesnenin tüm alanını alt piksel doğruluğuyla belirleyebilirler. Çap, dairenin alan denklemini kullanarak iyileştirilmiş alan ölçümünden belirlenir. Yöntem, kenar tanımayı etkili bir şekilde bir alan tahmini zorluğuna dönüştürerek, daireler ve halkalar gibi simetrik formlar

için yüksek hassasiyet gösterir. Bu yöntem, önceki alt piksel kenar algoritmalarına kıyasla %3–10 oranında doğruluk artışı gösterdi ve test edilen bir O-ringin çapında yaklaşık 1 µm belirsizlikle, bir pikselin 1/20'si kadar etkili bir ölçüm hassasiyetine ulaştı. Önemli bir şekilde, temel yaklaşımlardan %12–35 daha hızlı olmasıyla hesaplama verimliliği gösterdi ve bu nedenle üretim hatlarında hızlı inceleme için cazip hale geldi. Bu kısmi piksel metodolojisinin etkinliği bir eğilimi vurgular: geometrik bilgiyi (yani nesnenin daireselliğini) piksel düzeyindeki verilerle bütünleştirmek, geleneksel kenar algılama algoritmalarının sonuçlarını aşan sonuçlar üretebilir. Ayrıca yazılım ve donanım ortak tasarımının etkileşimini vurgular: Teknik, nesnenin görüntüsünün mükemmel dairesel olmasını ve piksel yoğunluklarını doğru bir şekilde kategorize etmek için yeterli aydınlatmayı garanti eden telesentrik bir kamerayı varsayıyordu. Bu parametreler karşılandığında, sayma tabanlı alt piksel analizinin oldukça etkili olduğu kanıtlandı.

Enterpolasyon ve alan yöntemlerine ek olarak, alternatif alt piksel teknikleri, doğrudan kenar konturuna parametrik bir model uydurmayı içeren model uydurmayı kapsar. Retina görüntüleme bağlamında, Lowell vd. [41], damar profiline 2B Gauss modeli uygulayarak damar genişliğinin bir alt piksel ölçümünü tasarladılar. Endüstriyel görüşte, EDCircles (Kenar Mesafe Daireleri) algoritması, öncelikle hızlandırılmış tanımlama için, eğim verilerini kontur analiziyle bütünleştirerek alt piksel hassasiyetinde dairesel kenarları gerçek zamanlı olarak tanımlamak için geliştirildi. Kenar bağlama ve iyileştirme için özel yaklaşımlar mevcuttur, literatürdeki bir çalışmada [42] tutarlı alt piksel şekilleri elde etmek için kenar piksellerinde dinamik programlama veya grafik araması kullanıldığı görülür. Bununla birlikte, bu çeşitliliğe rağmen, enterpolasyona dayalı ve alana dayalı yaklaşımlar, başlangıçta hedef alanı yaklaşık olarak belirlemek için tipik olarak Canny gibi standart bir dedektörle birleştirilerek çağdaş hassas çap sistemlerinde en sık belgelenen yaklaşımlar olmaya devam etmektedir. Araştırmacılar, örneğin, yumuşatma yoluyla gürültü dayanıklılığını artırarak veya eşik seçimini optimize ederek bu metodolojileri geliştirmeye devam etmektedir. Poyraz vd. tarafından yapılan çalışmada [40], alt piksel sayma yönteminde gri geçiş piksellerini doğru bir şekilde tespit etmek için "sağlam eşik seçimi" tekniğini sunuldu, çünkü yanlış bir eşik seçimi sınır piksellerini yanlış sınıflandırabilir ve doğruluğu tehlikeye atabilir. Son zamanlarda yapılan bir öneri, yalnızca türevlere güvenmek yerine, kenar lokalizasyonu için bir pencere üzerindeki entegre yoğunluğun kullanılmasını savunuyor ve gürültüye karşı gelişmiş kararlılık iddia ediyor.

Son 15 yıl içerisinde, alt piksel kenar tespitinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir; geçmişte son teknoloji olarak kabul edilen, bir pikselin birkaç onda biri düzeyindeki

doğruluk artık rutin olarak aşılmakta, çeşitli yöntemler ise ideal görüntüleme koşulları altında yalnızca birkaç yüzde bir piksel mertebesinde belirsizlikle çalışabilmektedir. Bu gelişmeler, standart kamera büyütmeleriyle mikrometre düzeyinde fiziksel doğruluğa ulaşılmasını mümkün kılmıştır. Alt piksel artık hassasiyetinde bireysel kenar noktaları belirlendikten sonra bir sonraki adım, bu noktaları analiz ederek çapı belirlemektir. Bu genellikle, kenar noktalarının sürekli bir kontur oluşturacak şekilde birleştirilmesi (kontur çıkarımı) ve ardından bir mesafenin ölçülmesi veya geometrik bir şeklin oturtulmasını içerir. Örneğin, bir milin dış çapının profil üzerinden belirlenmesi gibi basit senaryolarda, karşılıklı iki kenar çizgisinin konumları tespit edilerek aralarındaki mesafe ölçülerek çap bulunabilir. Wang vd. [3], milin karşılıklı iki açıdan görüntüsünü alan kameralarla elde edilen kenar noktalarına doğrusal denklem oturtmak için en küçük kareler yöntemini kullanmıştır. Görüntüdeki bu iki paralel çizgi arasındaki mesafe, sistem doğru şekilde kalibre edildiğinde, gerçek birimlere çevrilerek milin çapını belirlemiştir. Çizgilerin tam olarak paralel olmaması durumunda güvenilirliği artırmak için, bu iki doğru arasındaki maksimum ve minimum mesafenin ortalamasını alarak hesaplama yapmışlardır. Bu yöntemle bir kalibrasyon levhası üzerindeki 100 mm'lik bir ölçüm, ortalama yaklaşık 0,001 mm hassasiyetle gerçekleştirilmiştir.

Tek kameralı sistemlerde ise, bir nesnenin sol ve sağ kenarları belirlenip (dikey bir nesne için) x -koordinatları arasındaki fark alınarak piksel cinsinden genişlik bulunabilir ve ardından bu değer, bir ölçek faktörü veya kalibrasyon denklemine göre milimetreye çevrilebilir. Che vd. [37], bu yöntemi sade bir şekilde uygulamıştır: bileşeni aydınlattıktan sonra, bir referans parçayı kumpasla ölçerek piksel-mm dönüşüm oranını belirlemiş ve ardından görüntüde kenar konumlarını takip ederek çap değişimlerini gözlemlemişlerdir. Ancak bu yöntemde, kameranın belirli bir mesafe ve açıyla sabitlenmiş olması gerekir; sistemde yapılacak herhangi bir değişiklik yeniden kalibrasyon gerektirir [36]. Bu nedenle daha gelişmiş sistemler, bilinen hedefleri veya geometrileri kullanarak görüntü koordinatlarını gerçek 3B koordinatlarla ilişkilendiren kapsamlı kalibrasyon modellerini entegre etmektedir. Eğer dairesel şekil tamamen görünürse, kontura bir daire veya elips oturtmak oldukça etkili olabilir. Halka biçimli nesneler (örneğin O-ring'ler, rulmanlar, açıklıklar) için yaygın bir yöntem, tüm kenar noktalarının toplanması ve bunlara en küçük kareler yöntemiyle bir daire oturtulmasıdır. Görüntü telesentrikse (perspektif etkiler yoksa), bu daire oturtma işlemi doğrudan çapı verir. Liu vd. [39], küçük çaplı millerin etrafına düşen lazer şeridinin orta noktalarına daire oturtarak bu yöntemi kullanmış ve 2 μ m altında hassasiyet sağlamışlardır.

Eğer görüntü telesentrik değilse ve perspektif bozulmalar varsa, kontur elips şeklini alabilir. Bu durumda, program genellikle elips oturtur ve ardından elipsin eksenlerinden çapı geometrik ilkelerle hesaplar. Tan vd. [34], yapılandırılmış ışıkla çalışan modellerinde, mil üzerindeki lazer şeridine elips oturtmuş ve elipsin eksenlerinden çapı, kameranın konumu ve ışık düzleminin yönü dikkate alınarak elde etmiştir. Matematiksel olarak bu, elips ve kamera merkezinden eğik eliptik koni denklemi türetmeyi ve sonuçta milin çap formülünü elde etmeyi gerektirmiştir. Kalibrasyon sonrası bu model, mil dönerken gerçek zamanlı çap ölçümünü sağlamış ve 0,02 mm altında hata ile sonuç vermiştir.

Modern sistemler genellikle kontur analizini alt piksel kenar verileriyle birleştirerek dayanıklılığı artırır. İlk kenar tespiti sonrası, sistem bir kenar takip veya kontur izleme yöntemiyle kenar piksellerini sürekli konturlara dönüştürebilir. Bu işlem, gereksiz noktaların ve gürültünün ortadan kaldırılmasını kolaylaştırır [43], [44], [45]. Birçok araştırmacı, Canny kenar bağlama algoritmasının bir çeşidini veya Douglas-Peucker gibi kontur sadeleştirme algoritmalarını kullanmaktadır [46]. Net bir kontur elde edildikten sonra, geometrik oturtma (örneğin doğru veya daire) uygulanır. Oturtma işlemi, noktalara tahmini alt piksel hassasiyetlerine göre ağırlık verilerek veya aykırı değerlerin elenmesiyle geliştirilebilir. Bazı çalışmalar, çap hesaplamasında model tabanlı yaklaşımları inceler; burada nesnenin modelinin görüntüyle en iyi uyumu sağlaması için en uygun çap değeri belirlenmeye çalışılır. Wei ve Tan'ın yöntemi [36], bilinen bir mil ile bazı parametreleri tanımlayarak, bilinmeyen çapın hata minimizasyonu ile belirlenmesini sağlamıştır. Günümüz makine görüşü sistemleri, ölçümleri iyileştirmek amacıyla yinelemeli optimizasyon veya makine öğrenimi yöntemleri kullanmaktadır. Örneğin bir araştırma grubu, küresel bir nesnenin çapını yapılandırılmış ışıkla ölçmeden önce lens distorsiyonunu düzeltmek için sinir ağı kullanmıştır. Bu da öğrenme tabanlı kalibrasyonun artan önemini göstermektedir. Bununla birlikte, genel olarak klasik geometri ve en küçük kareler yöntemi hâlâ çap hesaplamalarının temelini oluşturmaktadır.

Yazılımlardaki son gelişmeler, çağdaş görüntü tabanlı sistemlerin olağanüstü yüksek hassasiyete ulaşmasını sağlamıştır. Örnek olarak, literatürden birkaç kıyaslama sonucunu ele alalım: 2011 yılında geliştirilen çelik ölçüm cihazı ölçümü için bir görüntüleme sistemi[36], bir perspektif kameranın kalibrasyonu ve kenarlara çizgi oturtulmasının uygulanmasının ardından yaklaşık 0,008 mm (8 μ m) ortalama çap hataları göstermiştir. Gelişmiş kalibrasyona sahip 2014 tarihli bir sistem [1], statik shaftlarda yaklaşık 0,005 mm (5 μ m) hata elde etmiştir. 2021 yılına gelindiğinde [3], çift kamera veya çift telesentrik yapılandırmalar bunu 1–2 μ m aralığına çıkarmıştır. Aynı parça $\pm 1,02 \mu$ m'de ölçen üst düzey bir CMM ile

istatistiksel olarak karşılaştırılabilir olan $\pm 1,07 \mu m$ 'lik bir ölçüm belirsizliği göstermiştir. Telesentrik optikler ve türev tabanlı bir kenar bulucu kullanan bir çalışma [27], 10 mm silindirleri ölçerken yalnızca $0,24 \mu m$ 'lik bir RMS hatası elde etti; bu da yaklaşık $2,4 \times 10^{-5}$ 'lik bir bağıl hataya karşılık gelir. Bu performans, optik metrolojinin fiziksel sınırlarına yaklaşarak, kararlı optikler ve aydınlatma gibi gelişmiş donanımlar ile gürültüye dayanıklı alt piksel ve uyum algoritmaları gibi karmaşık yazılımlar arasındaki sinerjiyi göstermektedir.

2.3. Gölge Projeksiyonu Yöntemi

Gölge görüntüleme yöntemi, nesnelerin özelliklerini çıkarmak için gölgelerin boyutlarını ve konturlarını analiz ederek ışığı kullanan bir ölçüm tekniğidir. Bir ışık kaynağı, nesnenin silüetini/gölgesini bir sensöre veya ekrana yansıtır ve gölge görüntüsünün analiz edilmesi çap veya kesit boyutları gibi ölçümler verir. Bu yöntem, teller, tüpler, çubuklar veya dairesel biyolojik örnekler gibi silindirik veya dairesel kesit gösteren bileşenler için etkilidir. Geometri belirlendiğinde, düşen gölgenin genişliği nesnenin çapına karşılık gelir. Gölge profilinin analiz edilmesi, doğrudan temas olmadan bir nesnenin boyutunun ölçülmesini sağlar. Temel bir gölge projeksiyon kurulumu, nesnenin bir tarafına yerleştirilmiş bir ışık kaynağı ve karşı tarafa yerleştirilmiş bir kamera sensörü veya ekran gibi bir dedektörden oluşur. Aydınlatıldığında, nesne ışığı engelleyerek dedektörde belirgin bir gölge oluşturur. Temel kavram geometrik projeksiyondur: gölgenin boyutları, nesnenin kesitinin ölçekli bir versiyonunu temsil eder. Işık ışınları kolime edildiğinde, gölge boyutu nesnenin gerçek boyutuna çok yakın olur ve bu da birebir büyütmeyle sonuçlanır ve böylece ölçümü kolaylaştırır. Geleneksel optik karşılaştırmacılar, paralel ışık üretmek ve doğrudan ölçüm amaçları için bir ekranda bozulmamış, büyütülmüş bir gölge oluşturmak için bu yöntemi kullanır. Tersine, bir nokta ışık kaynağı sabit bir mesafeye yerleştirildiğinde, ışınlar ıraksar ve benzer üçgenlerin özelliklerine benzer şekilde büyütülmüş bir gölgeyle sonuçlanır. Bu senaryoda, gözlemlenen gölge genişliği ve kurulumdaki mesafeler nesnenin gerçek çapını belirlemek için kullanılabilir. Bu sistem tasarımı, merceksiz temel LED'lerin veya nokta lambalarının kullanımına izin verirken hassas geometri gerektirir.

2007 yılında yayınlanan bir çalışmada [47], dairesel kesitlere sahip nesnelerin boyutlarının ölçülmesi ile ilgili olarak noktasal ışık kaynaklarının kullanıldığı gölge yansıtma yönteminin kullanımı incelenmiştir. Ölçüm kurulumunu basitleştirmek amacı ile paralel ışık huzmesi kaynağı yerine noktasal ışık kaynakları kullanırlar. Boyutu belirlemek

için bir noktasal ışık kaynağı gereklidir ve boyutlarını hesaplamak için hedefin konumu bilinmelidir. Bu nedenle, hedef konumu hesaplamak için ikinci bir ışık kaynağı kullanılır. Ölçülen ögenin ölçüm sırasında görüntüleme sensörü üzerinde oluşturduğu gölgenin incelenmesi ile çap belirlenir. Lens kullanılmadan, bir görüntüleme sensörü kullanılarak ölçüm gerçekleştirilir. Burada lensten kaynaklanabilecek aberasyonun önüne geçmek amaçlanmıştır. Önerilen teknik kullanılarak ölçülebilen en büyük sapma $5,3 \mu m$ idi.

Üçgenleme geometrisi oluşturmak için birden fazla ışık kaynağı veya sensörün kullanılması, orijinal yöntemin yenilikçi bir şekilde geliştirilmesini temsil eder. Amaç, nesne ile sensör arasındaki mesafe gibi belirsizlikleri ortadan kaldırmaktır. Radil vd. tarafından önerilen yöntem [47] aynı nesnenin gölgelerini sırayla tek bir dedektöre yansıtan, bilinen farklı konumlara yerleştirilmiş iki nokta ışık kaynağını içerir. Nesnenin çapını iki gölge konumunun karşılaştırılması yoluyla hesaplamak için nesne ile dedektör arasındaki kesin mesafe gerekli değildir. Çift aydınlatma yöntemi, bir nesnenin kenarlarını 3B bulmak için iyi çalışır. Bilim insanları, bu yöntemin nesnenin düzlemde nereye yerleştirildiğinden etkilenmeyen okumalar verdiğini söyledi. Testlerinde tek bir ışıkla yaklaşık $2 \mu m$ 'ye kıyasla yaklaşık $1 \mu m$ 'lik bir yanlışlıkla alt mikrometre seviyesinde daha iyi doğruluk elde edebildiler. Üçgenleme, gölgeyi çeşitli açılardan gözlemlemek için iki veya daha fazla kamera kullanılarak elde edilebilir. Terlau vd. [48] tarafından geliştirilen çok sensörlü gölge görüntüleme üçgenleme sistemi, bu teknolojinin çağdaş bir örneğini temsil eder. Bu ölçüm, üretim süreci sırasında silindirik bir alet ucundaki bükülme derecesini değerlendirir. Bu sistemde, alete bağlı bir LED nokta ışık kaynağı olarak görev yaparken, küçük diyafram maskeleriyle donatılmış her lenssiz kamera modülü, LED'in gölgesinin sensörü boyunca hareketini gözlemler. Her modül, LED'in kendisine göre yönünü izler ve gölgenin sensördeki ofseti, geliş açısına karşılık gelir. Üçgenleme, iki sensörden gelen verileri birleştirerek aletin 3B konumunu ve sapmasını bulur. Bu tasarımla, aletin konumunu $2 m \times 1 m \times 0.2 m$ 'lik bir alanda, $50 \mu m$ 'den daha az bir belirsizlikle ölçmek mümkün olmuştur.

2022 yılında yapılan bir çalışmada [49] silindirin kenarının projeksiyon gölgeleme yöntemiyle belirlenmesi için bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntem, fotodetektörün sınırlı dinamik aralığına rağmen silindirik nesnelerin çapını ölçme imkanı sunması ve ölçüm sonuçlarında sistemsal sapmalara yol açmamasıyla dikkat çekmektedir. Bu yöntem, nesnenin görüntüdeki kenarının yoğunluk bağımlılığının türeviden maksimum pozisyonunu belirleyerek nesnenin kenarının konumunu tespit etmeye dayanmaktadır. $10 mm$ 'ye kadar çapı olan nesnelerin ölçümünde, silindirik bir nesnenin çapının ölçümünde $0.24 \mu m$ hata elde edilmiştir. Bu, $2,4 \times 10^{-5}$ oranında bir bağıl ölçüm hatasına denk gelmektedir. Elde edilen

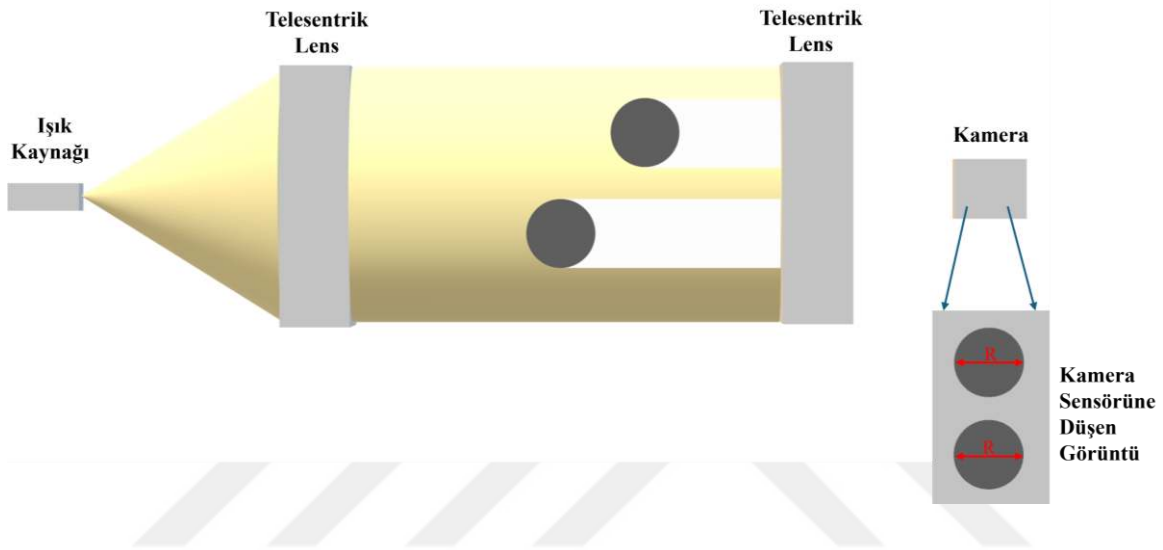
sonuç, önerilen yöntemin etkinliğini ve gelecek vaatlerini doğrulamaktadır. Bu yöntem, silindirlerin çapının doğru bir şekilde ölçülmesinde kullanılabilecek ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan ölçüm tekniklerine yeni bir katkı sağlayabilecektir.

2.4. Telesentrik Görüntüleme Sistemleri

Telesentrik lens, sonsuz bir odak uzunluğuna sahip olacak şekilde tasarlanmış bir lens türüdür. Bu, lensin, nesnenin mesafesi ne olursa olsun, optik eksene mükemmel şekilde paralel görüntüler üretebildiği anlamına gelir. Yüksek alan derinliği ile distorsiyonsuz bir görüntü sağlayabilir. Sonuç olarak, telesentrik lensler, makine görüş sistemleri gibi nesnelerin hassas ölçümlerinin gerekli olduğu uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Son derece doğru görüntüler üretme yetenekleri nedeniyle telesentrik lensler, endüstriyel inceleme, tıbbi görüntüleme ve bilimsel araştırma dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Telesentrik merceğin benzersiz optik yapısı sayesinde, TVS sistemlerinin büyütme oranı, bir nesnenin mesafesi çok az değiştiğinde bile sabit kalır. Böylece TVS sistemleri, genellikle mikrometre sınıfında olmak üzere mükemmel doğruluk elde edebilir [33], [50].

Telesentrik görüntüleme sistemleri, optik eksene paralel ana ışınlar oluşturarak perspektif hatalarını ortadan kaldıran optik düzeneğidir. Bu sistemlerde giriş veya çıkış göz bebeği (ya da her ikisi) optik sonsuzda yer alır. Bu da, sahnenin perspektif değil, ortografik (ölçüye sadık) projeksiyonla görüntülenmesini sağlar. Böylece, nesneye olan mesafenin ya da sensör konumunun az da olsa değişmesi görüntü büyüklüğünü ciddi oranda etkilemez. Gerçekte, nesne alanı telesentrik bir lenste objenin öne ya da arkaya hareket etmesi görüntü boyutunu değiştirmez; sadece odak derinliği dışına çıkıldığında görüntü netliği azalır. Aynı şekilde, görüntü alanı telesentrik bir sistemde sensör biraz oynasa bile büyütme oranı sabit kalır. Telesentrik optikler görüş alanı boyunca büyütmeyi sabit tutarak görüntü geometrisini bozulmadan korur; bu da optik tasarımı daha karmaşık hale getirir [14]. Telesentrikliği elde etmek için diyaframın (aperture stop) lensin odak noktalarına göre özel konumlandırılması gerekir. En basit yöntem, diyaframı lensin odak düzlemine yerleştirmektir. Örneğin, diyaframı ön odak düzlemine koyarsanız, yalnızca nesne tarafından gelen ve optik eksene paralel olan ışınlar geçebilir; bu da giriş göz bebeğini sonsuza taşır ve nesne alanı telesentriklik sağlar. Aynı mantıkla, diyafram arka odak düzlemine konulursa görüntü alanı telesentrik bir sistem elde edilir. Gerçekte piyasada telesentrik olarak satılan çoğu lens, yalnızca nesne tarafında telesentriktir ve bu da ölçüm görevleri için çoğu zaman yeterlidir. Ancak hem giriş hem çıkış tarafında telesentrik olan çift taraflı (bi-telesentrik) lensler, hem

nesne mesafesindeki hem de sensör pozisyonundaki değişikliklerden etkilenmeyen, en kararlı ölçüm sistemlerini sağlar. Telesentrik görüntüleme sistemlerinin en büyük avantajları, büyütme oranının sabit kalması ve perspektif kaynaklı görüntü kaymalarından kaynaklanacak hataların ortadan kaldırılmasıdır. Telesentrik lensler ile, derinlik farkı olsa bile tüm parçalar gerçek boyutlarıyla görüntülenir. Böylece, örneğin bir parçanın öne veya arkaya uzanan kısımları daha büyük ya da küçük görünmez (Şekil 2.1). Bu özellik, özellikle 3B nesnelerin ölçümünde büyük bir doğruluk sağlar [14].



Şekil 2.1. Telesentrik lenslerle oluşturulmuş gölge projeksiyon tabanlı optik çap ölçüm sisteminin şematik gösterimi.

Telesentrik lensler, gerçek boyut ve şekil analizine ihtiyaç duyulan makine görüşü uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Örneğin, üzerinde farklı yüksekliklerde detaylar bulunan mekanik bir parçanın telesentrik lensle görüntülenmesi durumunda tüm detaylar aynı büyüklükte, ölçek bozulması olmadan algılanır. Bu da sistematik ölçüm hatalarını önler. Ayrıca, büyütme oranının sabit olması sayesinde, görüntü biraz bulanıklaşsa da ölçüm değeri değişmez. Bu özellik, ölçüme uygun efektif alan derinliğini ciddi şekilde artırır. Ayrıca, görüntüdeki perspektif bozulmalarını ve ışık yoğunluğu düşüşlerini de önler. Özellikle görüntü düzlemini dik olarak aydınlatan ana ışınlar sayesinde, görüntünün tamamında parlaklık ve renk dengesi korunur. Bu, radyometrik hassasiyet gerektiren bazı görüntüleme uygulamaları için kritiktir. Ayrıca, sensör pozisyonundaki küçük değişiklikler büyütmeyi etkilemediğinden, kamera montajında daha geniş toleranslar kabul edilebilir. Bu da sistem kurulumunu ve hizalamayı kolaylaştırır.

Telesentrik sistemler, nesne tarafı (object-space), görüntü tarafı (image-space) ve çift taraflı (double telecentric) olarak sınıflandırılabilir. Endüstriyel ölçüm sistemlerinde genellikle yalnızca nesne tarafı telesentriklik yeterli olur; ancak görüntü tarafında telesentrik olmayan sistemlerde büyük sensörlerde kenarlarda bozulmalar görülebilir. Görüntü tarafında telesentriklik ise tüm alanda eşit çözünürlük ve ışık sağlar. En iyi ölçüm performansı, her iki alanın da telesentrik olduğu bi-telesentrik sistemlerle elde edilir. Bu tür sistemlerde, diyafram lensin ön ve arka optik sistemlerinin ortak odak düzlemine yerleştirilir. Böylece hem gelen hem çıkan ışınlar paralel hale gelir. Giriş tarafında paralel ışınlar, geniş bir derinlikte sabit odak sağlar; çıkış tarafında paralel ışınlar ise büyütme oranını ve ışık homojenliğini korur. Bu nedenle, boyutsal değişimlerin mikrometre mertebesinde bile kritik olduğu uygulamalarda bu sistemler tercih edilir.

Telesentrik lensler, üretim hatlarında işlenen parçaların çap, uzunluk, genişlik gibi boyutlarının hassas ölçümü için yaygın olarak kullanılır. Örneğin, mil veya delik çaplarının konumdan bağımsız olarak doğru şekilde ölçülmesini sağlar. Literatürde bir çalışmada [51], çift taraflı telesentrik bir sistemle 600–800 mm çapındaki büyük shaftların temassız ve yüksek hassasiyetle ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu sistem, endüstriyel doğruluk standartlarını karşılamış, düşük bozulma oranı ($<0,1$) ve yüksek telesentriklik hassasiyeti ($<0,013^\circ$) sağlamıştır. Ayrıca, vida dişleri ve dişlilerin görüntülenmesi gibi uygulamalarda da telesentrik lensler sayesinde, eğiklik ya da derinlik farkları nedeniyle oluşabilecek profil bozulmalarının önüne geçilir.

Telesentrik sistemler artık biyomedikal görüntüleme ve mikro-üretim alanlarında da yaygınlaşmaktadır. Özellikle kan damarlarının, mikro akışkan kanalların ya da retina damarlarının görüntülenmesinde, derinliğe bağlı büyüklük değişiminin ortadan kaldırılması sayesinde doğru ölçümler yapılabilir. 2025 tarihli bir çalışma [52], düşük büyütmeli bir telesentrik lens kullanarak 3B kan akışı görüntülemesini gerçekleştirmiştir. Bu sistem, geniş bir derinlik aralığında büyütme sabitliği sağlamıştır. Benzer şekilde, mikroçip ya da lab-on-chip sistemlerinde, sıvı ön yüzeyinin ilerlemesinin izlenmesi ve mikro delik çaplarının doğru şekilde ölçülmesi telesentrik sistemlerle mümkün olmuştur.

Telesentrik sistem kurarken dikkat edilmesi gereken bazı noktalar da vardır. Bu lensler genellikle daha büyük, daha ağır ve daha pahalıdır çünkü içerdikleri optik eleman sayısı fazladır. Ayrıca, ön mercek genellikle görüntülenen alanı tamamen kapsayacak kadar büyük tasarlanır ve bu da montaj için sağlam bir yapı gerektirir. Telesentrik lenslerin sabit çalışma mesafeleri ve sınırlı ayarlanabilirlikleri bulunur. Bu nedenle sistem tasarımı yapılırken uygulama ihtiyaçlarına göre en uygun lensin seçilmesi önemlidir. Ayrıca telesentrik

sistemlerde aydınlatma da büyük rol oynar. Çünkü bu sistemler sadece optik eksene yakın gelen ışınları kabul ettiğinden, yüksek kontrastlı, kolimasyonlu bir arka aydınlatma gerekir. Bu amaçla genellikle bir başka telesentrik lens ya da kolimatör kullanılarak arka aydınlatma paralel hale getirilir. Bu sayede, difüz aydınlatmanın neden olduğu kenar bulanıklıkları ortadan kalkar; kenarlar net biçimde görünür hale gelir. Bu durum kenar tespiti doğruluğunu ve tekrar edilebilirliğini artırır; dolayısıyla ölçüm sistemlerinin daha hızlı çalışmasını da sağlar.

2.5. Biyomedikal Uygulamalarda Çap Ölçümü

Telesentrik sistemler, nesnelerin konumundan bağımsız olarak görüntülenmesini sağlayarak çapları ölçmek için ideal sistemlerdir. Örneğin, vasküler çalışmalarda veya stent üretiminde çap ölçümlerindeki tutarlılık hem yapılan araştırmalar için hem de üretim hattı için çok önemlidir. Çalışmalar, telesentrik optiklerin standart görüntüleme sistemlerine kıyasla ölçüm belirsizliklerini azaltabileceğini göstermiştir [53].

İğneler, kateterler ve robotik kollar gibi cerrahi aletlerin çaplarının üretiminin hassas bir biçimde yapılması, insan anatomisiyle uyumluluğu sağlamak ve başarı oranlarını artırmak için kritik öneme sahiptir. Cerrahi iğnelerin yerleştirme sırasında doku travmasını en aza indirmek ve hassas prosedürlerde etkili dikiş sağlamak için dikkatlice tasarlanması ve elde edilen ürünün tasarımıyla tutarlı olması beklenir. Benzer şekilde, kardiyovasküler veya idrar yolu müdahalelerinde kullanılan kateterler, vasküler hasar veya tıkanıklık gibi komplikasyonları önlemek için çaplarının hassas bir şekilde ölçülmesi kullanım standartlarına uygunluğu denetlemek için önemlidir. Telesentrik sistemler, nesnenin konumundan kaynaklanan ölçüm hatalarını ortadan kaldırarak bu hassasiyet seviyesine ulaşmada önemli bir rol oynar. Bu, aletlerin çaplarının üretim süreci boyunca doğru ve tutarlı bir şekilde ölçülmesini sağlar. Robotik cerrahi sistemlerinde kullanılan alet çapındaki hassasiyet de aynı derecede kritik öneme sahiptir. İnce ayarlı cerrahi aletlerle donatılmış robotik kollar, minimal invaziv prosedürleri yüksek doğrulukla gerçekleştirmek için kullanılır. Burada tüm aletlerin tasarıma uygun şekilde ölçüldüğü kalite kontrol ile sağlanmış olmalıdır. Cihazın çapındaki küçük sapmalar bile bu sistemlerin hizalamasını ve işlevselliğini etkileyebilir ve potansiyel olarak cerrahi sonuçları tehlikeye atabilir. Telesentrik sistemler, tekdüze büyütme ve bozulma içermeyen görüntüleme prensibi ile, bu araçların üretimi sırasında kalite kontrolünde etkili olup, klinik ortamlarda güvenilirliklerini ve performanslarını garanti altına alırlar. Boyutlar üzerindeki bu hassas kontrol, cerrahi araçların insan anatomisinin farklı boyutları ve şekilleriyle uyumluluğunu artırmasının

yanısıra iyileştirilmiş prosedürel sonuçlara da katkıda bulunur. Araçların tam özelliklere uymasını sağlayarak, komplikasyon riskini azaltmaya, hasta iyileşme sürelerini iyileştirmeye ve cerrahi müdahalelerin genel başarı oranını artırmaya yardımcı olur.

Bir başka uygulama alanı olarak tıbbi vidalar gösterilebilir. Tıbbi vidalar, kemik kırığı sabitleme, spinal füzyon ve eklem değiştirme gibi çeşitli ortopedik ve cerrahi prosedürlerde kullanılır. Bu vidaların çapı, fiksasyon gücü, yük dağılımı ve mekanik arızaya karşı direnç dahil olmak üzere biyomekanik performanslarını doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Vida çapının doğru ölçümü ve seçimi, klinik sonuçları optimize etmek ve komplikasyonları en aza indirmek için önemlidir. Tıbbi vidanın iç çapı, vidanın merkezi veya şaftının çapıdır. İç çapın doğru ölçülmesi, vidanın gerekli dış boyutu ve adımını karşılayabilmesi için zorunludur. İç çapı çok küçük olan bir vida, yeterli dış tutuşunu sağlayamayarak vidanın stabilitesini azaltır ve hatta vidanın kırılmasına neden olabilir. Diğer yandan, tıbbi vidanın dış çapı, dişler ile birlikte vidanın dış yüzeyinin çapıdır. Dış çapın ölçülmesi, vidanın kemik veya dokuya düzgün bir şekilde yerleştirilmesi ve güvenli bir şekilde yerinde kalması için kritik bir adımdır. Dış çapı çok büyük olan bir vida, doku hasarına veya sıkışmaya neden olabilir, bu da komplikasyonlara ve iyileşme süresini uzamasına yol açar.

Cerrahi iğneler, kateterler ve robotik cerrahi aletlerin üretiminde çap kontrolünün yüksek hassasiyetle sağlanması, hem işlevsel performans hem de insan anatomisiyle uyumluluk açısından kritik öneme sahiptir. Örneğin, ISO 9626:2016 [54] standardı, cerrahi iğnelerde çap toleransının $\pm 0,02$ mm sınırında olması gerektiğini belirtmektedir. Bu tolerans aralığı, doku hasarını en aza indirmeye ve yerleştirme doğruluğunu artırmaya yardımcı olur. Benzer şekilde, ISO 10555-1 [55] standardına göre kateterlerin dış çap toleransı $\pm 0,05$ mm'yi geçmemelidir. Bu düzeydeki kontrol, damar içi müdahalelerin güvenliğini artırmak açısından önemlidir. Bu kadar dar toleransların üretim hattında sağlanabilmesi için yüksek doğrulukta ölçüm sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada, telesentrik görüntüleme sistemleri, perspektif bozulmasını ortadan kaldırarak ve nesnenin konumundan bağımsız olarak sabit büyütme sağlayarak gerekli ölçüm hassasiyetinin elde edilmesine olanak tanır. Benzer bir hassasiyet, tıbbi vida uygulamalarında da gereklidir. ASTM F543 [56] standardına göre ortopedik vidaların dış çap toleransı genellikle $\pm 0,1$ mm düzeyindedir. Bu tolerans, vidanın kemik içine yerleştirilme güvenliği, vida-kemik temas yüzeyinin stabilitesi ve mekanik dayanımı açısından doğrudan etkilidir. Özellikle osteoporoz gibi kemik kalitesinin azaldığı durumlarda bu hassasiyet daha da önemli hale gelir. Matsukawa vd. [57], pedikül vidası çapında yalnızca 0,2 mm'lik bir değişimin, çekme mukavemetinde %15'e

varan bir fark yaratabileceğini raporlamıştır. Bu sonuç, biyomekanik performansın küçük boyutsal sapmalara karşı yüksek duyarlılığını açıkça ortaya koymaktadır.

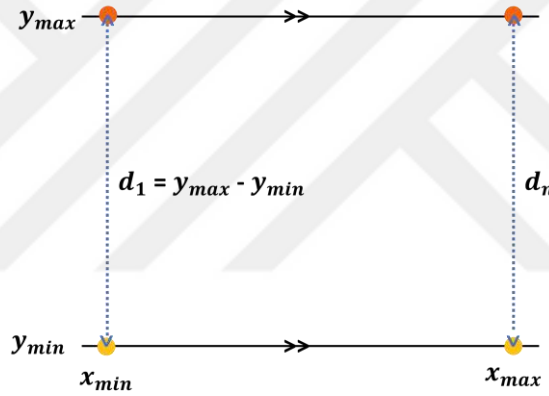
Son çalışmalar, özellikle malzeme özelliklerinin tehlikeye girdiği osteoporotik kemik koşullarında vida çapının fiksasyon stabilitesi üzerindeki etkisini vurgulamıştır. Matsukawa vd. [57] tarafından yapılan araştırma, çaptaki küçük değişikliklerin bile, sabitleme kabiliyetlerinin kritik bir ölçüsü olan pedikül vidalarının çekme mukavemetini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Benzer şekilde, Sensale vd. [58] tarafından tartışıldığı gibi sonlu eleman analizleri, implant stabilitesinin vida çapına olan artan duyarlılığını ortaya koyarak kişiselleştirilmiş tıbbi uygulamalarda hassas ölçümlerin gerekliliğini vurgulamaktadır. Çap ölçümünün önemi mekanik hususların ötesine uzanır. Uygun şekilde boyutlandırılmış vidalar, kemik-vida arayüzünde mikro hareket riskini azaltır ve böylece enfeksiyon, doku hasarı ve implant gevşemesi olasılığını düşürür. Ayrıca, Zhao vd. [59] tarafından özetlenenler gibi sensör entegreli vidalardaki gelişmeler, gerçek zamanlı sağlık izlemeyi kolaylaştırma ve cerrahi hassasiyeti iyileştirmede vida geometrisinin gelişen rolünü sergilemektedir. Doğru çap ölçümünü ihmal etmek, optimum olmayan vida seçimine yol açabilir ve bu da çevredeki kemikte fiksasyonun bozulmasına veya gereksiz strese neden olabilir. Modern görüntüleme teknikleri, hesaplamalı araçlarla birleştirildiğinde, bireysel hasta ihtiyaçlarına göre uyarlanmış uygun vida boyutlarının değerlendirilmesinde ve seçilmesinde benzeri görülmemiş bir hassasiyet sunar. Sonuç olarak, tıbbi vida çapının ölçümü yalnızca teknik bir ayrıntı değildir; tıbbi cihaz tasarımı ve uygulamasının temel bir yönüdür. Hasta güvenliğini, implant ömrünü ve cerrahi başarısını doğrudan etkiler ve bu da onu sağlık profesyonelleri ve araştırmacılar için vazgeçilmez bir odak noktası haline getirir.

3. METODOLOJİ

3.1. Veri Toplama ve Analiz Yöntemleri

Görüntü işleme temelli sistemler, çap ölçümünde donanım ve yazılımın birlikte kullanıldığı modern yaklaşımlardır. Bu bölümde, analiz algoritmaları açıklandı.

Literatürde çap ölçümü için çeşitli yöntemler mevcut olup, çalışma kapsamında iki paralel çizgi arasındaki uzaklığı belirlemeye yönelik tarama yapıldı. Şekil 3.1’de, birbirine tamamen paralel olan iki çizgi arasındaki en kısa mesafe, geometrik yaklaşımla tanımlandı. Bu mesafe, ilerleyen bölümlerde kenar tespiti sonrası çap hesabında temel alınan ölçüm yaklaşımını temsil etmektedir. Tamamen paralel iki çizgi arasındaki mesafeyi belirlerken kullanılan ortalama alma metodu için Şekil 3.1’e bağlı olarak Denklem (1) ile paralel iki çizgi arasındaki mesafe belirlenebilir.

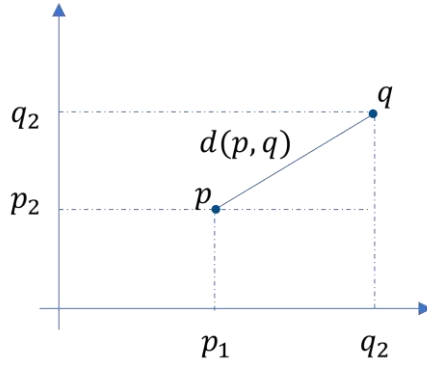


Şekil 3.1. İki paralel çizgi arasındaki en kısa mesafenin geometrik olarak belirlenmesi

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{n} \quad (1)$$

İki nokta arasındaki mesafeyi belirlemek için kullanılabilen başka bir etkili yöntem ise iki nokta en kısa dik mesafenin Öklid geometrisi kullanılarak hesaplandığı geometrik hesaplamaları içerir [60], [61]. Öklid mesafesi, iki nokta arasındaki mesafeyi hesaplamak için kullanılan matematiksel bir ölçüdür. Bu mesafe, iki noktanın koordinatları kullanılarak hesaplanır ve bir doğru üzerindeki iki nokta arasındaki en kısa mesafeyi temsil eder. Mesafeyi hesaplamak için Pisagor Teoremi kullanılır. Şekil 3.2’de, 2B düzlemde yer alan iki nokta arasındaki Öklidyen mesafe geometrik olarak temsil edildi. Bu gösterim, kenar noktalarının koordinatları bilindiğinde mesafenin nasıl hesaplanacağını açıklamak amacıyla

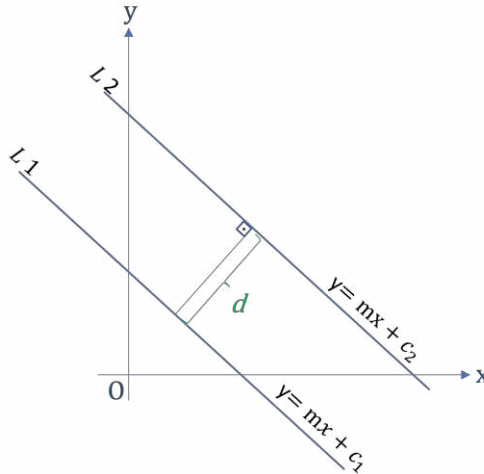
kullanıldı. Çap hesaplamasında temel alınan mesafe ölçüm yaklaşımı, bu tanım üzerine kuruludur. (2) denklemindeki p ve q , koordinat düzleminde herhangi iki noktadır (Şekil 3.2). d , iki nokta arasındaki en kısa mesafeyi temsil eder.



Şekil 3.2. İki boyutlu düzlemde iki nokta arasındaki Öklidyen uzaklığın geometrik temsili

$$d(p, q) = \sqrt{(q_1 - p_1)^2 + (q_2 - p_2)^2} \quad (2)$$

Şekil 3.3'te, birbirine yakın eğime sahip iki çizgi arasındaki en kısa mesafe, geometrik olarak tanımlandı. Bu yaklaşım, çap hesaplamasında kenar konturlarından elde edilen doğrusal uzantılar arasında mesafe ölçümünün temelini oluşturur. Sistem tasarımında bu mesafe, çapın hesaplanması için kullanıldı.



Şekil 3.3. İki boyutlu düzlemde iki çizgi arasındaki en kısa Öklidyen mesafenin geometrik gösterimi

Literatürde kullanılan [62], [63], 2B bir uzayda iki çizgi arasındaki mesafeyi hesaplamak için kullanılabilecek başka bir metod denklem (3)' te verildi:

$$d = \frac{|c_2 - c_1|}{\sqrt{1 + m^2}} \quad (3)$$

Burada c_1 ve c_2 , karşılıklı iki doğrunun y -eksenini kestiği noktaları (y -kesişimlerini) temsil ederken, m eğim değeridir ve ilgili doğruların eğimlerinin ortalaması alınarak yaklaşık olarak hesaplanır. Bu formülasyon, sistemin çap ölçüm algoritmasında, konturdan elde edilen iki kenar doğrusu arasındaki minimum mesafeyi belirlemek için temel olarak kullanıldı.

Çalışma kapsamında, farklı optik tasarımlar gerçekleştirildi ve kamera ile eş zamanlı görüntüler alınarak analiz edildi. Çeşitli görüntü işleme algoritmaları ile çubukların kenarları bulundu ve yukarıda bahsedilen çap ölçme yöntemleri kullanılarak analiz yapıldı. Endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere çap ölçen sistem tasarımları geliştirildi.

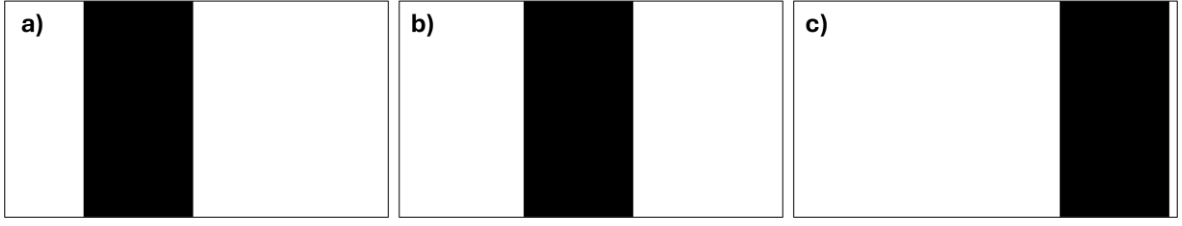
3.2. Görüntü İşleme ve Analizi

Kamerayı ve görüntü alımını kontrol etmek, alınan görüntülerin işlenmesi ve sonrasında çapın ölçülebilmesi için yazılım geliştirildi. Analiz için yüksek çözünürlükte görüntüler yakalayabilmek için 5 megaPixel (MP) çözünürlüğe sahip USB kamera kullanıldı. Optimal görüntü kalitesi ve alınan görüntülerde tutarlılığı sağlamak amacı ile kamera çözünürlük değeri 2592×1944 piksel, pozlama süresi ise 13 ms olacak şekilde ayarlandı. Yakalanan görüntülerin en iyi sonucu elde etmemizi sağlayan bölümüne odaklanmak için ilgi alanı (ROI) tanımlandı. Bununla birlikte, sistemin çerçevenin merkezinden belirlenen alana odaklanması sağlandı. Elde edilen görüntünün netliğini artırmak ve gürültüyü azaltmak için çeşitli görüntü işleme teknikleri uygulandı. Öncelikle 5×5 boyutunda ortalama alma filtresi ile gürültü azaltılarak görüntü daha düzgün hale getirildi. Çıkarılan verileri iyileştirmek için kübik interpolasyon uygulandı. Çap ölçümü yaparken piksellerin korunması, veri kaybı yaşamamak, detayları korumak bizim için en önemli noktalardan biri idi. Farklı tarama konumlarında numunelerin çaplarını belirlemek için, alt piksel çözünürlüğü ile çubukların kenarlarını tespit etmek için enterpolasyon tabanlı algoritmalar kullanılır [64]. Alt piksel çözünürlüğü, bir görüntüleme sisteminin veya detektörün tek bir pikselden daha küçük olan özellikleri çözme veya ayırt etme yeteneğini ifade eder [65], [66], [67]. Sistemin daha küçük özellikleri çözme yeteneğini geliştirerek, ölçüm doğruluğunu artırabilir ve aynı zamanda, merceğin piksel boyutu ve sayısal açıklığı tarafından belirlenen sistemin uzamsal çözünürlüğünün sınırlamalarının üstesinden gelmesine yardımcı olabilir [65]. Bunun için yapılan literatür araştırmaları sonucu Savitzky-Golay filtresi kullanılmasına karar verildi. Klasik filtreler detayları yumuşatırken

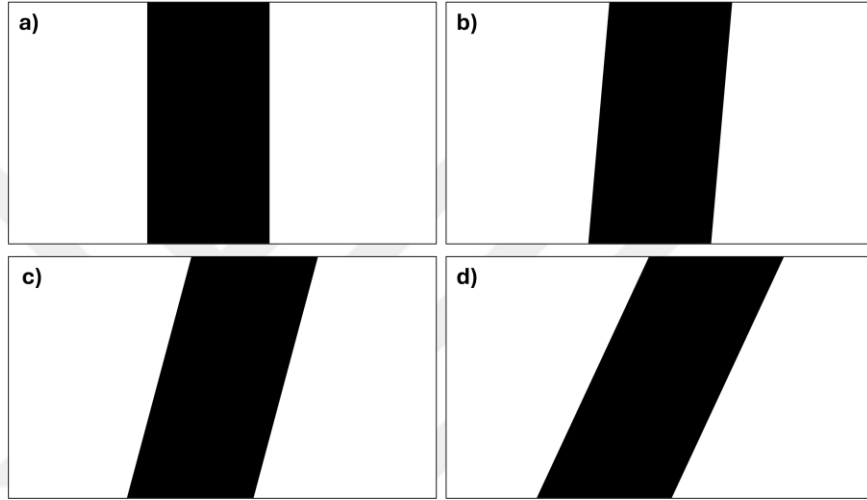
ve kenarları kaybederken, bu filtre, veri dizisi üzerindeki gürültüyü azaltan ve bu sırada verinin temel yapısını da koruyan dijital bir filtredir [68], [69]. Piksel altı görüntü işleme durumunda, Savitzky-Golay filtresi, dijital olarak yakınlaştırılan veya küçültülmüş görüntülerde yumuşatma ve parazit azaltma yapmak için kullanılabilir. Bunun nedeni, bir görüntü ölçeklendiğinde, piksellerin genellikle bir pikselin kesri kadar kaydırılmasıdır, bu da eşit olmayan örnekleme ve örtüşme bozukluklarına yol açar [70], [71]. Bitişik veri noktalarından oluşan bir pencereye bir polinom fonksiyonu yerleştirmeyi ve bu fonksiyonu pencerenin merkez noktasındaki düzleştirilmiş değeri tahmin etmek için kullanmayı içerir. Çalışmada filtre derecesi 21 ve polinom derecesi 3 olduğunda en verimli sonuç elde edilmiştir.

Filtrelenerek gürültüden arındırılan gri tonlamalı görüntüyü 0 ve 1'lerden oluşan bir yapıya dönüştürerek (ikili sistem, binary) kontur tespiti için net sınırlar oluşturuldu. Bunun için Otsu eşikleme yöntemi kullanıldı. Konturları belirlemek için Suzuki ve Abe'nin 1985 yılında geliştirmiş oldukları yönteme dayanan [72] OpenCV'de bulunan kontur bulma fonksiyonu kullanıldı. Algoritma, resimde en üst noktadan ya da en soldan başlayarak ilk beyaz pikseli bulur ve bunu başlangıç pikseli olarak belirler. Saat yönünde veya saat yönünün tersi yönde piksel komşulukları için tarama yapar. Konturun devam ettiği ilk komşu pikseli bulur, eğer o piksel de beyaz ise algoritma o piksel üzerinden işlemeye devam eder. Bu şekilde resim üzerindeki tüm konturlar bulunarak liste olarak döndürülür. Fonksiyon içerisinde tanımlanan bilgilere göre iç veya dış konturlar ayıklanabilir ve çubuğun kenarlarının tespiti sağlanır [73].

Doğru ölçüm ve kalibrasyonun sağlanabilmesi için, standart kalibrasyon nesnesi olarak 8 mm çapında bir referans çubuk kullanılmıştır. Çap ölçüm yöntemlerinin test edilebilmesi amacıyla, bu çubuğun dijital görüntüleri oluşturulmuş ve rastgele konumlarda resim penceresi üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.4). Bu analizle amaçlanan, çubuğun farklı konumlara yerleştirilmesi durumunda kullanılan yöntemlerin kararlılığını ve ölçüm tutarlılığını değerlendirmektir. Ayrıca, üretim hattındaki hareket ya da titreşim kaynaklı açısal sapmalar da göz önünde bulundurularak, çubuk görüntüleri merkez eksen etrafında 0° ile 25° aralığında döndürülmüştür. Farklı açılara sahip bu dijital görüntüler, sistemin açısal varyasyonlara karşı hassasiyetini test etmek için kullanılmıştır. Örnek görüntüler Şekil 3.5'te sunulmuştur.



Şekil 3.4. Farklı konumlara yerleştirilmiş 8 mm referans çubuğuna ait simüle edilmiş dijital görüntüler: a) Sol kenara yakın yerleştirilmiş çubuk görüntüsü, b) Görüş alanının merkezine yerleştirilmiş çubuk görüntüsü, c) Sağ kenara yakın yerleştirilmiş çubuk görüntüsü.



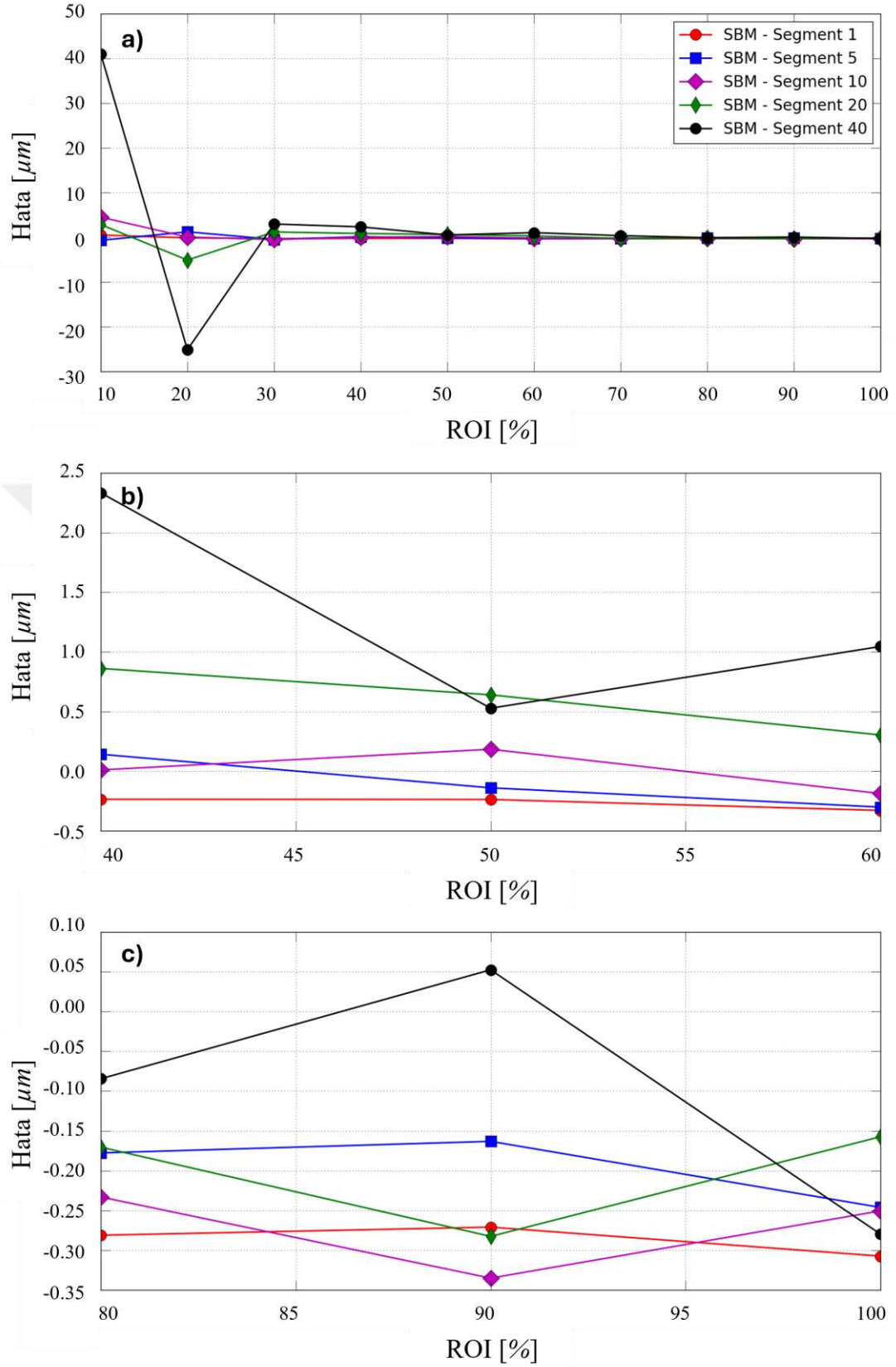
Şekil 3.5. Farklı açılarda döndürülen 8 mm referans çubuğuna ait simüle edilmiş dijital görüntüler: a) 0° döndürülmüş çubuk görüntüsü, b) 5° döndürülmüş çubuk görüntüsü, c) 15° döndürülmüş çubuk görüntüsü, d) 25° döndürülmüş çubuk görüntüsü.

Çap ölçümü için ortalama piksel konumu farkı yöntemi (Denklem 1), çap hesaplamasına en hızlı ve en basit yaklaşım olsa da, numunenin mükemmel şekilde hizalanmadığı durumlarda hatalara açıktır. Bu sebeple, daha önce yapılan araştırmalar sonucunda 2 alternatif ve kesin yöntem önerilmişti (Denklem 2, Denklem 3). Bunlar:

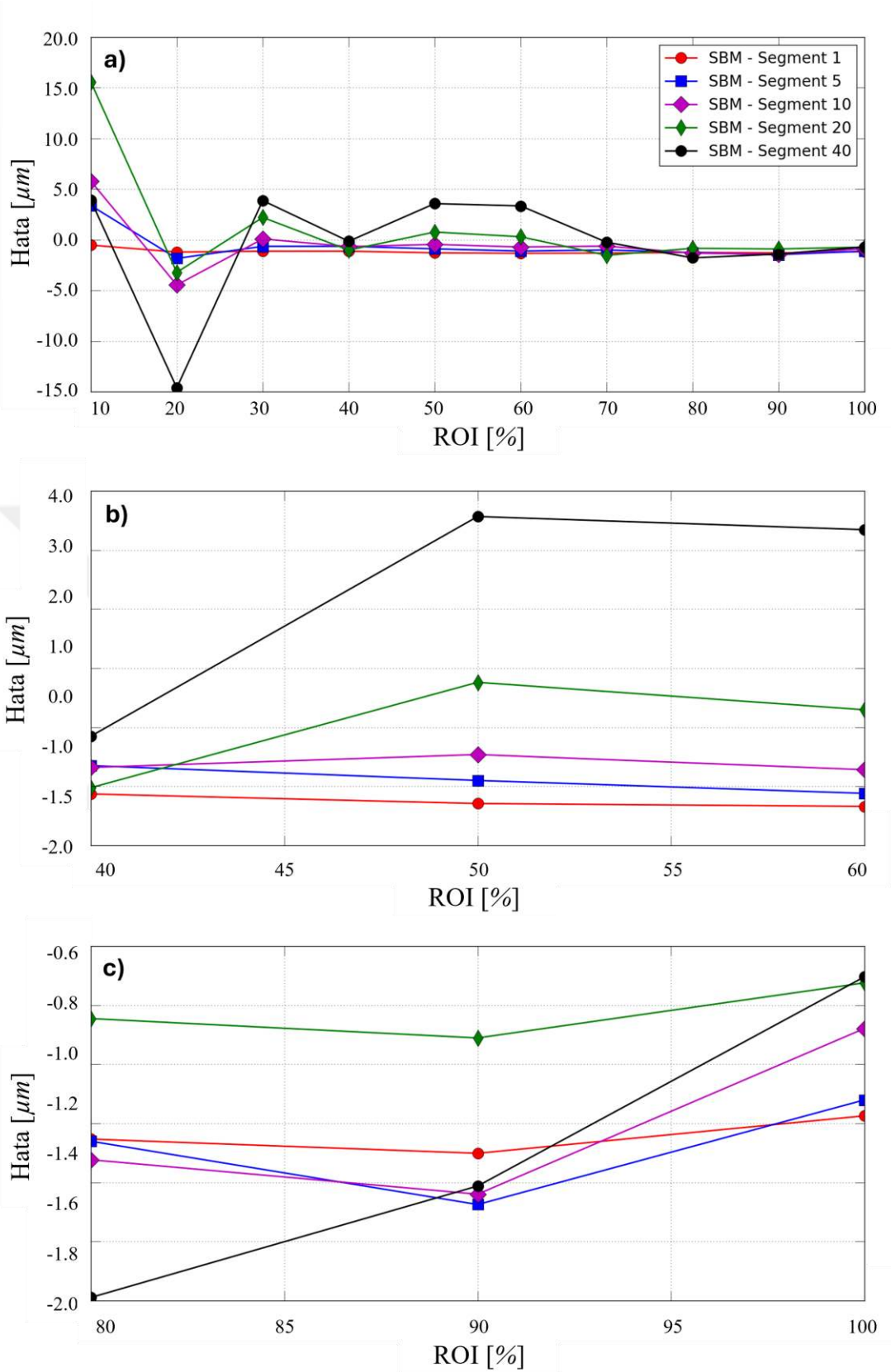
1. Öklid mesafesini kullanarak her iki taraftaki en yakın piksel çifti arasındaki mesafenin hesaplanması yoluyla çapı belirleyen mesafeye dayalı yaklaşım [61] – Denklem 2 – DBM (Mesafe Tabanlı Ölçüm)
2. Eğime dayalı yaklaşım [63] – Denklem 3 – SBM (Eğim Tabanlı Ölçüm)

Eğime dayalı yaklaşımda, çap ölçümü için kullanılan iki doğrunun birbirine tamamen paralel olması gerekir. Bu çalışmada, her bir kenar konturuna doğrusal regresyon uygulandı ve elde edilen doğruların eğimlerinin ortalaması alınarak paralel oldukları varsayıldı. Ancak

bu varsayımın sistem performansına etkisini değerlendirmek amacıyla, çubuğun 15° ve 25° döndürülmüş dijital görüntüleri kullanılarak ilave analizler yapıldı. Bu kapsamda, kenar konturları farklı segment sayıları ile parçalara ayrılmış, ardından çeşitli ROI değerlerinde SBM algoritması uygulandı. Ölçüm hataları Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de grafiksel olarak sunuldu. Bu grafikler, %10’ dan %100’e kadar artan ROI değerlerine karşılık farklı segment sayılarında elde edilen hata dağılımını gösterir. Analiz sonuçları, düşük ROI değerlerinde (özellikle %10–30 aralığında), görüntüdeki veri miktarının az olması nedeniyle segmentler arasında belirgin farklılıklar oluştuğunu ortaya koyar. Segment sayısı arttıkça, özellikle düşük ROI koşullarında, hatanın genel olarak yükseldiği ve ölçümün kararsız hale geldiği gözlemlendi. Öte yandan ROI arttıkça hata değerleri daha stabil hale gelmiş, ancak her segmentin eğiliminde farklılıklar korundu. Daha ayrıntılı değerlendirme için, Şekil 3.6(b–c) ve Şekil 3.7(b–c)’de, ROI = %50 ve ROI = %90 seviyelerine yakınlaştırılmış grafikler sunuldu. ROI = %50 bölgesinde (Şekil 3.6(b), Şekil 3.7(b)), Segment 1 ve Segment 5 hata açısından oldukça düşük ve stabil değerler üretirken, Segment 40’ta daha belirgin dalgalanmalar ve eğilim değişimleri tespit edildi. ROI = %90 bölgesine bakıldığında ise (Şekil 3.6(c), Şekil 3.7(c)) tüm segmentlerde hata seviyeleri genel olarak düşmüş, Segment 1 ve 5 yine daha güvenilir ve kararlı sonuçlar verdi. Segment 40 için hata değeri azalmakla birlikte, hâlâ agresif dalgalanmalar gözlemlendi.

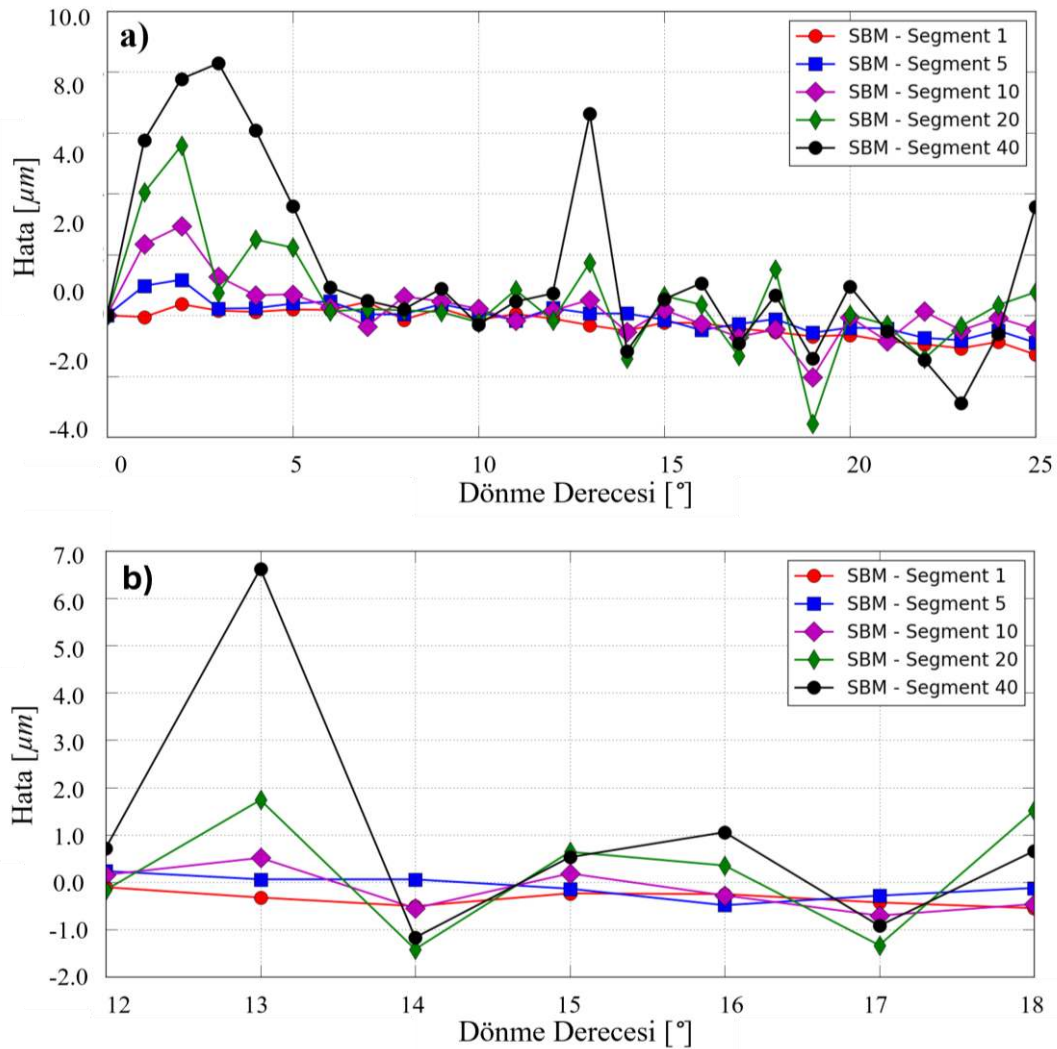


Şekil 3.6. SBM yönteminin 15° döndürülmüş çubuk görüntüsünde farklı segmentler için oluşturduğu hata dağılımı: a) Segment 1, 5, 10, 20 ve 40 için ROI [%] aralığında genel hata dağılımı, b) ROI = 40–60 aralığına ait detaylı segment analizi, c) ROI = 80–100 aralığına ait detaylı segment analizi.

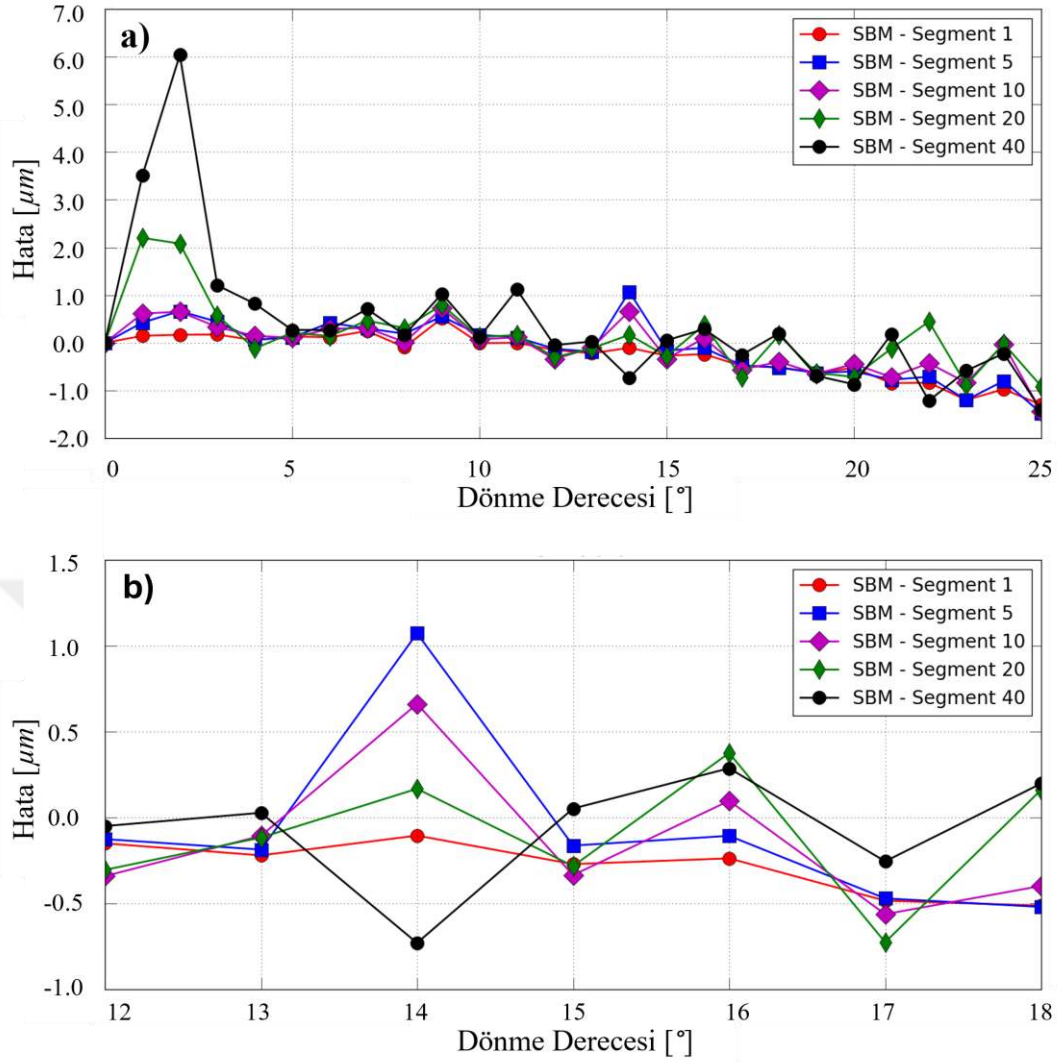


Şekil 3.7. SBM yönteminin 25° döndürülmüş çubuk görüntüsünde farklı segmentler için oluşturduğu hata dağılımı: a) Segment 1, 5, 10, 20 ve 40 için ROI [%] aralığında genel hata dağılımı, b) ROI = 40–60 aralığına ait detaylı segment analizi, c) ROI = 80–100 aralığına ait detaylı segment analizi.

ROI değeri sabit tutulduğunda, döndürülme açısının 15° 'ten 25° 'ye çıkarılmasıyla çap ölçüm hatalarında belirgin bir artış gözlemlendi. Bu durumu değerlendirmek için Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da, sırasıyla ROI = %50 ve ROI = %90 değerlerinde, SBM yönteminin farklı açısal değişimlere karşı gösterdiği performans analiz edildi. ROI %50 iken Segment 1 ve Segment 5 genel olarak daha kararlı ve düşük hatalı sonuçlar üretti. ROI %90 seviyesine çıkarıldığında ise Segment 1 kararlılığını sürdürmüş, ancak Segment 5'te 14° dönme açısında yaklaşık $1\ \mu\text{m}$ 'lik ani bir hata artışı gözlemlendi. Buna rağmen, genel hata seviyesi ve stabilitesi değerlendirildiğinde Segment 5'in daha tutarlı sonuçlar verdiği görüldü. Tüm bu bulgular doğrultusunda, SBM yönteminde çap ölçümünün güvenilirliği ve kararlılığı açısından Segment 5'in tercih edilmesine karar verildi.

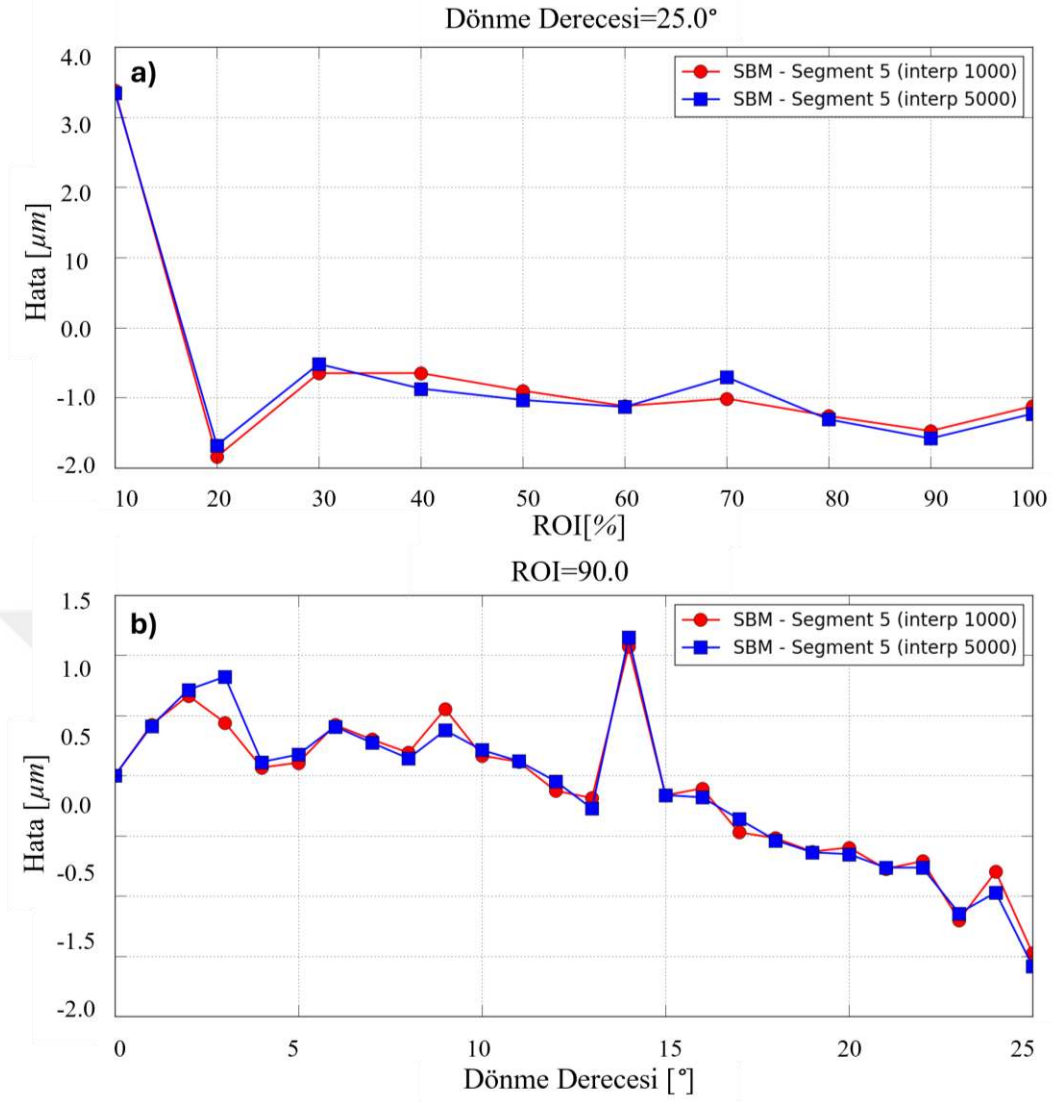


Şekil 3.8. ROI %50 sabit iken SBM yönteminin segment 1, 5, 10, 20 ve 40 için açıya bağlı çap ölçüm hataları: a) 0° – 25° arası genel eğilim, b) 12° – 18° aralığına ait detaylı hata incelemesi.



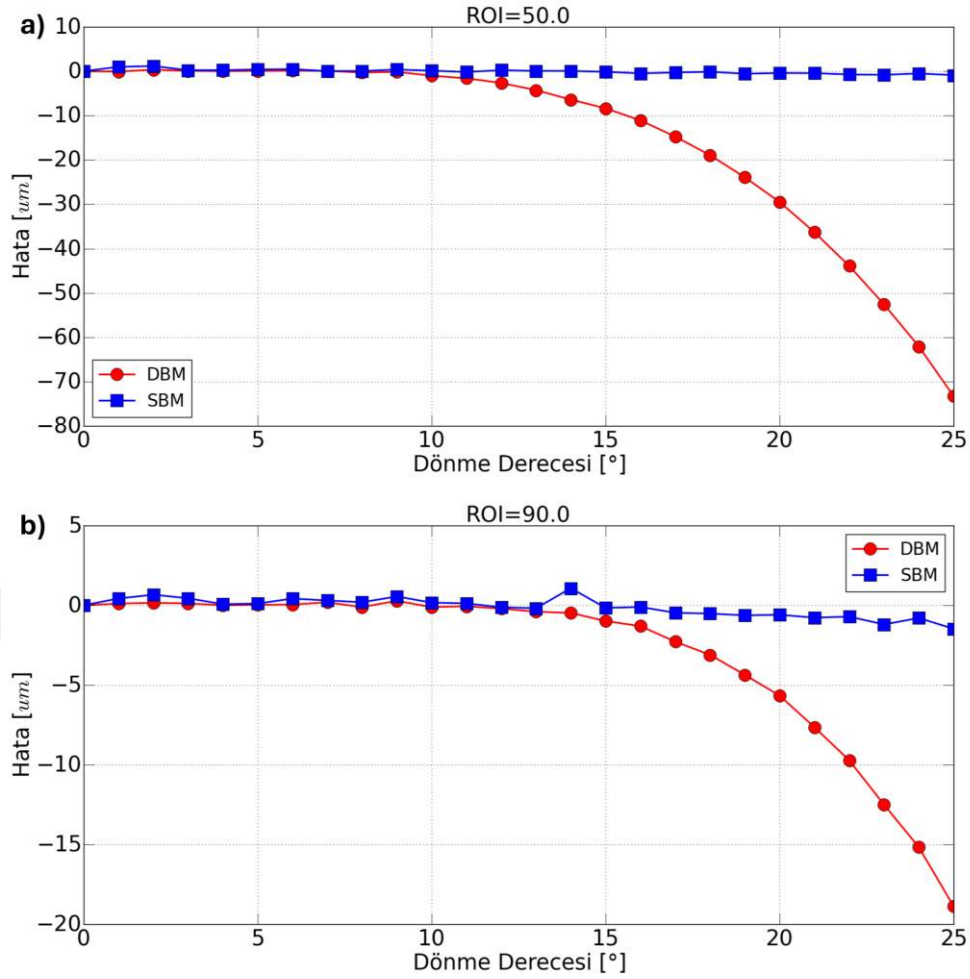
Şekil 3.9. ROI %90 sabit iken SBM yönteminin segment 1, 5, 10, 20 ve 40 için açıya bağlı çap ölçüm hataları: a) 0°–25° arası genel eğilim, b) 12°–18° aralığına ait detaylı hata incelemesi.

Kontur tespiti sonrası, her bir kenar için interpolasyon uygulanarak veri noktası sayısı standart olarak 1000 olacak şekilde yeniden örneklendi. İnterpolasyon yoğunluğunun ölçüm doğruluğu üzerindeki etkisini değerlendirmek için, Segment 5 için interpolasyon noktası 5000'e çıkarılarak karşılaştırmalı analiz gerçekleştirildi (Şekil 3.10). Şekil 3.10(a)'da, dönme derecesi sabit tutuldu (25°) ve farklı ROI değerlerinde interpolasyon yoğunluğunun etkisi incelendi. Şekil 3.10(b)'de ise ROI sabitlendi (%90) ve 0°–25° arası dönme derecelerine karşılık elde edilen ölçüm hataları karşılaştırıldı. Her iki grafikte de interpolasyon noktası arttığında sonuçlarda küçük değişiklikler olduğu gözlemlendi. Analizler sonucunda interpolasyon değerinin 5000'e çıkarılmasının hata değerlerini yalnızca sınırlı ölçüde etkilediği belirlendi, bu nedenle işlem süresi ve sistem verimliliği göz önünde bulundurularak interpolasyon değeri 1000 olarak sabitlendi.



Şekil 3.10. SBM yöntemiyle Segment 5 için interpolasyon değerinin hata üzerindeki etkisi: a) Dönme derecesi 25° iken farklı ROI değerleri, b) ROI = %90 iken 0°–25° arası farklı dönme derecelerine karşılık hata dağılımı

Şekil 3.11’de, SBM ve DBM yöntemlerinin farklı ROI değerlerinde ve dönme açılarına karşı gösterdikleri performans karşılaştırıldı. ROI %50 (Şekil 3.11.a) ve ROI %90 (Şekil 3.11.b) koşullarında yapılan analizlerde, özellikle 10°’den sonra DBM yönteminin hata seviyesinin hızla arttığı ve açısal değişimlere daha duyarlı olduğu gözlemlendi. SBM yöntemi ise, dönme açısı arttıkça daha kararlı bir davranış sergilemiş ve ölçüm hatası düşük seviyelerde kaldı. Ayrıca Şekil 3.11.a’daki analiz, SBM yönteminin ROI değerinden yani kullanılan kenar piksel sayısından, DBM’ye kıyasla daha az etkilendiğini ortaya koydu. Bu da, SBM metodunun hem açısal hem bölgesel değişimlere karşı daha kararlı ve güvenilir bir çap ölçüm yaklaşımı sunduğunu gösterir.



Şekil 3.11. SBM ve DBM yöntemlerinin dönme açısı ve ROI değerine karşı çap ölçüm hatalarının karşılaştırılması: a) ROI = %50, b) ROI = %90

Sistemin performansını çeşitli koşullar altında doğrulamak için kapsamlı testler gerçekleştirildi. Sistemi kalibre etmek ve doğruluğu doğrulamak için bilinen boyutlara sahip nesneler kullanılarak test yapıldı.

3.3. Optik Sistemler ve Tasarımları

Çalışma kapsamında 3B parçaların yüzey profilinin çıkartılmasına ve analiz edilmesine imkân sunan bir sistem tasarlanması hedeflenmektedir. İlk aşamada örneği 360° görebilecek bir görüntüleme sistemi üzerine yoğunlaşıldı. Hem çap ölçmek, hem de varsa yüzey üzerindeki bozuklukları tespit etmek isteniyordu.

Donanım ve yazılımı işlevsel bir ölçüm sistemi oluşturmak için entegre etmek, doğru veri toplama ve işletimini sağlamak için bir dizi önemli adımı içerir. Bu strateji, optik bileşenlerin, mekanik yapıların, elektronik sistemlerin ve yazılım araçlarının hassas

senkronizasyonunu gerektirir. Işık kaynağı, tüm nesneyi aydınlatacak, yüksek kontrastlı görüntülemeyi destekleyecek ve kameranın pozlama ayarlarını hassas bir şekilde belirlemesine izin verecek kadar güçlü olmalıdır. Telesentrik sistemlerde, yansıma, gölgelenme ve parlama gibi görüntü bozulmalarını en aza indirmek amacıyla kolime edilmiş veya dağınık ışık kaynakları tercih edilir. Görüntü işleme birimi, kamera aracılığıyla alınan görüntüleri USB bağlantısı üzerinden bilgisayara aktarılması ile analize başlanır. Bu sistemin gerçek zamanlı ölçüm yeteneğini değerlendirmek amacıyla tasarım sürecinin başında bir ön gözlem gerçekleştirilmiştir. Dönen bir cismin üzerine yerleştirilen işaretli noktaların, hareket halindeyken kamera tarafından tespit edilip edilemeyeceği test edilmiştir. Aynı zamanda cismin dönüş frekansı bir stroboskop (Fluke 820) yardımıyla ölçülerek lineer hız hesaplamaları yapılmıştır. Elde edilen görüntüler ve hesaplamalar karşılaştırıldığında, yaklaşık 9 m/s lineer hıza sahip bir cismin, kamera ile 13 ms pozlama süresi kullanıldığında işaretli noktalarının büyük ölçüde algılanabildiği, ancak son iki noktada belirgin hareket bulanıklığı (motion blur) olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, sistemin belli bir hız sınırına kadar güvenilir ölçüm yapabileceğini ve tasarım sürecinde pozlama süresi, ışık şiddeti ve çözünürlük gibi parametrelerin dikkatle belirlenmesi gerektiğini göstermiştir.

3.3.1. 360° Görüntüleme sistemi

Endüstriyel üretimden (örneğin metal şaftlar, borular, bağlantı elemanları) tıbbi cihaz imalatına (kateter tüpleri, cerrahi çubuklar) kadar birçok bağlam, silindirik nesnelerin tüm 360° çevresi boyunca dış çapının ölçülmesini gerektirir. Araştırmacılar, son yirmi yıldır çapları hassas bir şekilde ölçen ve 360° görünümünü yakalayan birkaç temassız optik cihaz ürettir. Bazıları akıllı ayna tasarımları veya benzersiz lensler kullansa da, diğerleri çeşitli açılarda birkaç kamera veya lazer kullanır; bu sistemler optik düzende farklılık gösterir ancak hepsi tutarlı çap ölçümleri için tam çevre kapsamı elde etmeyi amaçlar.

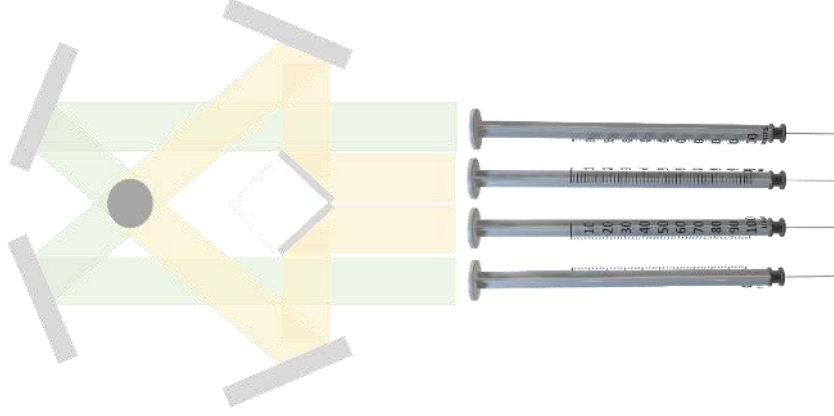
Sık kullanılan bir yaklaşım gölge görüntülemeyi kullanır: Öge arkadan aydınlatılır, böylece kameralar veya fotodiyotlar silüet genişliğini (gölge boyutunu) birçok açıdan ölçer. Ögenin etrafına yerleştirilen birçok lazer mikrometre veya kamera, endüstrideki geleneksel optik çap ölçerler olan, aynı anda birkaç perspektiften şeklini yakalar. Örneğin, Fedorov ve Koba [74], çap ölçümü için üç eksenli bir lazer sistemi geliştirdi. Bu sistemde, 120 derecelik aralıklarla yerleştirilmiş üç lazer ışık kaynağı ve alıcılar bulundu. Üç farklı yönden yapılan ölçümler, kesitin eliptik olup olmadığını belirlemek için yeterli oldu. Bu sayede sistem, nesnenin yönü değişse bile çapı ve şekil bozulmalarını doğru şekilde hesaplayabildi. Kullanılan lazer ışınları mercek ya da ayna içermedi; bu da sistemi daha basit ve dayanıklı

hâle getirdi. Kalibrasyon ve istatistiksel analiz yöntemleri ile sistem, uygun koşullarda mikrometre altı hassasiyetle ölçüm yapabildi. Bu tip lazerli gölge sistemleri, özellikle üretim hatlarında tel, kablo, boru gibi uzun ve silindirik nesnelerin çapını anlık olarak izlemek amacıyla kullanıldı. Fedorov ve Koba'ya göre, üç eksenli sistemler iki eksenli sistemlerin yakalayamadığı şekil bozulmalarını da tespit etti. Örneğin, iki eksenli bir sistem, nesne 45° açıyla döndüğünde ovalliği fark edemedi. Günümüzde birçok ticari sistem, hareketli nesnelerin çevresine yerleştirilen iki, üç veya dört lazer başlığı kullandı. Daha gelişmiş sistemlerde, dört lazer mikrometreye ek olarak bir eksen boyunca ölçüm yapan sensör de yer aldı. Bu sayede çap, yuvarlaklık ve merkezden sapma gibi özellikler hızlı ve doğru şekilde ölçülebildi. Bu sistemlerde genellikle LED veya lazer kaynaklarıyla oluşturulan arka aydınlatmalar tercih edildi. Nesne tam merkezde olmasa bile, telesentrik aydınlatma sayesinde oluşan gölge görüntüsü gerçek çapla uyumlu oldu. Gölgedeki karşılıklı kenarlar arasındaki mesafe doğrudan çapı verdi. Bu sistemler genellikle mikrometre düzeyinde doğruluk elde eder ve nesne yer değiştirmelerinden veya sensör hizalamasından kalan herhangi bir geometrik hatayı düzeltmek için uygun kalibrasyonla gerçek zamanlı (kHz düzeyinde örnekleme) çalışır [3]. Üretim hatlarındaki metal çubuklarda ve şaftlarda, plastik ekstrüde ürünlerde (ör. tıbbi kateter boruları) ve bağlantı elemanı cıvataları gibi silindirik bileşenlerde yaygın olarak kullanılır; dış çapın sürekli, temassız ölçülmesini gerektiren her durum. İnce tıbbi cihazların (kateter şaftları, kılavuz teller, vb.) çaplarını ölçen iki zıt telesentrik kamera tıbbi sektördeki çift eksenli gölge sisteminin belirli bir örneğidir. Büyük şaft çaplarını tam olarak ölçmek için Chen vd. [18], araç krank millerinde gösterilen çift kameralı bir telesentrik görüş sistemi oluşturdu. Telesentrik bir lens ve arka ışıkla donatılan her kamera, bileşenin bir tarafını yakalar; Gerçek çap, iki yarım genişliğin birleşik bir kalibrasyon çerçevesinde birleştirilmesiyle elde edilir. Dikkatli kalibrasyon ve perspektif hatasını ortadan kaldıran telesentrik optikler, bu cihazın yaklaşık 1 µm ortalama çap yanlışlıklarına ulaşmasına yardımcı oldu; bu da esasen bir koordinat ölçüm makinesine (CMM) benzerdir. Bir krank mili yatağında, optik teknik yaklaşık 0,5 m içinde bir CMM ile eşleşti ve 100,000 mm referans mesafesini 100,001 mm ($\pm 39 \times 10^{-5}$ mm std. sapma 10 deneme boyunca) olarak ölçtüklerini iddia ettiler. Bu, çok yüksek doğruluğun çoklu görünüm telesentrik gölge görüntüleme kullanılarak elde edilebileceğini gösterir. Bunun karşılığı karmaşıklık ve maliyettir (birçok kamera ve tam hizalama), ancak motor bileşenleri veya cerrahi implantlar gibi yüksek değerli parçalar için, böyle bir optik sistem CMM düzeyinde hassasiyetle hızlı, hat içi ölçüm sağlar. Alt milimetre tellerden büyük şaftlara (birkaç cm) kadar olağan ölçüm aralıkları ve yapılandırmaya bağlı olarak birkaç

mikrometreden alt mikrometreye kadar doğruluklarla, çevrenin etrafında iki veya daha fazla sensör kullanan çok açılı gölge projeksiyon sistemleri, gerçek zamanlı 360° çap izleme için kanıtlanmış bir çözümdür. Tıbbi örnekler arasında kateter boruları ve iğneler için optik göstergeler (genellikle tüm çevrenin tolerans dahilinde olduğundan emin olmak için aynı çok eksenli kavramları kullanır) bulunurken, endüstriyel örnekler arasında otomatik şaft ölçüm hücreleri ve tel/kablo ekstrüzyonu için çevrimiçi lazer göstergeler bulunur.

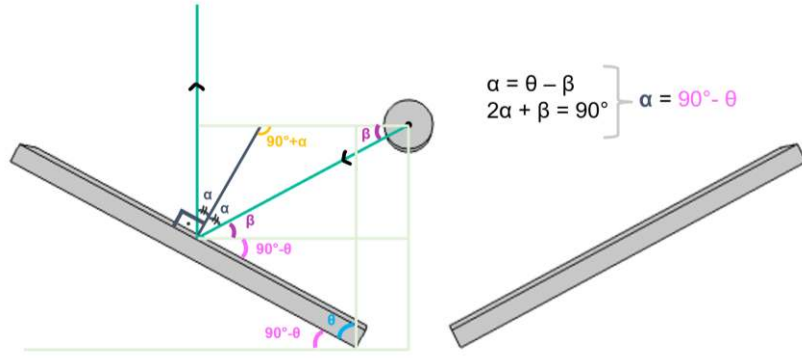
Altı aynalı telesentrik optik sistem, özellikle çap ölçümleri gibi yüksek doğruluk gerektiren uygulamalar için silindirik nesnelerin hassas 360° ölçümü için tasarlanmış yenilikçi bir çözümdür. Bu yapılandırma, fiziksel dönüş olmadan bir nesnenin tüm dış profilini yakalamak için telesentrik lensleri stratejik olarak konumlandırılmış aynalarla entegre eder. Optik eksen etrafında simetrik olarak düzenlenmiş altı ayna kullanarak sistem, nesnenin çevresinin kapsamlı ve bozulma içermeyen görüntülenmesini sağlar. Bu kurulumdaki aynalar, optik yolun telesentrikliğini korurken ışık ışınlarını telesentrik lense yönlendirmede kritik bir rol oynar. Her ayna nesnenin yüzeyinin bir bölümünü yakalar ve ortaya çıkan görüntüler tam bir 360° görünüm üretmek için sorunsuz bir şekilde birleştirilir. Bu, nesnenin mekanik olarak döndürülmesine olan ihtiyacı ortadan kaldırarak ölçüm süresini önemli ölçüde azaltır ve titreşim veya hizalama hatasından kaynaklanan hataları en aza indirir. Telesentrik lens, görüş alanı boyunca düzgün büyütme sağlayarak çap, yuvarlaklık ve diğer kritik boyutların hassas ölçümlerini mümkün kılar.

Sistemin tasarımı, özellikle karmaşık geometrilere veya yansıtıcı yüzeylere sahip nesnelerin incelenmesinde önemli avantajlar sağlar. Kontrollü aydınlatma ve telesentrik optik yol sayesinde parlama, gölgelenme ve benzeri görüntü bozuklukları minimize edilir, böylece güvenilir veri elde edilir. Ayrıca yüksek hızlı kameralarla entegre edilerek endüstriyel ortamlarda gerçek zamanlı analiz yapabilme imkânı sunar. Bu özellikleriyle sistem, kalite kontrolü ve metrolojik uygulamalarda hassas, hızlı ve temassız ölçüm yapabilen etkili bir yöntemdir. Bu kapsamda, Şekil 3.12'de, silindirik parçaların çap ölçümleri için önerilen bi-telesentrik optik sistemin şematik yapısı sunulmuştur. Bu tasarımda nesnenin çevresinin tamamını tek bir görüntüde elde etmek için altı adet ayna kullanılır. Aynaların özel açıları ve konumlandırmaları sayesinde, nesneden yansıyan ışınlar eşit optik yol uzunluklarını takip ederek dedektöre ulaşır. Böylece nesnenin görüntüsü eşit büyütme oranı ile, perspektif bozulmalardan arındırılmış olarak dedektöre aktarılır. Bu yapılandırma, fiziksel hareket gerekliliğini ortadan kaldırarak hızlı ve yüksek doğruluklu çap ölçümlerine olanak sağlar.



Şekil 3.12. 360° görüntüleme için altı aynalı bi-telesentrik optik sistem tasarımının şematik gösterimi.

Çalışmanın ilk aşamasında amaç, endüstriyel kalite kontrolünde kullanılmak üzere, bir kamera aracılığıyla nesnenin tüm yüzeylerinin görüntülenip analiz edilebildiği bir sistem tasarlamaktır. Bu doğrultuda öncelikle iki ayna ve bir kameradan oluşan temel bir optik sistem geliştirildi. Aynaların açısı ile nesnenin bulunması gereken konum arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla matematiksel modelleme ve analitik hesaplamalar yapıldı (Şekil 3.13). Ardından, teorik modeli doğrulamak için aynalar ve nesne, hesaplanan açısal ilişkiye uygun olarak konumlandırılarak çeşitli mesafelerden görüntüler elde edildi (Şekil 3.14).



Şekil 3.13. Düzlemsel bir aynaya dik doğrultuda gelen ışığın, aynanın eğimine bağlı olarak yansıma yönünün değişimini gösteren geometrik model. Ayna eğim açısı (θ), gelen ışık ile yüzey normali arasındaki açı (α) ve yansıma açısı (β) ile ilişkinin gösterimi.



Şekil 3.14. İki aynalı optik sistem kullanılarak kameradan elde edilen örnek görüntü

Kamera görüş alanı ve cisim-kamera arası mesafeyi değerlendirmek, sistem parametrelerinin cismin mesafesindeki değişmelere nasıl yanıt verdiğini görmek için, kamera ile obje arasındaki uzaklık Tablo 3.1’de belirtilen 4 farklı uzaklık değerine ayarlandı. Her biri için lensin odak ayarı yapıldı. Değişen odak uzaklıkları için nesne ve nesnenin aynada oluşan yansıması görüntü dosyası olarak kaydedildi. Elde edilen görüntü üzerinde 60 mm’lik cismin görüntü üzerinde kaç piksele karşılık geldiği tablodaki piksel sayısı sütununda belirtildi. Bilinen piksel adımı değeri ve piksel sayısı kullanılarak piksel uzunluğu hesaplandı. Hesaplanan bu değer ile halihazırda bildiğimiz objenin kameraya uzaklığı ve uzunluk bilgisi kullanılarak kameranın farklı uzaklık değerlerindeki odak uzaklığı değeri hesaplandı. Sonuçlar, nesne-kamera mesafesi arttıkça net görüntü elde edilen odak uzaklığının da arttığını gösterdi. Nesnenin hareketi veya yanlış konumlandırılması durumunda oluşabilecek piksel farklılıklarının ölçüm doğruluğuna etkisi önemlidir ve bu farklılıkların minimum seviyede kalması tercih edilir. Bu bağlamda, farklı uzaklıklarda odaklanan kamera için hareketli ya da hatalı konumlandırılmış cisimlerin görüntülerinde meydana gelebilecek piksel sapmaları hesaplanarak Tablo 3.2’de sunuldu. Elde edilen sonuçlar, odak uzaklığı arttıkça obje-kamera mesafelerindeki hesaplanan uzunluk sapmalarının azaldığını ve dolayısıyla daha yüksek odak uzaklıklarının daha doğru ölçüm sonuçları verdiğini ortaya koydu.

Tablo 3.1. Kameranın farklı uzaklıklardaki odak mesafesinin hesaplanması

Objenin Kameraya Uzaklığı (d) (mm)	Objenin Uzunluğu (l) (mm)	Piksel Sayısı	Piksel Adımı (mm)	Piksel Uzunluğu (mm)	Odak Uzaklığı(f) (mm)
450	60	490	0,0028	1,37	10,29
600	60	385	0,0028	1,08	10,78
720	60	332	0,0028	0,93	11,16
870	60	278	0,0028	0,78	11,29

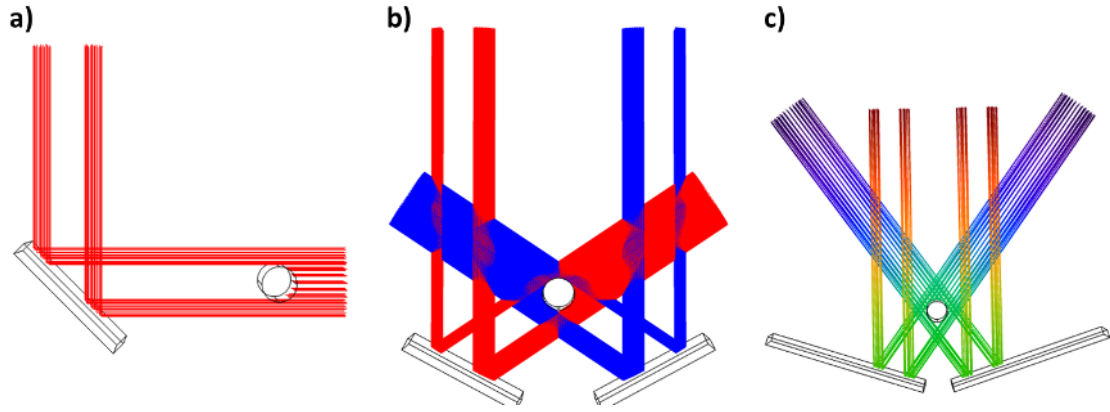
Tablo 3.2. Belirtilen uzaklık değerleri için, hareket eden ya da yanlış konumlandırılan cisimden elde edilen görüntülerdeki piksel farklılıklarının hesaplanması

Odak Uzaklığı (f) (mm)	Objenin Kameraya Uzaklığı (d) (mm)	Objenin Uzunluğu (l) (mm)	Piksel Büyüklüğü (mm)	Piksel adımı (mm)	Piksel Sayısı	Konvolüsyon Faktörü	Hesaplanan Obje Uzunluğu	Hesaplanan Uzunluk ile Gerçek Uzunluk Arasındaki Fark (mm)
10,29	440	60	1,40	0,0028	501,14		61,36	1,36
10,29	430	60	1,44	0,0028	512,79		62,79	2,79
10,29	460	60	1,34	0,0028	479,35		58,70	-1,30
10,78	600	60	1,08	0,0028	385,00	0,16	60,00	
10,78	590	60	1,10	0,0028	391,53		61,02	1,02
10,78	580	60	1,12	0,0028	398,28		62,07	2,07
10,78	610	60	1,06	0,0028	378,69		59,02	-0,98
11,16	720	60	0,93	0,0028	332,00	0,18	60,00	
11,16	710	60	0,94	0,0028	336,68		60,85	0,85
11,16	700	60	0,96	0,0028	341,49		61,71	1,71
11,16	730	60	0,92	0,0028	327,45		59,18	-0,82
11,29	870	60	0,78	0,0028	278,00	0,22	60,00	
11,29	860	60	0,79	0,0028	281,23		60,70	0,70
11,29	850	60	0,80	0,0028	284,54		61,41	1,41
11,29	880	60	0,77	0,0028	274,84		59,32	-0,68

Teorik modelleme ve deneysel analizlerin ardından, matematiksel modele uygun bir kurulum oluşturmak için COMSOL simülasyon programı kullanıldı. Bu simülasyon, optik sistemin davranışını hesaplanan koşullar altında tekrarlamayı ve tasarımın doğrulanarak optimize edilmesini amaçlıyordu. COMSOL'un Ray Tracing modülü ile ayna açıları, nesne konumlandırması ve kamera ayarları sistem parametreleri teorik tahminleri yansıtacak şekilde belirlendi. Bu yaklaşım, tasarımın ince ayarlarla daha doğru ve verimli hâle gelmesini sağladı. Ayna açısı ile cisme gönderilen ışın arasındaki matematiksel bağıntıya göre (Şekil 3.13), ayna, cisim ve ışık kaynağı yerleşimi gerçekleştirildi; yansıyan ışının dedektöre 90° açıyla ulaşması için ayna ve ışık kaynağı konumları ayarlandı. Şekil 3.15, yüzeyle sırasıyla 45° , 28° ve 18° açı yapacak şekilde konfigüre edilen ayna-ışık kaynağı düzenlerini gösterir.

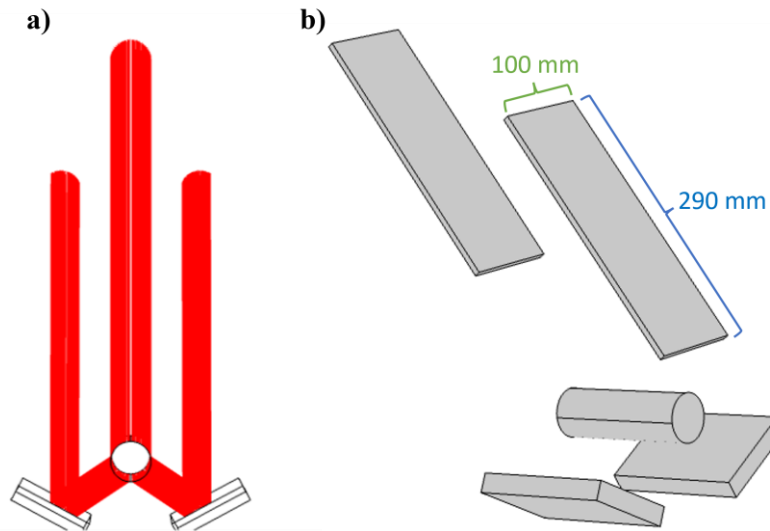
Teorik modelleme ve deneysel analizin ardından, matematiksel modelle uyumlu hale getirmek için COMSOL simülasyon programında bir kurulum oluşturuldu. Bu simülasyon, optik sistemin davranışını hesaplanan koşullar altında tekrarlamayı ve tasarımın daha fazla doğrulanmasını ve optimize edilmesini sağlamayı amaçlıyordu. COMSOL'da yer alan "Ray Tracing" modülünden yararlanılarak, ayna açıları, nesne konumlandırma ve kamera ayarları gibi sistem parametreleri teorik tahminleri yansıtacak şekilde dikkatli bir şekilde yapıldı. Bu yaklaşım, daha doğru ve verimli sistem tasarımı için ince ayarların yapılabilmesini mümkün kıldı. Ayna açısı ile cisme gönderilen ışın arasında ki matematiksel bağıntıya uygun olacak şekilde (Şekil 3.13) ayna, cisim ve ışık kaynağı yerleşimi yapıldı. Aynadan yansıyarak dedektöre ulaşacak ışın 90° olacak şekilde ayna açısı ve ışık kaynağı konumlandırılması yapıldı. Şekil 3.15'te yüzey ile 45° , 28° ve 18° açı yapacak ile yerleştirilen ayna ve ışık kaynağından oluşan konfigürasyonlar yer almaktadır.

Şekil 3.15, bi-telesentrik optik sistemin ayna ve ışık kaynağı düzenlemelerinin açısal varyasyonlarını net biçimde gösterir. a) 45° , b) 28° ve c) 18° açılarıyla konfigüre edilen düzenler, her bir aynanın nesneden yansıyan ışını nasıl yönlendirdiğini ortaya koyar. Bu açı farklılıkları, dedektöre ulaşan ışının optik yol uzunluğunu eşitleyerek görüntüdeki büyütme tutarlılığını korumayı amaçlar. Şekildeki üç varyasyon, sistemin farklı yüzey eğimlerinde bile merkezi silüetin hassasiyetle yakalanabilmesini sağlar. Özellikle daha dik (45°) ve daha yatay (18°) açılar arasındaki karşılaştırma, her konfigürasyonda odak derinliği ve ışık homojenliğinin nasıl etkilendiğini görsel olarak ortaya koyar. Bu sayede hem tasarımın esnekliği hem de sistemin titreşim veya hizalama sapmalarına karşı dayanıklılığı değerlendirilebilir.

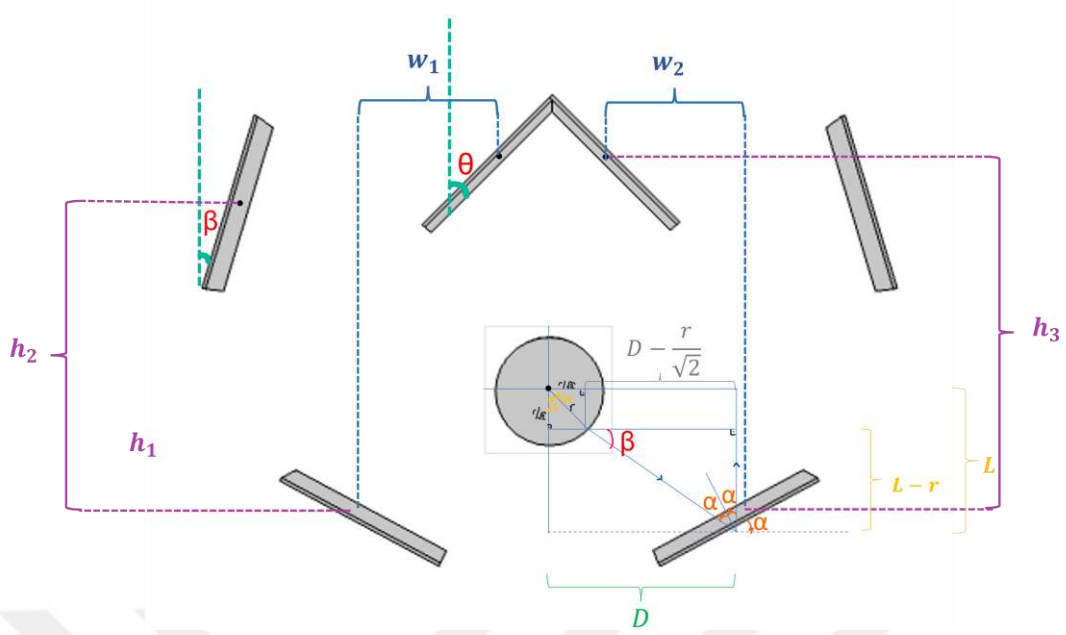


Şekil 3.15. Farklı ayna açılarında gerçekleştirilen ayna-ışık kaynağı konfigürasyonları: a) 45°, b) 28°, c) 18°

Çap ölçümü amacıyla geliştirilen iki aynalı sistemin tasarımında, optik yol uzunluklarını eşitlemek için nesnenin yüzeyinden yansıyan ışının kamera algılayıcısına ulaşana kadar kat ettiği yolların homojen olması gerektiği değerlendirildi. Bu kapsamda ilk olarak COMSOL simülasyon programı kullanılarak iki aynalı düzenin optik yerleşimi modellenmiş ve sonuçlar Şekil 3.16'da sunuldu. Simülasyon, kameraya ulaşan ışının farklı optik yollar izlediğini ortaya koydu. Optik yol eşitlemesini sağlamak amacıyla, nesne ile kamera arasına iki ayna konumlandırıldı ve ışınların eşit mesafe katederek dedektöre ulaşması sağlandı (Şekil 3.16(b)). Ancak aynaların boyut kısıtlamaları ve ışık huzmesinin düşmesi, sistemin verimini sınırladı. Bu nedenle, bi-telesentrik lens mantığıyla çalışan alternatif bir düzen geliştirmek üzere, ayna açıları, konumları ve nesnenin çapı arasındaki matematiksel ilişki analitik olarak belirlendi (Şekil 3.17).

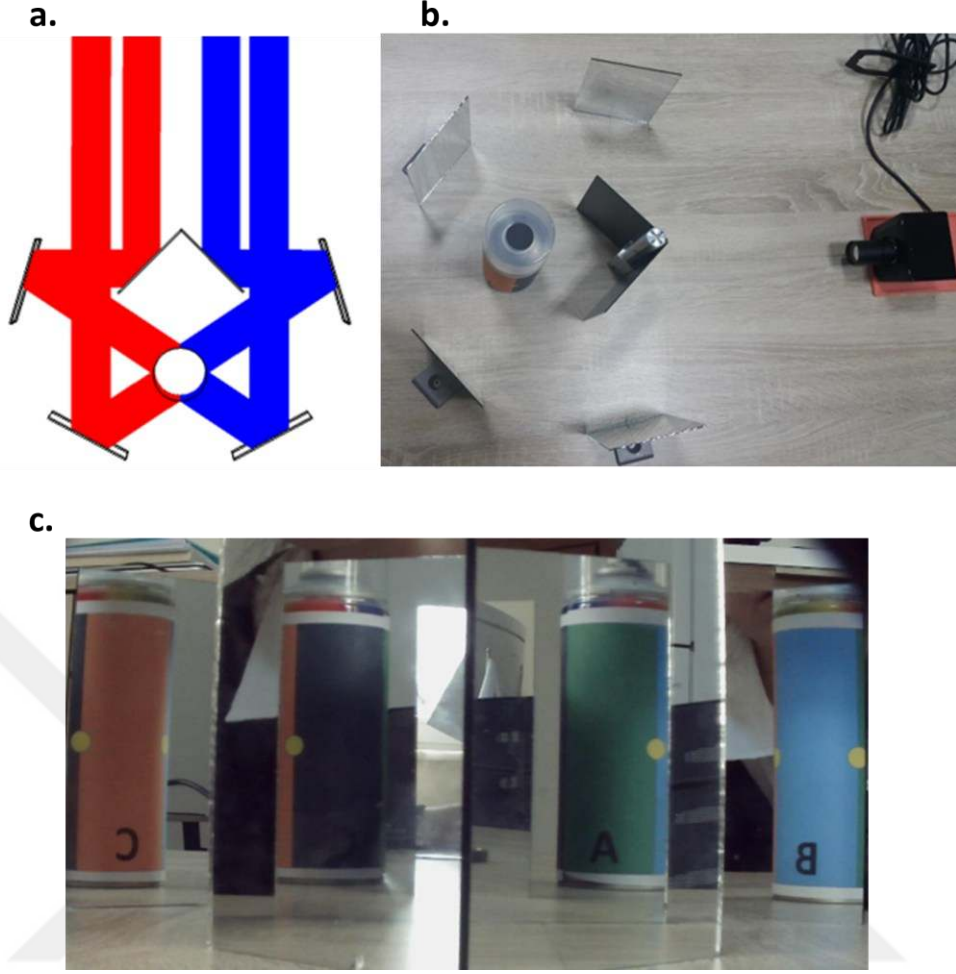


Şekil 3.16. İki aynalı optik sistemin COMSOL simülasyonu ve eşit optik yol uzunluğu hedefiyle yapılan tasarım modeli: a) COMSOL simülasyonu ile oluşturulan iki aynalı sistemin 3D yüzey analiz modeli, b) Eşit optik yol uzunlukları sağlamak üzere geliştirilen iki aynalı sistemin şematik tasarımı.



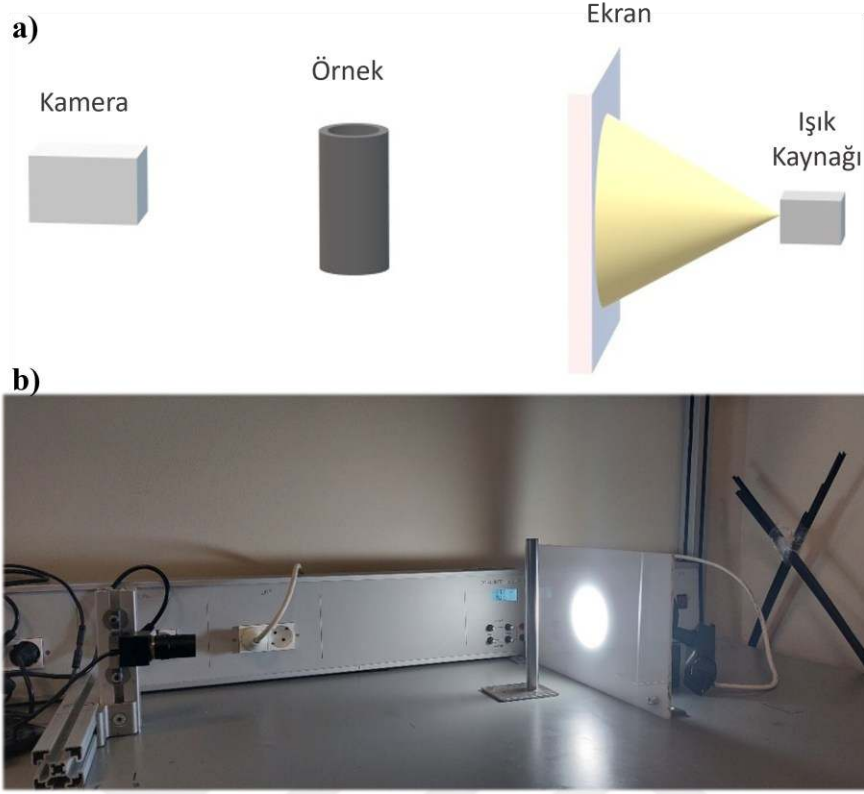
Şekil 3.17. Ayna açıları (θ , α , β), yatay konumlar (w_1 , w_2), düşey konumlar (h_1 , h_2 , h_3) ve nesne çapı ($2r$) arasındaki ilişkilerin gösterildiği geometrik model.

İki aynalı bi-telesentrik düzenin tasarım aşamaları ve elde edilen sonuçlar simülasyon modeli, laboratuvar kurulum ve gerçek kamera görüntüsü olarak üç aşamada sunulmuş; bu aşamalar (a) simülasyonda aynaların ve nesnenin konumları ile ışın yollarının modellenmesi ve optik yol analizini, (b) laboratuvarda yerleştirilen aynalar ve kamerayla simülasyonun fiziksel karşılığını, (c) gerçek kamera görüntüsünde ise silindirik cismin tüm yüzeyinin odakta ve eş ölçekli olarak yakalanmasını göstermektedir (Şekil 3.18).



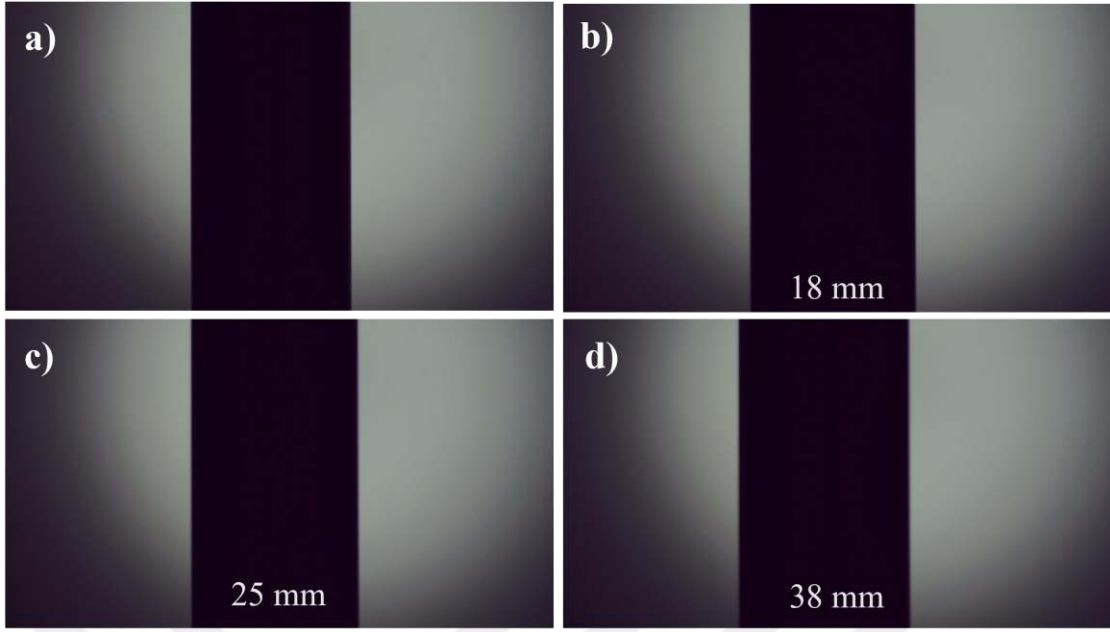
Şekil 3.18. Bi-telesentrik optik sistemin üç aşaması: a) COMSOL’da oluşturulan optik model, b) fiziksel kurulumun üstten görünümü, c) sistemden alınan gerçek kamera görüntüsü

Çalışmanın bir sonraki adımında, kameranın nesneye olan uzaklığının ve diyafram açıklığının görüntü keskinliği üzerindeki etkisi değerlendirildi. Bunun için önce kamera–nesne mesafesi dört farklı değere ayarlandı; her mesafe için odak uzaklığı optimize edilerek görüntüler elde edildi (Şekil 3.19(a-b)). Ardından, odak uzaklığı 10 mm’de sabit tutulurken diyafram açıklığı önce en küçük, sonra en büyük değere ayarlandı ve aynı mesafelerde görüntüler yeniden kaydedildi. Elde edilen resimler, küçük diyafram açıklığında mesafe değişimlerinden kaynaklanan bulanıklığın azaldığını, tersine büyük açıklıkta netlik kaybının arttığını ortaya koyuyor (Şekil 3.20 ve Şekil 3.21). Özellikle maksimum açıklıkta, kameradan nesne uzaklaştıkça görüntüde belirgin blur artışı gözlenirken; minimum açıklıkta tüm mesafelerde daha keskin silüetler elde ediliyor. Bu sonuçlar, hem derinlik alanını genişletmek hem de hareketli nesnelerin izlenmesinde tutarlı keskinlik sağlamak için diyaframın mümkün olduğunca küçük tutulması gerektiğini gösteriyor.

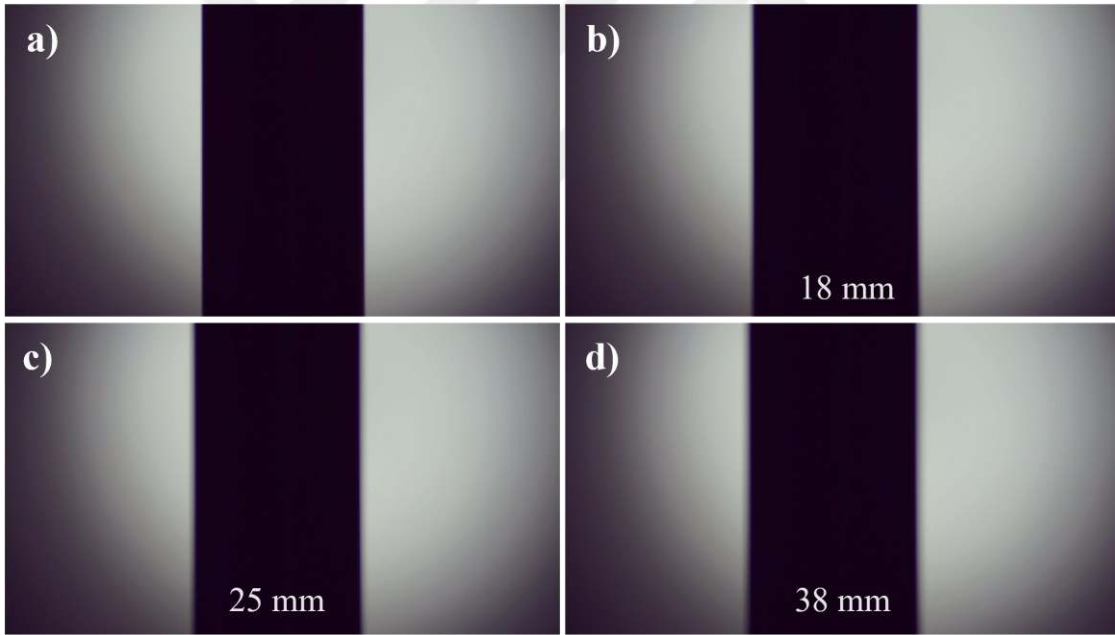


Şekil 3.19. Nesne, kamera ve ışık kaynağının karşılıklı konumlandırıldığı sistem tasarımı. a) Nesne–kamera–ışık kaynağı düzeninin şematik gösterimi, b) Laboratuvar ortamında kurulan fiziksel sistem görünümü.

Kamera odak uzaklığı 10 mm’de sabit tutulduktan sonra önce minimum diyafram açıklığı denendi; pozlama değeri 650 μ s olarak ayarlandı. Cismin kameraya olan uzaklığı dört farklı değerde değiştirilerek görüntüler kaydedildi (Şekil 3.20(a-d)). Daha sonra aynı odak uzaklığında aperture değeri maksimuma ayarlandı ve aynı mesafeler için görüntüler yeniden alındı (Şekil 3.21(a-d)). Deney sonuçları, dar diyafram açıklığında (Şekil 3.20) tüm mesafelerde yüksek keskinlik sağlandığını; geniş açıklıkta ise (Şekil 3.21) mesafe arttıkça görüntüde belirgin blur oluştuğunu gösterir. Bu bulgular doğrultusunda, nesnenin hem net hem de tutarlı bir silüetle yakalanması için diyaframın mümkün olduğunca küçük tutulması ve odak uzaklığının gereken çap aralığını görmeye yetecek şekilde seçilmesi gerektiğine karar verildi.

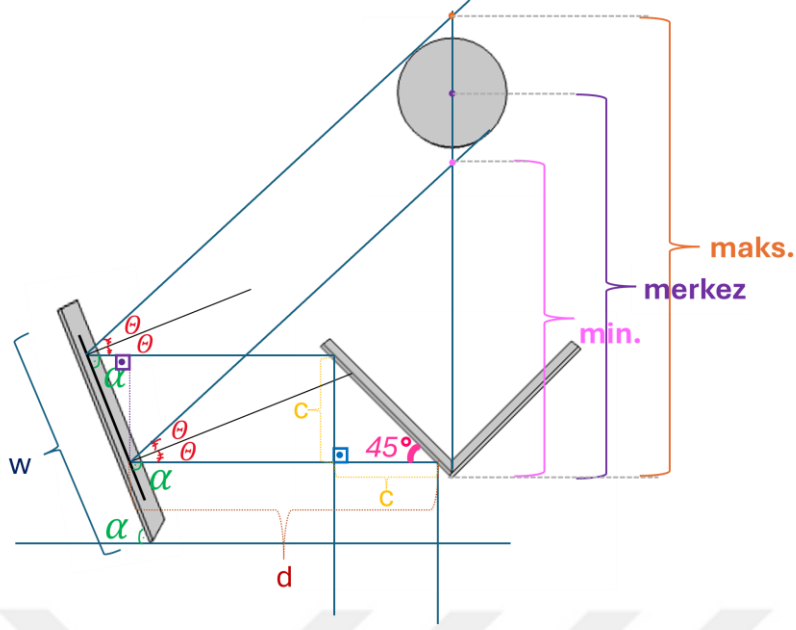


Şekil 3.20. 10 mm odak uzaklığı ve minimum diyafram açıklığıyla, farklı nesne–ekran mesafelerinde elde edilen gölge görüntüleri. a) Referans, b) 18 mm, c) 25 mm, d) 38 mm mesafe.



Şekil 3.21. 10 mm odak uzaklığı ve minimum diyafram açıklığıyla, farklı nesne–ekran mesafelerinde elde edilen gölge görüntüleri. a) Referans, b) 18 mm, c) 25 mm, d) 38 mm mesafe.

Aynaların açısı α , ayna–cisim mesafesi d ve ayna genişliği w değişkenlerine bağlı olarak, ölçülecek cismin kenar noktalarının optik eksen üzerindeki yatay konumları (maks., min.) ile cismin merkezinin konumu (merkez) arasında matematiksel bir ilişki kurulmuştur (Şekil 3.22). Bu model, aynaların konumu ve açısına göre cismin ideal yerleştirme noktasını denklem (4)–(7) ile niceliksel olarak belirler.



Şekil 3.22. Matematiksel model: ayna açısı α , ayna genişliği w ve cisim-ayna mesafesi d ile tanımlanan kenar ve merkez konumları

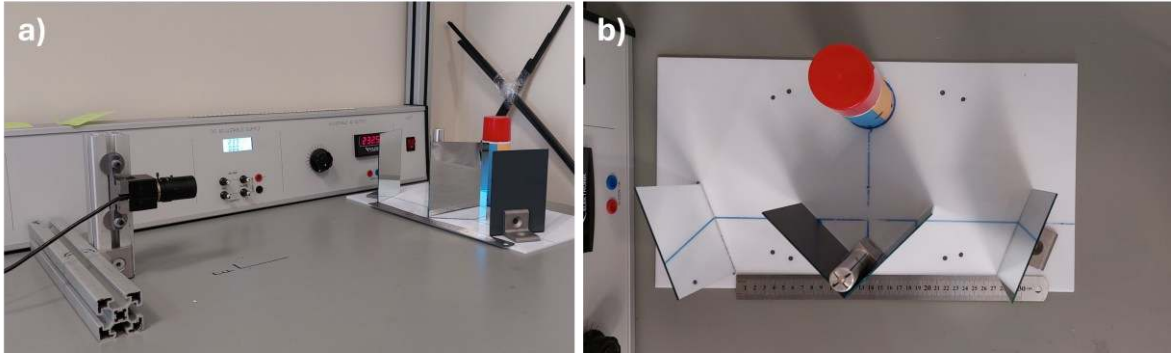
$$\text{maks.} \cong \frac{2 \cot \alpha}{1 - \cot^2 \alpha} \left(d + \frac{w}{\sqrt{2}} \times \cot \alpha \right) + \frac{w}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

$$\text{min.} \cong \frac{2 \times \cot \alpha}{1 - \cot^2 \alpha} \left(d - \frac{w}{\sqrt{2}} \times \frac{1 + \tan^2 \alpha}{2 \times \tan \alpha} \right) + \frac{w}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

$$\text{maks.} - \text{min.} \cong \frac{2 \cot \alpha}{1 - \cot^2 \alpha} \times \frac{w}{\sqrt{2}} \times \frac{2 + \tan^2 \alpha}{2 \times \tan \alpha} \quad (6)$$

$$\text{merkez} \cong \frac{4\sqrt{2}d \times \cot \alpha - w}{2\sqrt{2}(1 - \cot^2 \alpha)} + \frac{w}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

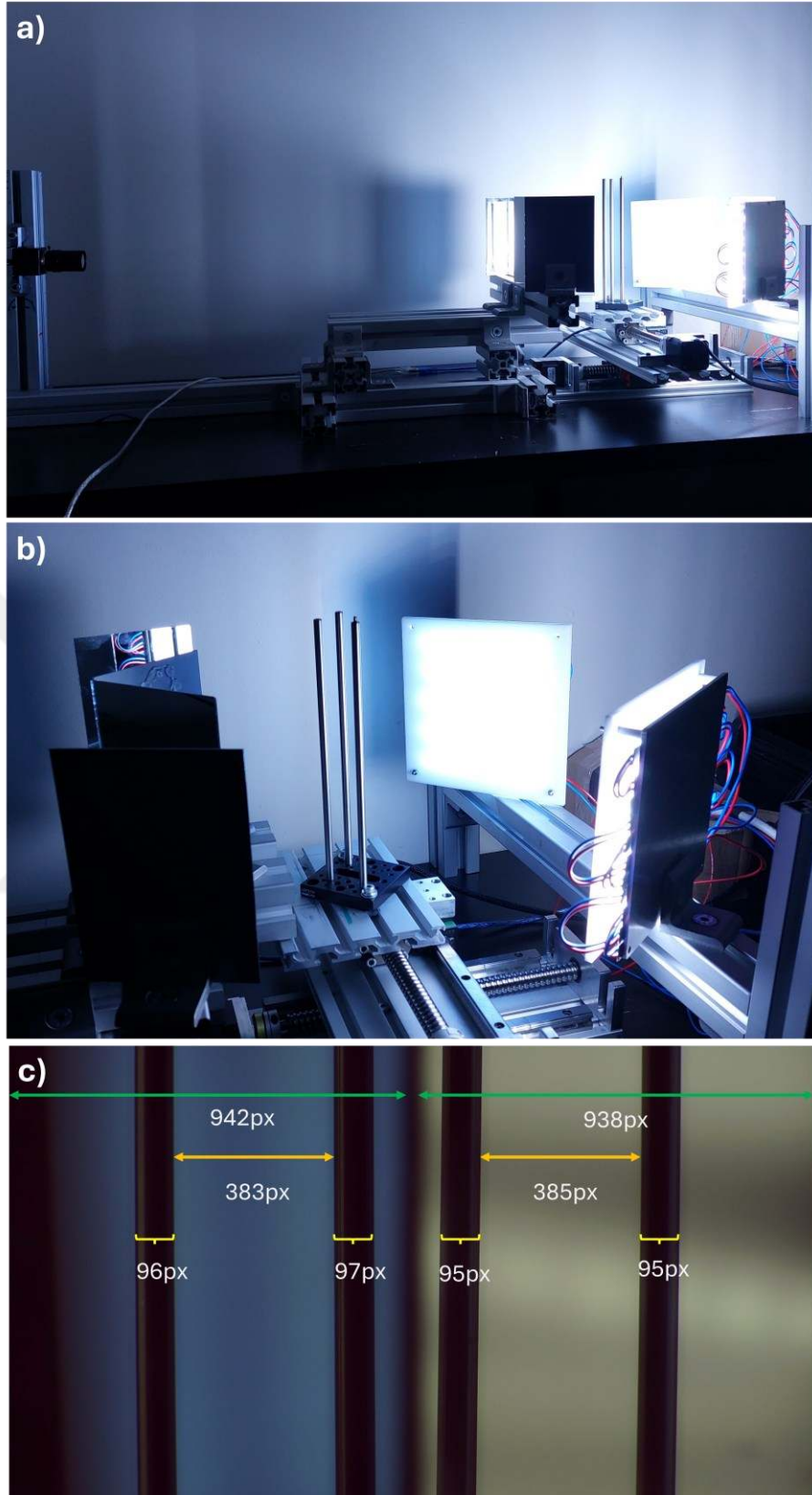
Tasarım sürecinde, aynaların en küçük açısal sapmalarının bile ölçüm doğruluğunu bozabileceği fark edildi. Bu nedenle önce analitik modelden türetilen denklem (4)–(7) sonuçlarına göre her aynanın açısı ve mesafesi kaba olarak ayarlandı (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. Analitik model sonuçlarına göre kurulan dört aynalı görüntüleme düzeni: a) Kamera ve dört aynadan oluşan optik şema, b) Aynalar, ışık kaynağı ve referans çubuğun yerleşimi.

Matematiksel modele uygun olarak kurulan sistem ile alınan görüntüde çubuk gölge görüntülerinin kamera sensörünün farklı bölgelerine düşmüş olmalarına rağmen yakın piksel değerlerinde oldukları belirlendi. Daha kapsamlı ölçümler alıp sonuçları analiz etmek üzere sistem sigma profiller kullanılarak sabitlendi (Şekil 3.24(a-b)). Kameradan alınan gölge görüntüleri Şekil 3.24(c)'de verildi. Sunulan dört aynalı sistem ile 6 mm çaplı referans çubuğun gölge silueti görüntüleri kaydedildi ve gölge kenar genişlikleri piksel bazında ölçüldü. Deneysel veriler, analitik model öngörülerıyla %98 uyum gösterdi; bu da model ile fiziksel düzenek arasındaki yüksek tutarlılığı kanıtladı.

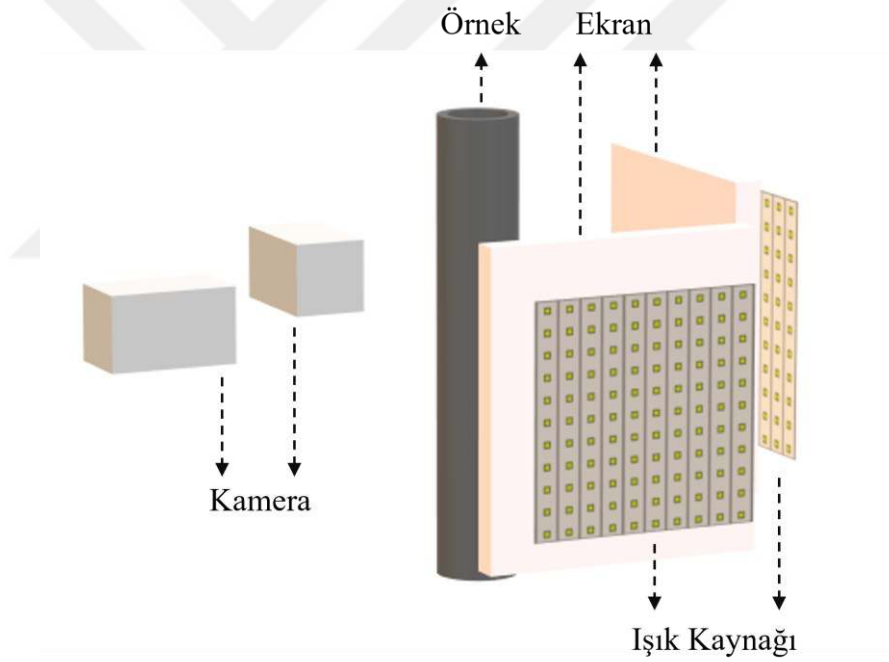
Sistem sigma profiller kullanılarak sabitlendi ve tüm bileşenlerin konumları hassas olarak kilitlendi. Bu sayede mekanik titreşimlerden ve hizalama hatalarından kaynaklanabilecek kaymalar en aza indirildi. Sabitlenmiş düzenek üzerinde gerçekleştirilen ek ölçümler, önceki denemelerle karşılaştırıldığında tutarlılık ve tekrarlanabilirlik açısından belirgin bir iyileşme sağladı. Böylece sistem, gerçek zamanlı çevrim içi çap ölçümlerinde yüksek doğruluk ve güvenilirlikle kullanılmak üzere hazır hâle getirildi. 360° görüntüleme düzeni laboratuvar ortamında başarıyla doğrulandı. Ancak endüstriyel ölçüm hatlarında kolay kurulum ve hızlı yeniden konfigürasyon gereksinimi göz önüne alınarak, daha basit bir donanım düzeni sunan gölge görüntüleme sisteminin tasarımına geçildi. Bir sonraki bölümde (3.3.2) bu sistemin kurulum adımları, kalibrasyon yöntemi ve gerçek zamanlı test sonuçları ayrıntılı olarak ele alındı.



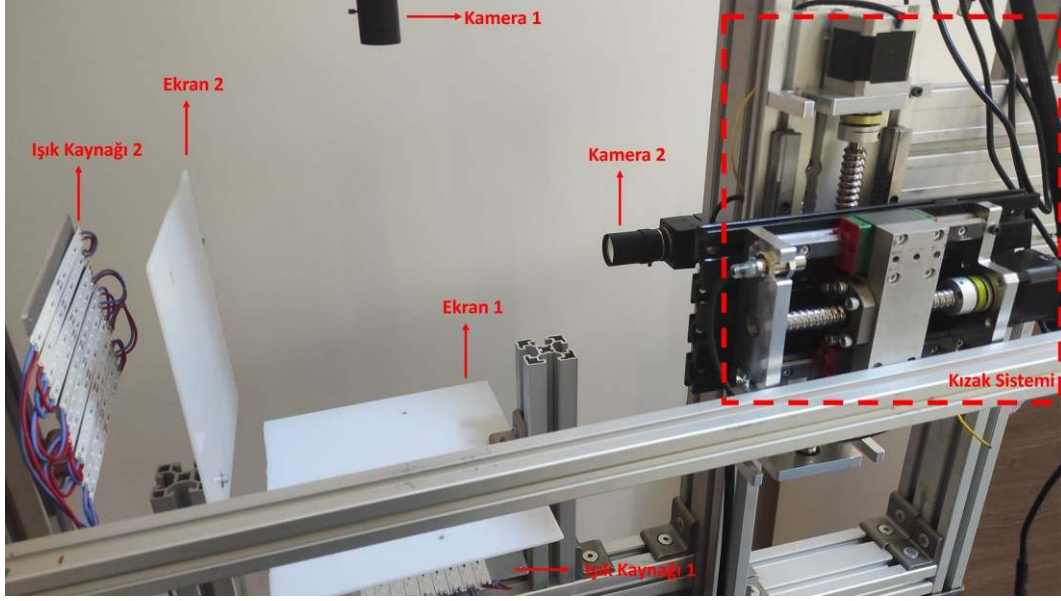
Şekil 3.24. Sabitlenen sistemin farklı açılardan görünümü: (a) Sistemin genel görünümü, (b) Görüntüleme bölümü, (c) Kameradan alınan görüntü (6 mm çubuk).

3.3.2. Gölge görüntüleme sistemi

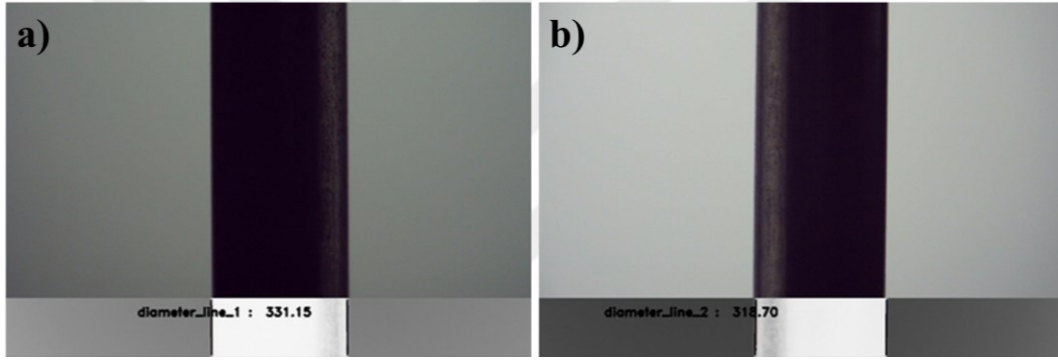
Endüstriyel uygulamalara daha rahat bir şekilde adapte edilebilecek, yüksekliği ayarlanabilir ve hareket edebilen bir sistem tasarlandı (Şekil 3.25, Şekil 3.26). Sistemin çalışma mekanizması tamamen gölge görüntülemeye dayanmakta olup, farklı konumlarda olabilecek nesneler için kalibrasyon yapılması gerekliliktir. Kalibrasyon değerlerinin oluşturulabilmesi için 2 eksenli bir kızak sisteme entegre edildi. Bu kızaklar sayesinde örneğin kameraların kesişim noktasını merkez olarak alırsak kameranın görüş alanı içerisindeki tüm noktalarda otomatik olarak ve belirli adımlar ile hareketi sağlandı. Kızakların otomatik olarak hareket edebilmesi için gerekli elektronik devre tasarlandı ve kızak bağlantıları yapıldı. Daha sonra çubuğu sabitlemek için kızığa bir parça entegre edildi. İki kamera ile görüntü almak için kod çalışmaları yapıldı. 8 mm çubuk ile alınan görüntüye dair bir örnek Şekil 3.27’de verildi. Görüleceği üzere Kamera 1’den elde edilen çap değeri 331,15 piksel iken, Kamera 2’den elde edilen çap değeri 318,70 pikseldir.



Şekil 3.25. İki kameralı gölge ölçüm sisteminin şematik diyagramı



Şekil 3.26. LED Aydınlatmalı Gölge Görüntüleme Sistemi



Şekil 3.27. İki kameralı sistemden alınan görüntüler: (a) Kamera 1, (b) Kamera 2. SBM metoduda göre hesaplanan piksel tabanlı çap değerleri sırasıyla 331,15 (Kamera 1) ve 318,70 (Kamera 2) olarak belirlendi.

Hata değerini düşürebilmek için daha önceden kullanılan kamera ile örnek arası mesafe 45 mm artırıldı. Kamera 2'den alınan görüntü kamera 1 için yerleştirilen ışık kaynağından etkilenmektedir. Ekran ve ışık kaynağı arası mesafe değiştirilerek bu problem çözülmeye çalışıldı. Daha mat görüntüye sahip bir çubuk kullanıldığı zaman ise parlama etkisinin yok olduğu gözlemlendi.

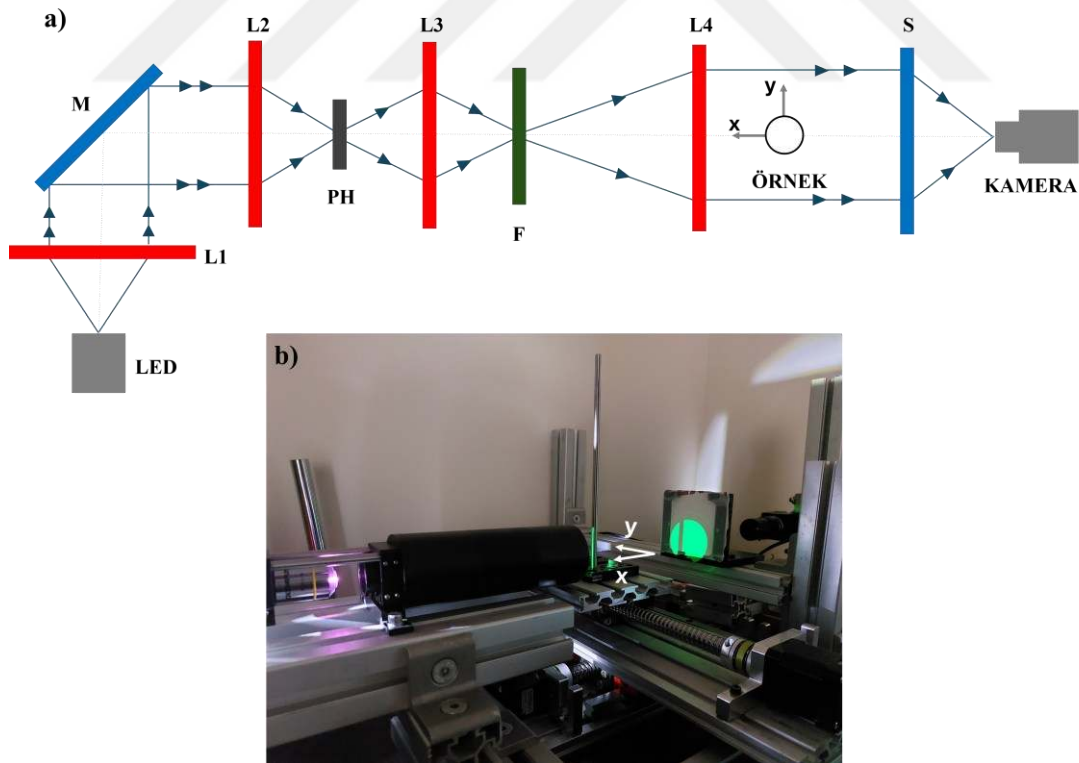
Burada kurulan gölge projeksiyon sistemi, basit donanım ve hızlı kalibrasyon imkânlarıyla tekrarlanabilir gölge ölçümleri sağladı. Bununla birlikte, perspektif bozulmaları tamamen elimine edilemedi ve farklı derinliklerdeki nesnelerde ışık yoğunluğu değişimleri görüldü. Bu nedenle, ışın demetini optik eksene paralel tutarak perspektif etkilerini tamamen ortadan kaldıran ve derinlik değişimlerinden bağımsız tutarlı gölge

görüntüleri elde eden bir telesentrik gölge görüntüleme sistemi tasarlandı. 3.3.3 bölümünde bu düzenek mimarisi, optik bileşen yerleşimi ve performans analizleri detaylandırıldı.

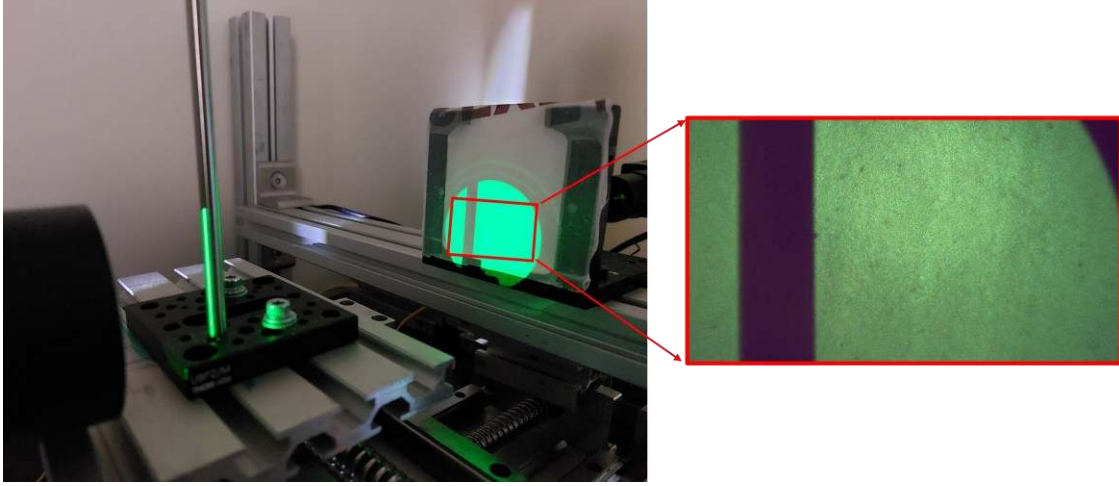
3.3.3. Telesentrik gölge görüntüleme sistemi

Endüstriyel hat içi gerçek zamanlı çap ölçümünde perspektif etkilerini bütünüyle ortadan kaldırmak amacıyla, ışın demetini optik eksene paralel tutan telesentrik gölge görüntüleme sistemi tasarlandı ve uygulandı.

Yuvarlak nesnelerin çaplarını ölçmek için optik sistemin tasarımı Şekil 3.28(a-b)'de verildi . Sistem bileşenleri, yüksek güçlü bir LED (5W, 5000K), 25 mm odak uzaklığına sahip bir dışbükey lens, ayna, 35 mm odak uzaklığına sahip bir yakınsak lens, 10X objektif lens (0,25 sayısal açıklık) ve 50 mm çapında ve 180 mm odak uzaklığına sahip akromatik bir mercekten oluşuruldu. Koşutlanmış ışık huzmesi numuneyi aydınlatır ve numunenin gölge grafiği profili (Şekil 3.29) numune ile 10–50 mm değişken görüntüleme merceğine sahip 5 megapiksel USB kamera arasına yerleştirilmiş ince bir ekranda görüntülendi. Renk sapmasını önlemek için, sensörün maksimum cevap verdiği dalga boyu aralığına uygun olacak şekilde akromatik mercekten önce yeşil bir filtre kullanıldı.



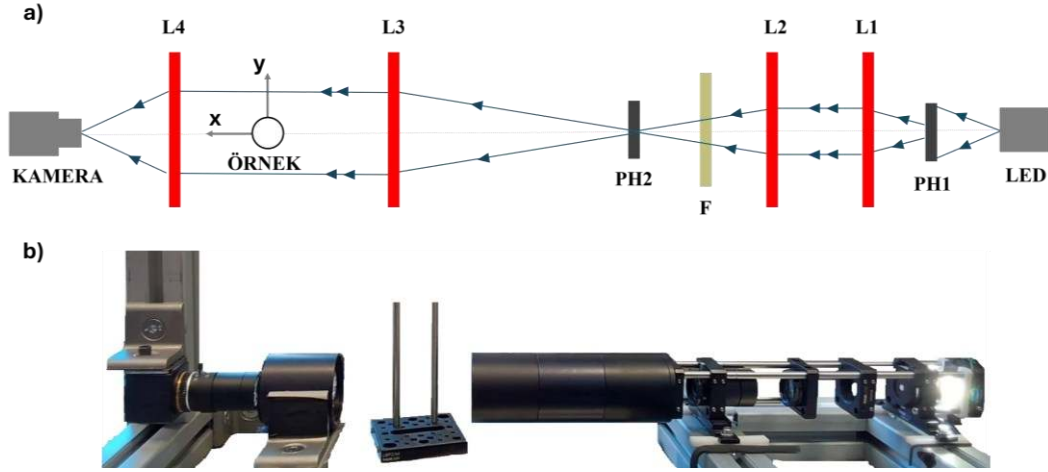
Şekil 3.28. Telesentrik gölge görüntüleme sistemine ait optik düzenek: (a) Optik bileşenlerin şematik gösterimi. Sistemde sırasıyla bir ayna (M), iki yakınsak lens [L1: 25 mm odak uzaklığı, L2: 35 mm odak uzaklığı], bir iğne deliği (PH), bir objektif lens (OBJ), bir bant geçiren filtre (F), bir akromatik lens (L4) ve bir ekran (S) bulunmaktadır. (b) Gerçek sistemden bir kesit görüntüsü.



Şekil 3.29. Kamera tarafından yakalanan bir çubuğun anlık görüntüsü

3.3.4. Telesentrik Görüntüleme Sistemi

Taşınabilir, masaüstünde kullanılabilir bir çözüm yaratma hedefiyle başka bir telesentrik optik sistem geliştirildi. Tasarım yapılırken yüksek performanslı, hassasiyeti yüksek, ancak uygun fiyatlı bir tasarım geliştirilmesine önem verildi. Işık kaynağı olarak yüksek güçlü bir LED (5W, 5000K) seçildi. Optik tasarımda (Şekil 3.30(a)), ışık huzmesinin eşit şekilde dağıtılmasını sağlamak ve noktasal ışık kaynağı gibi davranmasını sağlamak için difüzör ve iğne deliği gibi temel bileşenler kullanıldı. Huzmeyi olabildiğince noktasal hale getirmek için 30 mm ve 100 mm odak uzaklıklarına sahip iki lens kullanıldı. Daha sonra, renk sapmalarını en aza indirmek ve büyük ölçüde paralel yüksek çaplı ışık kaynağı elde etmek amacıyla akromatik bir lens (2 inç) kullanıldı. Maliyet kontrolü bir öncelikti, bu nedenle tasarım, temel işlevselliği korurken bileşen sayısını azaltarak işleri basit tutmayı amaçlıyordu. Ancak sistemin basitliği bazı zorlukları da beraberinde getirdi. Başlıca sorunlardan biri, ışık kaynağı ve optik bileşenlerin tutarlı bir şekilde hizalanmasını sağlamaktı. Yanlış hizalama, optik yolda sapmalara neden olarak telesentrikliği ve genel performansı olumsuz etkiledi. Bir diğer sorun da test ve doğrulama sırasında ölçümlerde tekrarlanabilirliğin olmamasıydı. Bununla, maliyetleri düşük tutma, kompakt bir form koruma ve güvenilir performans sunma arasındaki zorlu denge eylemini vurgulanmak istenmektedir. 2 adet akromatik 2 inç lens kullanılarak aşağıda tasarımı verilen sistem kuruldu (Şekil 3.30(b)). Bu sistemde karşılaşılan temel problemler ışığın merkezlenmesi, olabildiğince noktasal ışık kaynağı elde etme, optik sistemin hizalanması ve kameralardaki sensör boyut ve yerleşimindeki farklılıklardan ortaya çıkan ölçüm hatalarıdır.

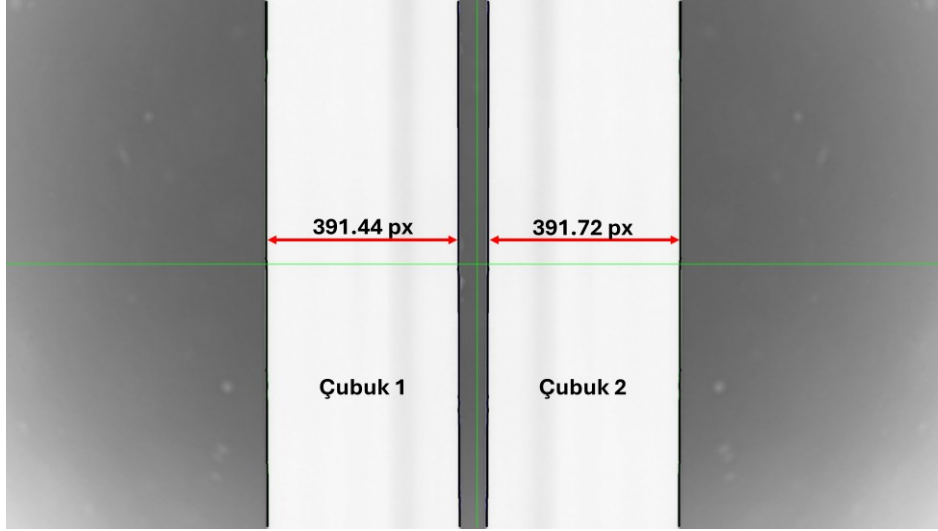


Şekil 3.30. Telesentrik gölge görüntüleme sisteminin tasarımı ve kurulumu: (a) Optik sistemin şematik yerleşimi. Şemada; odak uzaklıkları sırasıyla 100 mm ve 35 mm olan iki yakınsak lens (L1 ve L2), bir iğne deliği (PH), bir bant geçiren filtre (F) ve iki adet akromatik lens (L3 ve L4) yer almaktadır. (b) İki adet 2 inç çapında akromatik lens kullanılarak oluşturulan fiziksel sistem görüntüsü.

Telesentrik sistemlerde, optik sistemin ana avantajlarından biri, görüntü büyütmesinin nesnenin kamera ile olan mesafesine bağlı olmamasıdır. Bu, nesneler farklı uzaklıklarda bulunsada aynı boyutla görüntülenmelerini sağlar. Bu sistemde kullanılan optik tasarım, ışık huzmesini mümkün olduğunca paralel hale getirerek telesentrik bir aydınlatma sağlar.

Şekil 3.30(b)'de gösterilen düzende yerleştirilen iki çubuk, farklı derinlik düzlemlerine (kameraya olan mesafeleri farklı olacak şekilde) konumlandırılmıştır. Eğer elde edilen ışık huzmesi gerçekten paralel ise ve sistem tam telesentrik davranış gösteriyorsa, bu çubukların kameradan uzaklık farkına rağmen görüntüde eşit boyutta görünmeleri beklenir. Ancak sistemin kusursuz olmaması veya ışık huzmesinde paralellikten sapmaların oluşması durumunda, farklı derinliklerdeki çubukların görüntüde farklı boyutlarda çıktığı gözlemlenebilir. Bu farklar, sistemdeki optik eksen kaymaları, mercek hizalama hataları veya ışık kaynağının düzgün kolimlenmemesi gibi nedenlerden kaynaklanabilir.

Şekil 3.31'de, bu çubukların görüntüleri gri seviyeye dönüştürülerek yapılan görüntü işleme analizine yer verilmiştir. Çapı temsil etmek üzere rastgele yerleştirilen çizgiler boyunca hesaplanan piksel değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu durum, telesentrik sistemin genel olarak istenilen performansı verdiğini, ancak farklı derinliklerdeki nesnelerde küçük sapmaların hâlen mevcut olabileceğini göstermektedir. Bu analiz, telesentrik tasarımın doğruluğunu değerlendirmek ve sistemin kalibrasyonunun ne derece başarılı olduğunu test etmek açısından önemlidir.



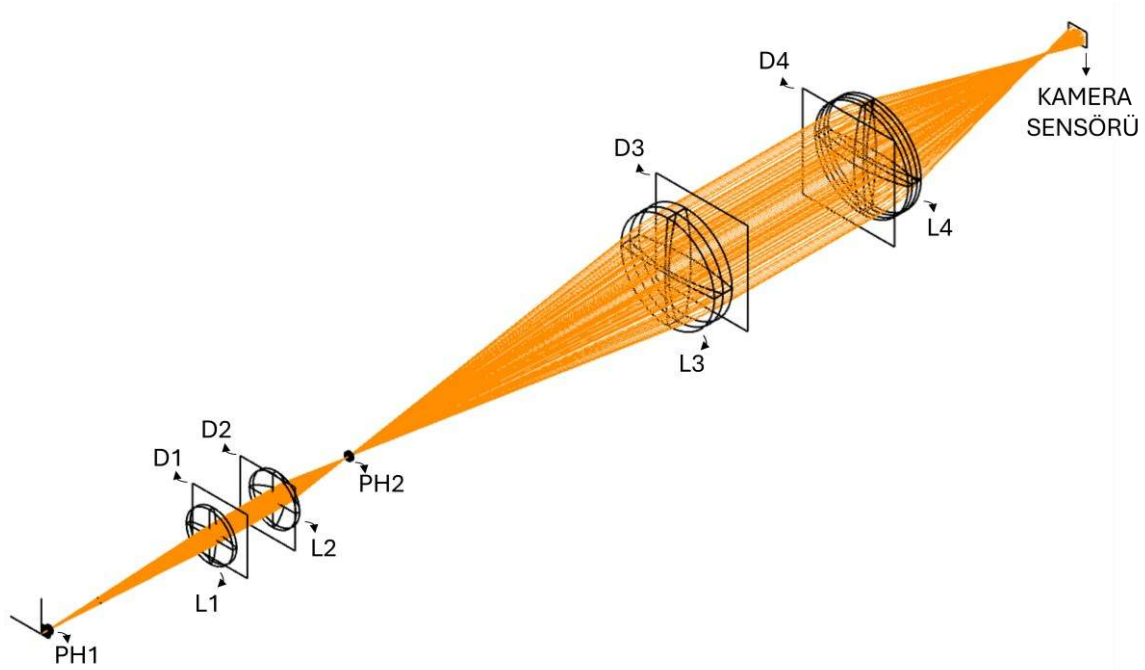
Şekil 3.31. Telesentrik sistem ile elde edilen gri seviye görüntü üzerinde, farklı derinlikteki çubukların (bkz. **Şekil 3.30(b))** çaplarının karşılaştırmalı piksel analizi

Optik sistem, ışığın yayılımı ve saçılması gibi fiziksel süreçlerin modellenenebilmesi için, karmaşık 3B optik yapılandırmaların modellenmesine olanak tanıyan Zemax OpticStudio programının Sıralı Olmayan Bileşen (Non-Sequential Component(NSC)) modu kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 3.32). Sistem, kaynak noktaları, optik lensler, ışığın rastgele yönlere saçılmasını sağlayan bir hacimsel yapı, dedektörler ve uzamsal referanslama ve hizalama için kullanılan çeşitli referans nesneler dahil olmak üzere 24 ayrı bileşenden oluşur. Birincil kaynak, toplam 1 Watt optik güçle 0,5876 μm dalga boyunda polarize olmayan ışık yayar. LA1509-A, LA1027-A ve AC508-180-A gibi N-BK7 ve SF5 standart lenslerden oluşan bir dizi bileşen, ışını odaklamaktan ve kolime etmekten sorumludur, böylece ışığı yayar. Lens yüzeyleri, yansıma kayıplarını en aza indirmek ve iletim verimliliğini artırmak için THORA gibi yansıma önleyici kaplamalarla kaplanmıştır. Malzeme etkileşimleri, Gauss ve Lambert modelleri aracılığıyla saçılma olayları da dahil edilmesi ile gerçekçi bir şekilde modellenir. Emici malzemeler kullanılarak ışınlar sonlandırılabilir veya ışık belirli hacimler içinde sınırlandırılabilir.

Işık huzmesinin çeşitli aşamalarındaki mekansal dağılımını ve yoğunluk profilini izlemek için optik eksen boyunca 1000×1000 piksel çözünürlüğe sahip dikdörtgen dedektörler konumlandırıldı (D1-4). Bu sensörler, optik güç yoğunluğu, iraksama ve odaklamanın nicel analizini kolaylaştırır. Dedektörler, hem doğrudan hem de dağılmış fotonların algılanmasını sağlayan tam açısal kabul (hem x hem de y yönlerinde $\pm 90^\circ$) için yapılandırılmıştır. Gerçekçi montajı simüle etmek için dönüşüm matrisleri ile, optik bileşenler için dönüş ve çeviriler tanımlanarak konumlandırılmaları ve yönlendirilmeleri

sağlanmıştır. Tüm simülasyonlar, uygun şekilde ayarlanmış kırılma indisi değerleriyle 20°C ve 1 atmosfer basıncı ortam koşullarında gerçekleştirilir. Sistem, iki milyon ışına kadar kapasiteye sahip ışın izleme tekniklerini kullanarak optik analiz gerçekleştirir. Birim olarak milimetre kullanılmıştır.

Zemax yapılandırma dosyası, özel cam kataloglarına, kaplama dosyalarına ve saçılma profillerine başvurarak simülasyonda kullanılan tüm malzeme ve arayüz özelliklerinin doğruluğunu ve özgüllüğünü sağlar. Bu yapılandırma, amaçlanan tasarımın optik performansını, hizalama hassasiyetini ve genel sistem verimliliğini etkili bir şekilde değerlendirir.



Şekil 3.32. Zemax OpticStudio yazılımında oluşturulan telesentrik gölge görüntüleme sisteminin optik tasarımı. Sistem; iki iğne deliği (PH1 ve PH2), dört optik lens (L1–L4) ve bir kamera sensöründen oluşmaktadır. Işınlardan izlediği yollar, sistemin odaklama ve kolimasyon karakteristiğini yansıtacak şekilde simüle edilmiştir.

Zemax yazılımında oluşturulan optik sistemin tasarım parametreleri EK-1’ de verildi. Zemax Dedektör Görüntüleyici’ den elde edilen veri seti (Tablo 3.3), sistemin optik performansı ile ilgili önemli bilgiler sağlar. Veriler, iki ayrı dalga boyu konfigürasyonunda Dedektör-1 (D1) ve Dedektör-2 (D2) ile Dedektör-3 (D3) ve Dedektör-4 (D4) olmak üzere iki dedektör grubundan alınan ölçümleri içerir. D1 ve D2 için merkez konumları belirgin şekilde sifıra yakındır ve bu, ışının dedektör üzerinde doğru bir şekilde merkezlendiğini gösterir. RMS nokta yarıçapı değerleri yaklaşık 3,61 ve 3,67 birimdir ve karşılık gelen x ve

y bileşenleri 2,55–2,60 birim civarındadır ve bu da ışının minimum yayılma ile sıkı bir şekilde odaklandığını gösterir. Işın konumlandırma ve konsantrasyonundaki hassasiyet, yüksek hassasiyetli endüstriyel uygulamalar için önemlidir. Dedektörler 3 ve 4, yaklaşık 15,45 ile 15,58 birim olmak üzere daha büyük RMS nokta yarıçapları sergiler ve karşılık gelen RMS bileşenleri 10,92 ile 11,02 birim arasındadır. Artış, 2 inçlik daha büyük ışın çapından kaynaklanmaktadır. Artan nokta boyutuna rağmen, merkez konumları iyi merkezlenmiş durumda kalır ve bu da daha geniş bir ışınla bile optik hizalamanın korunduğunu gösterir. 0,58756180 nm'lik dar bir dalga boyundan 0,420 nm'den 0,700 nm'ye kadar iki farklı dalga boyu ayarında ölçümlerdeki tutarlılık, sistemin kalibrasyonunun sağlamlığını ve çeşitli çalışma koşullarında güvenilir performansını gösterir. Veriler, kalibrasyon sürecinin etkili olduğunu göstermektedir. Tüm dedektörlerde gözlemlenen minimum merkez sapmaları, optik hizalamanın hassasiyetini doğrular ve ışın çapıyla ilgili dalgalanmalara rağmen RMS değerleri tutarlı ve tekrarlanabilir kalır. Bulgular, sistemin endüstriyel çap ölçümleri için uygun olduğunu, çeşitli koşullarda yüksek hassasiyet ve güvenilir performans sunduğunu doğrular. Sürekli izleme ve yeniden kalibrasyon, çevresel değişkenlerin kapsamlı bir şekilde belgelenmesiyle birlikte, sistemimizin ölçüm doğruluğunu ve tutarlılığını zamanla artıracaktır. Yukarıdaki sistemde renk filtresi kullanılmakta olup Tablo 3.3 monokromatik ışıdan elde edilen ölçüm sonuçlarıdır.

Tablo 3.3. Zemax OpticStudio yazılımında, renk filtresi kullanılan tasarıma ait dört farklı dedektör konumunda elde edilen merkez koordinatları ve RMS nokta yarıçapı değerleri. Her dedektör için X ve Y eksenlerindeki RMS bileşenleri de verilmiştir.

	Merkez-X	Merkez-Y	RMS Nokta Yarıçapı	RMS Nokta X Bileşeni	RMS Nokta Y Bileşeni
Dedektör 1 (D1)	$7,6 \times 10^{-6}$	$-5,054 \times 10^{-5}$	$3,611 \times 10^{-5}$	$2,553 \times 10^0$	$2,553 \times 10^0$
Dedektör 2 (D2)	$7,72 \times 10^{-6}$	$-5,138 \times 10^{-5}$	$3,672 \times 10^{-5}$	$2,596 \times 10^0$	$2,596 \times 10^0$
Dedektör 3 (D3)	$-2,697 \times 10^{-5}$	$8,467 \times 10^{-5}$	$1,545 \times 10^1$	$1,092 \times 10^1$	$1,092 \times 10^1$
Dedektör 4 (D4)	$-2,685 \times 10^{-5}$	$8,430 \times 10^{-5}$	$1,544 \times 10^1$	$1,091 \times 10^1$	$1,091 \times 10^1$

Sistemden filtre çıkarılarak ölçümler tekrarlandı. Sonuçlar (Tablo 3.4), sistemin daha geniş dalga boyu aralığında marjinal olarak daha büyük nokta boyutları ve merkez kaymaları sergilediğini ortaya koymaktadır. Dedektör 1 ve 2, her iki senaryoda da 3,61 ile 3,67 birim arasında değişen küçük RMS nokta yarıçapları sergilemektedir. Ancak, merkez kaymaları daha geniş spektrumda daha belirgindir. Dedektör 3 ve 4, daha büyük ışın çapının göstergesi

olan önemli ölçüde daha büyük RMS nokta yarıçapları (yaklaşık 15,4–15,6 birim) sergilemektedir. Ek olarak, daha geniş dalga boyu aralığında merkez kaymasındaki artış daha belirgindir. Bulgular, birden fazla dalga boyu mevcut olduğunda renk sapmalarının veya dispersiyon etkilerinin daha büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Karşılaştırıldığında, tek dalga boyu verileri daha kararlı merkez değerleri ve marjinal olarak daha sıkı nokta dağılımları göstermektedir. Bu, tek dalga boyunda çalışmanın optik tasarımı basitleştirdiğini ve dalga boyuna bağlı sapmaların etkisini azalttığını göstermektedir.

Tablo 3.4. Zemax OpticStudio yazılımında, renk filtresi kullanılmayan (filtresiz) tasarıma ait dört dedektör konumunda elde edilen ışın verileri. Her dedektör için ışının merkez konumu (X ve Y), RMS nokta yarıçapı ile X ve Y bileşenlerine ait değerler verilmiştir.

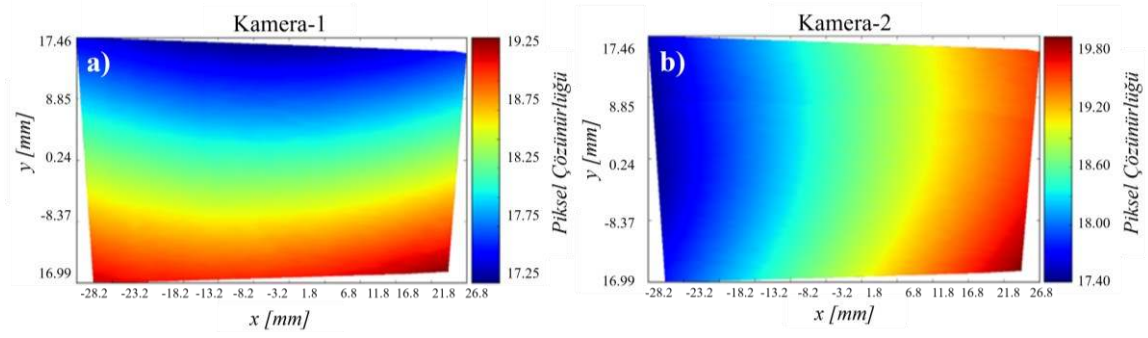
	Merkez-X	Merkez-Y	RMS Nokta Yarıçapı	RMS Nokta X Bileşeni	RMS Nokta Y Bileşeni
Dedektör 1 (D1)	$-1,117 \times 10^{-4}$	$-1,006 \times 10^{-4}$	$3,611 \times 10^0$	$2,553 \times 10^0$	$2,553 \times 10^0$
Dedektör 2 (D2)	$-1,044 \times 10^{-4}$	$-1,056 \times 10^{-4}$	$3,673 \times 10^0$	$2,597 \times 10^0$	$2,597 \times 10^0$
Dedektör 3 (D3)	$-7,669 \times 10^{-3}$	$5,695 \times 10^{-3}$	$1,559 \times 10^1$	$1,102 \times 10^1$	$1,102 \times 10^1$
Dedektör 4 (D4)	$-7,684 \times 10^{-3}$	$5,702 \times 10^{-3}$	$1,558 \times 10^1$	$1,102 \times 10^1$	$1,102 \times 10^1$

4. BULGULAR

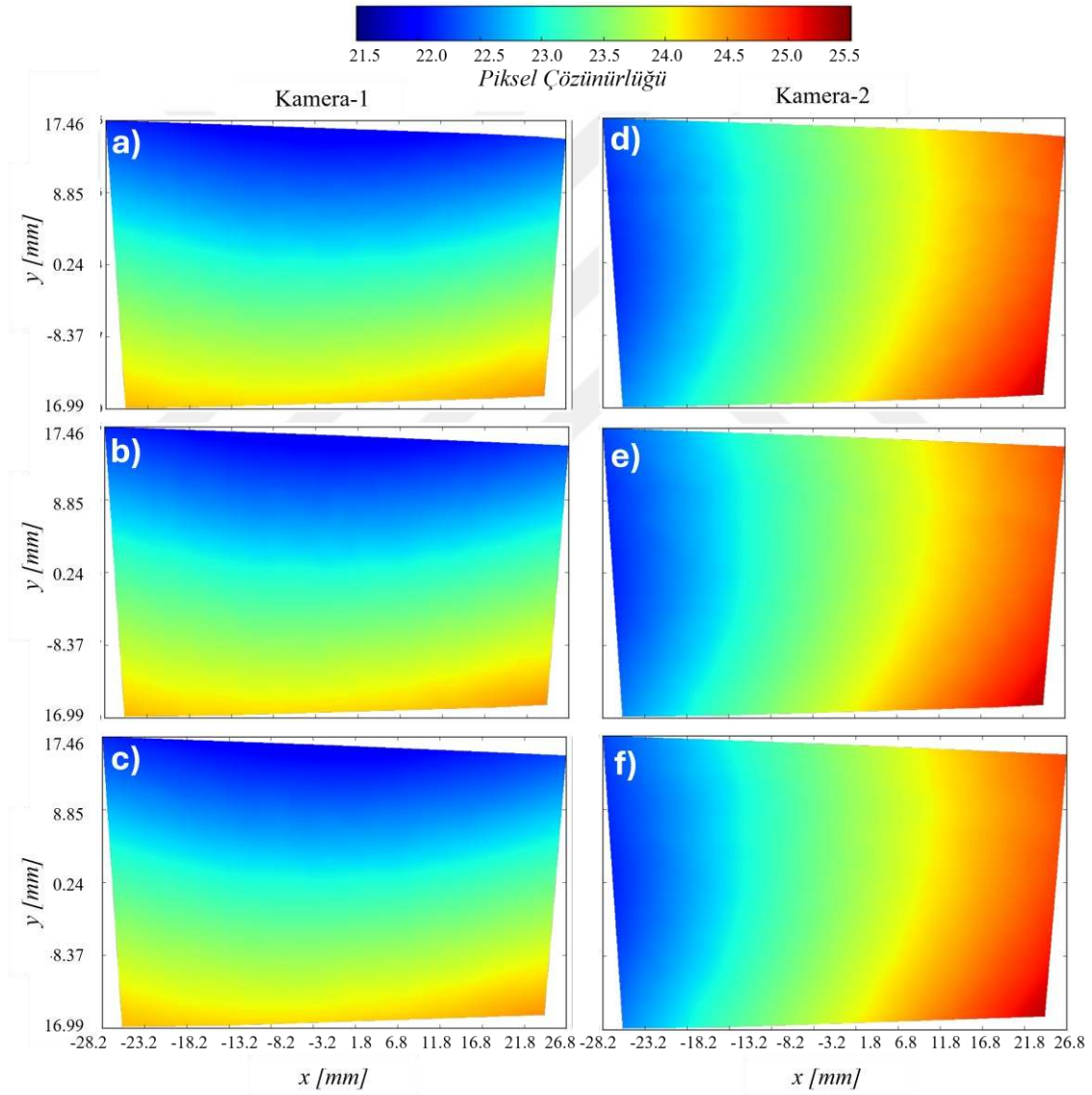
4.1. Gölge Görüntüleme Sistemi

Bu bölümde kullanılan sistem, gölge projeksiyon prensibine dayalı olarak geliştirilmiş ve farklı çaplardaki nesnelerin temassız şekilde ölçülmesine olanak tanımıştır. Deneysel kurulumda, bir LED arka aydınlatma ile yüksek kontrastlı gölgeler elde edilerek kamera aracılığıyla görüntü alınmıştır (Bkz. Bölüm 3.3.2). Elde edilen görüntülerden anlık çap bilgisi elde edebilmek amacıyla, Python tabanlı özel bir görüntü işleme yazılımı geliştirilmiştir. Yazılım, gerçek zamanlı çalışacak şekilde optimize edilmiş olup, her bir görüntü karesi alındıktan sonra hızlıca ön işleme (gri seviye dönüşüm, eşikleme), kenar tespiti ve alt piksel düzeyinde çap tahmini gerçekleştirmektedir. Bu geliştirme sayesinde sistem, hareketli nesnelerden alınan görüntüleri işleyerek çevrimiçi (online) ölçüm sonuçları sunabilmektedir. Böylece, hem sistemin ölçüm hızına hem de tekrarlanabilirliğine katkı sağlanmıştır. Gerçek zamanlı analiz kapasitesi, sistemin üretim hattı benzeri uygulamalarda kullanılabilirliğini artırmakta ve klasik çevrimdışı analiz yöntemlerine göre önemli bir avantaj sunmaktadır.

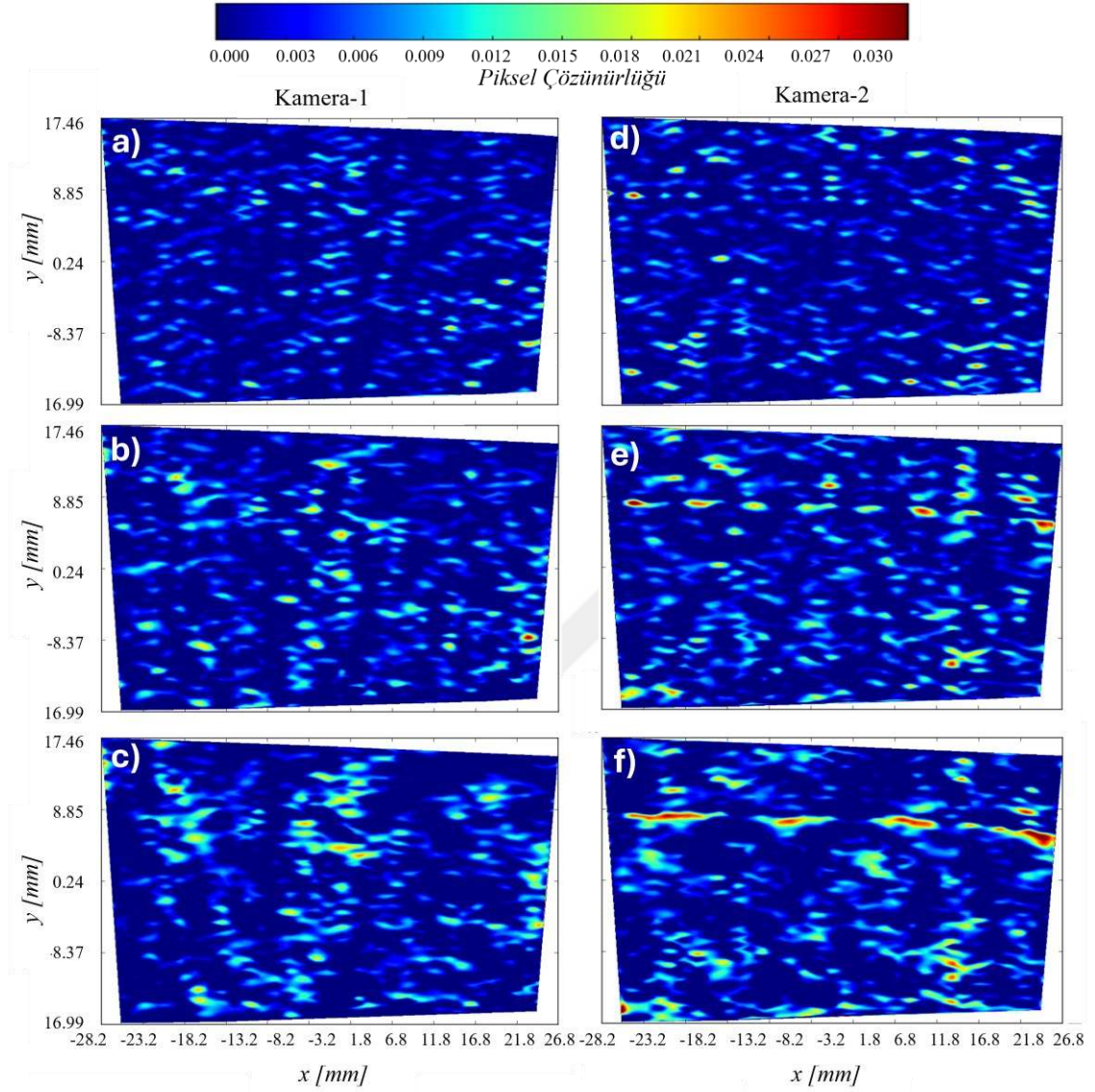
Gerçek zamanlı ölçüm sürecinde, sistemin kalibrasyon ve doğruluk analizlerinin yapılabilmesi için iki farklı kameradan (1. ve 2. kamera) 7,6 mm çapındaki referans çubuk (Thorlabs) kullanılarak görüntüler alındı. Bu görüntülerden her biri için çubuğun merkez konumu ve çap bilgisi elde edilerek kalibrasyon verileri oluşturuldu. Elde edilen bu bilgiler, sistemin çeşitli derinlik düzlemlerindeki davranışını modellemek amacıyla interpolasyon işlemlerinde referans olarak kullanıldı. Ancak, deney kapsamında toplamda 1444 adet görüntüden oluşan geniş bir veri seti elde edilmiştir. Tüm verilerin tek tek işlenmesi zaman açısından verimsiz olacağından, interpolasyon işlemi sırasında belirli aralıklarla örnekleme yapıldı, böylece veri yoğunluğu azaltılarak işlem süresi optimize edildi (Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3). İnterpolasyon sonuçları renk haritaları ile görselleştirilmiş ve sistemin optik eksene olan uzaklıkla birlikte nasıl davrandığı detaylı olarak analiz edildi. Özellikle obje kameradan uzaklaştıkça, çubuğun görüntü üzerindeki temsili daha fazla piksel içerdiği; dolayısıyla piksel başına düşen fiziksel alanın küçüldüğü ve bu durumun da çözünürlükte artışa neden olduğu gözlemlendi.



Şekil 4.1. a) Kamera 1 ve b) Kamera 2 ile alınan kalibrasyon verisine göre her bir piksel için hesaplanan çözünürlük değerlerinin renk haritası ile gösterimi



Şekil 4.2. Farklı örnekleme aralıklarıyla (2, 4 ve 8 piksel) yapılan interpolasyon sonucu elde edilen piksel çözünürlüğü dağılımları: (a–c) Kamera 1, (d–f) Kamera 2. (a,d): 2 piksel, (b,e): 4 piksel, (c,f): 8 piksel örnekleme aralığına karşılık gelmektedir.



Şekil 4.3. Gerçek veriler ile interpolasyon sonuçları arasındaki farkların renkli harita ile görselleştirilmesi: (a–b–c) Kamera 1 ve (d–e–f) Kamera 2 görüntüleri için fark dağılımları (a,d): 2 piksel, (b,e): 4 piksel, (c,f): 8 piksel örnekleme aralığına karşılık gelmektedir.

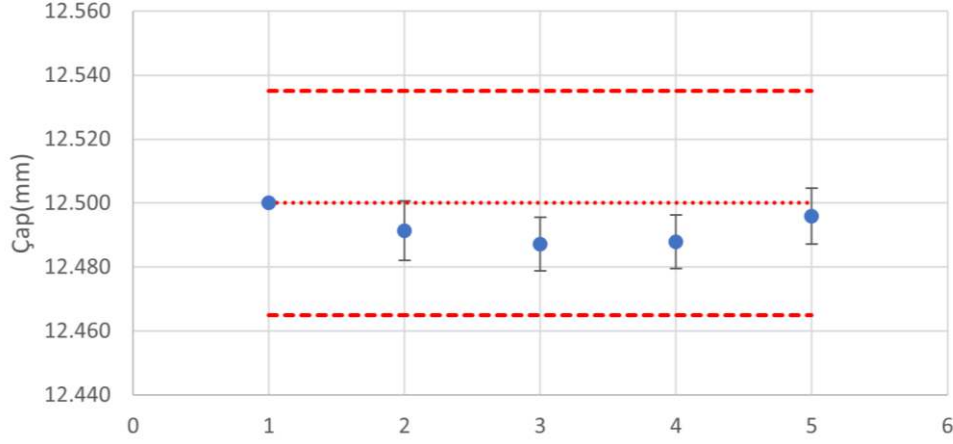
Yapılan ölçümlere ve analizlere göre kalibrasyon işleminin yapılabilmesi için verilerin 8'er atlanarak yapıldığında gerekli kalibrasyon değerinin bulunduğu gözlemlendi.

12,5 mm çapa sahip bir başka çubuğun 1881 adet görüntüsü alındı. 8'er atlayarak elde edilen kalibrasyon verisi ile 12,5 mm'lik çubuğun çap hesabı yapıldı. Yapılan ölçümlerin sonucu Tablo 4.1'de verildi.

Tablo 4.1. Orijinal ve 8'er piksel atlamalı örnekleme ile elde edilen kalibrasyon verilerine ait çap ölçüm sonuçları.

Kalibrasyon Verisi	Ortalama Çap Değeri (mm)	Standart Sapma (mm)	Minimum Çap Değeri (mm)	Maksimum Çap Değeri (mm)
Orijinal	12,491	$9,360 \times 10^{-3}$	12,461	12,514
8' er Atlama	12,493	$10,420 \times 10^{-3}$	12,464	12,519

Elde edilen sonuçlara göre ortalama 0,010 mm hata ile çap değeri hesaplanabilmiştir. Ayrıca 8'er atlayarak elde edilen kalibrasyon verisinin orijinal kalibrasyon verisi ile elde edilen sonuçların farklılık göstermediği görüldü. Hata oranının daha fazla düşürülebilmesi için saniyedeki kare/görüntü elde etme kapasitesi (fps) daha yüksek bir kamera ile görüntü alınması faydalı olabilir. Bu hatanın kızak sisteminden gelen titreşimden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Alınan kalibrasyon verileri ile çapı bilinmeyen bir çubuktan 30x60 mm² lik bir alanda çeşitli noktalarda alınan görüntüler için gerçek zamanlı çap tahmini yapan algoritma geliştirildi. Çubuk boyutlarını ölçmek için öncelikle kaliper ile 50 kere ölçüm alınmış ve 0,04 mm standar sapma ile çapın ölçülebildiği görülmüştür. Aynı nesne üzerinden farklı zamanlarda alınan ölçümlerle sistemin tekrarlanabilirliği değerlendirilmiştir (Şekil 4.4). Grafikte kırmızı kesikli çizgiler standart sapma değerini göstermekte olup mavi noktalar incelenen örneklerin hesaplanan çap değerlerini göstermektedir. Beş farklı zaman diliminde yapılan ölçümler sırasıyla 12,500 mm, 12,492 mm, 12,481 mm, 12,483 mm ve 12,496 mm olarak elde edilmiştir. Her ölçüm, ortalama çap değeri ile birlikte standart sapma içeren hata çubukları ile sunulmuştur. Şekilde kırmızı noktalı çizgi, hedef çap olan 12,500 mm'yi; kesikli kırmızı çizgiler ise ISO 9626:2016 [54] standardına göre belirlenen $\pm 0,02$ mm tolerans aralığını (12,480–12,520 mm) temsil etmektedir. Ölçüm sonuçlarının tamamı bu tolerans aralığında kalmış olup, sistemin zaman içinde tutarlı ve güvenilir ölçümler gerçekleştirdiğini göstermektedir.



Şekil 4.4. 12,5 mm çapındaki referans çubuk ile yapılan kalibrasyon sonucunda farklı gün ve zamanlarda (x eksen) elde edilen çap ölçüm değerleri ile bunlara ait standart hata çubukları. Kırmızı kesikli çizgiler, hedef çap değeri ve tolerans sınırlarını göstermektedir.

Tablo 4.2’de farklı örnekler için Kamera 1 ve Kamera 2’den okunan değerler görülmektedir. Ölçümdeki hassasiyet ve sonuçların güvenilirliğini artırmak için her iki kameradan alınan veriler de gerçek zamanlı çap ölçümünde önemli bilgiler içermektedir. Alınan çap değerleri birbirine yakın olup, bu değerlerin ortalaması alınarak hata minimuma indirgenmek istenmiştir. Örnek 6 ve 7’ye dair sonuçları incelersek daha küçük çaptaki bir cisimden çap ölçümü yapılırken Kamera 2’ nin standart sapma değeri daha küçük (örnek 6 için $7,52 \times 10^{-3}$ ve tutarlıdır. Maksimum performans ve doğruluk için ise konum belirlemede yalnızca Kamera 1 kullanıldı. Kamera 1 ve Kamera 2’nin farklı örnekler için farklı sonuçlar göstermesi, birden fazla ölçüm kaynağına sahip olmanın ne kadar önemli olduğunu gösterdi. Olabilecek sistematik hatalardan kurtulmak için her iki kameradan hesaplanan sonuçların ortalaması alındı. Bu işlem hassasiyeti artırarak ölçümlere olan güveni artırır. Kamera 1’ den elde edilen ölçüm sonuçları diğer kameraya göre daha fazla değişse de, konum tanımlaması aşırı hassasiyet gerektirmediği için yeterince tutarlıdır. Öte yandan Kamera 2 hata oranı düşük olması sebebi ile çap ölçümü için idealdir. Her iki kameradan gelen verileri birleştirmek hataları azaltır ve ölçüm doğruluğunu artırır. Bu da daha güvenilir ve tutarlı sonuçlar elde edilmesini sağlar.

Tablo 4.2. Kalibrasyonla birlikte bilinmeyen çapta çubuklarla ölçümden elde edilen çap değerleri

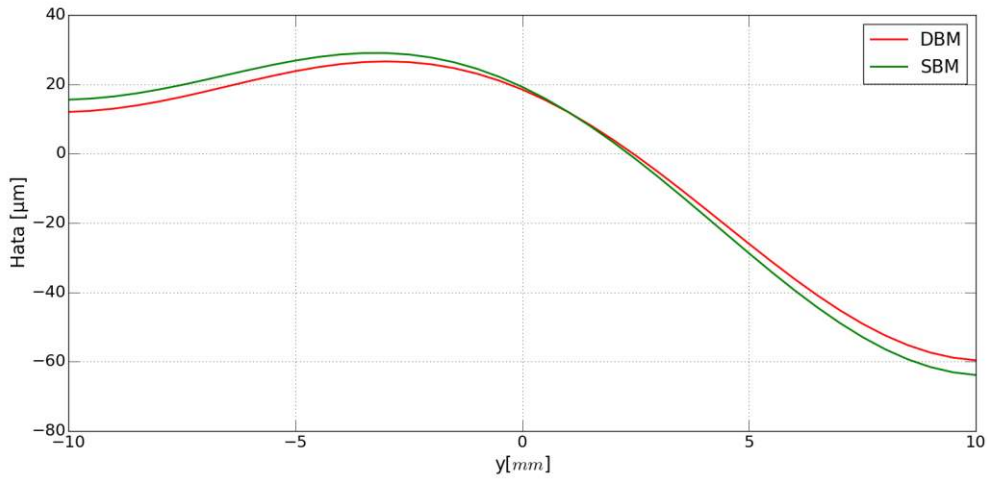
		Çap (mm)	Standart Sapma (mm)	Hesaplanan Minimum Çap Değeri (mm)	Hesaplanan Maksimum Çap Değeri (mm)
Örnek 1	Kamera 1	12,500	$1,48 \times 10^{-15}$	12,500	12,500
	Kamera 2	12,500	$1,44 \times 10^{-15}$	12,500	12,500
	Ortalama	12,500	$1,24 \times 10^{-15}$	12,500	12,500
Örnek 2	Kamera 1	12,512	$1,29 \times 10^{-2}$	12,480	12,547
	Kamera 2	12,471	$1,41 \times 10^{-2}$	12,430	12,506
	Ortalama	12,491	$9,36 \times 10^{-3}$	12,461	12,514
Örnek 3	Kamera 1	12,507	$1,11 \times 10^{-2}$	12,478	12,541
	Kamera 2	12,468	$1,34 \times 10^{-2}$	12,427	12,501
	Ortalama	12,487	$8,40 \times 10^{-3}$	12,465	12,506
Örnek 4	Kamera 1	12,511	$1,30 \times 10^{-2}$	12,482	12,551
	Kamera 2	12,465	$1,49 \times 10^{-2}$	12,421	12,502
	Ortalama	12,488	$8,38 \times 10^{-3}$	12,463	12,510
Örnek 5	Kamera 1	12,507	$1,31 \times 10^{-2}$	12,482	12,539
	Kamera 2	12,485	$1,23 \times 10^{-2}$	12,446	12,508
	Ortalama	12,496	$8,79 \times 10^{-3}$	12,475	12,513
Örnek 6	Kamera 1	7,564	$2,82 \times 10^{-2}$	7,514	7,657
	Kamera 2	7,526	$7,52 \times 10^{-3}$	7,509	7,555
	Ortalama	7,545	$1,65 \times 10^{-2}$	7,511	7,593
Örnek 7	Kamera 1	7,500	$1,01 \times 10^{-2}$	7,484	7,532
	Kamera 2	7,503	$1,86 \times 10^{-2}$	7,465	7,535
	Ortalama	7,501	$8,67 \times 10^{-3}$	7,482	7,518

4.2. Telesentrik Gölge Görüntüleme Sistemi

Bu bölümde, geliştirilen telesentrik gölge görüntüleme sisteminin çap ölçüm performansının değerlendirilmesine yönelik elde edilen deneysel bulgular sunulmaktadır. Ölçüm sisteminin doğruluğu, tekrarlanabilirliği ve pozisyona duyarlılığı gibi temel metrikler çeşitli test senaryolarıyla analiz edilmiştir. Deneysel çalışmaların detayları Bölüm 3.3.3'te açıklanan yöntem doğrultusunda gerçekleştirildi. Önerilen sistemi değerlendirmek için, uzunlukları boyunca çaplarında $\pm 0,01$ mm sapma bulunan 6 mm ve 20 mm çaplarında ISO 17025 sertifikalı iki çubuk kullanılmıştır. Bu çubuklar, Şekil 3.28'de sunulan deney düzeneğine entegre edilerek, x ve y doğrultularında kontrollü şekilde hareket ettirilmiş ve farklı konumlarda iken elde edilen görüntüler analiz edildi.

Üretim hattında gerçek zamanlı analiz yaparken titreşimden kaynaklı olarak alınan görüntülerde açısal sapmalar olabileceği 3.2 bölümünde bahsedilmişti. Dijital görüntüler için

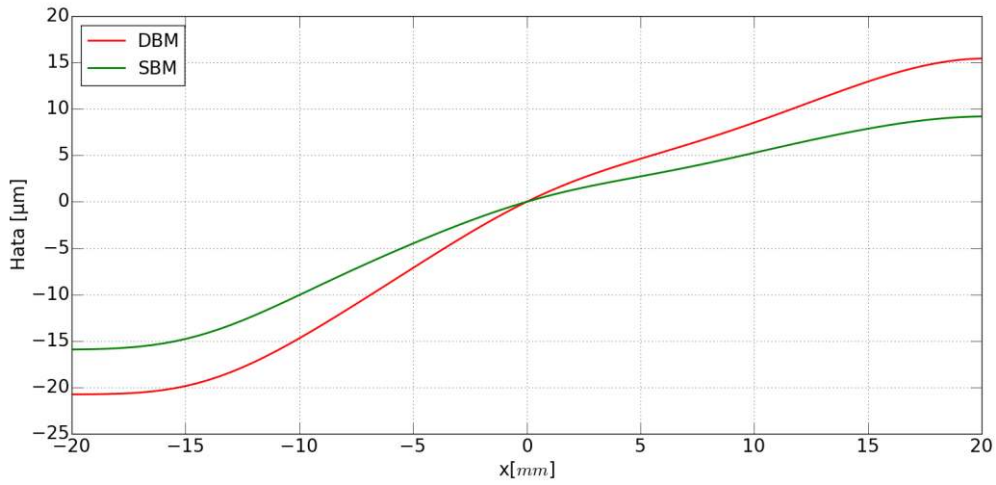
analiz yapılmış ve sonrasında uygun metoda karar verilmişti. Burada ise 6 mm çubuk ile gerçek zamanlı alınan görüntüler üzerinde analiz yapıldı (Şekil 4.5, Şekil 4.6). Bu analiz, telesentrik gölge görüntüleme sistemi ile elde edilen çap ölçümlerinin, görüntü alanının farklı y konumlarında nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi, her iki yöntem de y eksenini boyunca benzer eğilimde bir hata profili sunmaktadır. Ancak detaylı incelendiğinde, SBM yöntemi özellikle negatif y değerlerinde (-10 mm ile 0 mm arası) daha düşük hata değerleri üretmektedir. Bu, SBM'nin kenar bölgelerde daha stabil bir ölçüm performansı sunduğunu göstermektedir. Diğer yandan, DBM yöntemi, bazı bölgelerde daha belirgin sapmalar sergilemekte, bu da özellikle gradyan bazlı algılamanın ışık yoğunluğu değişimlerinden daha fazla etkilenebileceğini düşündürmektedir. Pozitif y konumlarında ise (0 mm'den itibaren) her iki yöntem de benzer düzeyde hata üretmekte olup, her iki algoritma da merkez bölgeye yakın alanlarda yüksek doğrulukta ölçüm yapabilmektedir. Bu durum, sistemin optik eksen merkezine yakın bölgelerde daha tutarlı çalıştığını, optik hizalamanın kenarlara doğru olan etkisinin ise kısmen yöntem bağımlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.5. Gerçek zamanlı analizde, 6 mm çaplı çubuk için x eksenini boyunca farklı y konumlarında ölçülen çap hatalarının ortalama dağılımı

Şekil 4.6'da, görüntü alanı boyunca x eksenini üzerindeki farklı konumlardan elde edilen çap ölçüm hatalarının, y boyunca ortalama alınmış dağılımı verilmiştir. Her iki yöntem (DBM ve SBM) genel olarak doğrusal bir hata eğilimi sergilemektedir. $x = -20$ mm konumunda her iki yöntemde negatif sapmalar gözlenirken, $x > 0$ mm bölgelerinde pozitif sapmalar artmaktadır. Bu durum, sistemde optik eksene göre bir asimetri veya hizalama hatası olabileceğini göstermektedir. SBM yöntemi, tüm x konumları boyunca daha düşük hata seviyeleri sunmakta, özellikle negatif x konumlarında yaklaşık 3–5 mikrometre daha

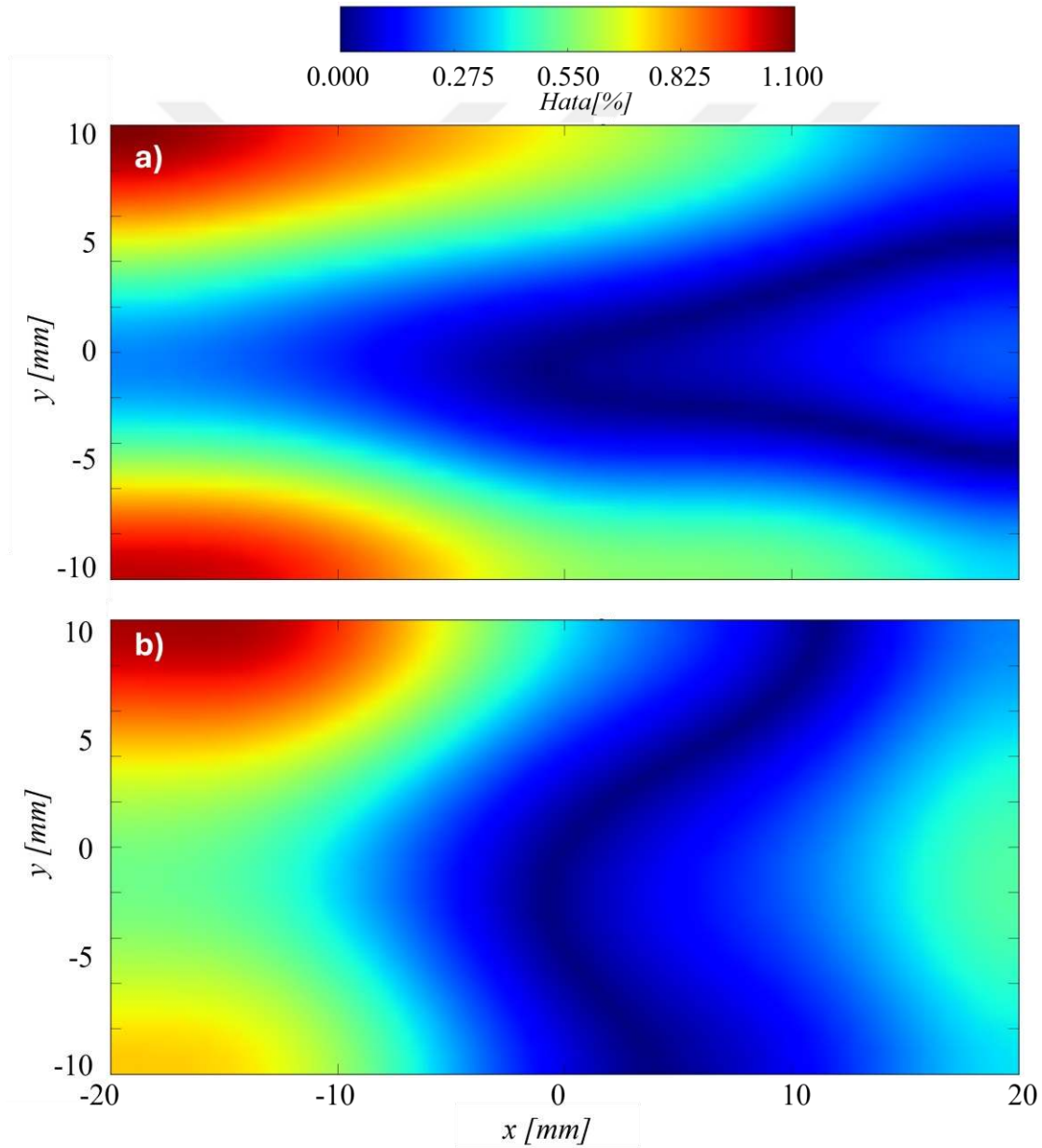
düşük sapma ile daha kararlı bir performans sergilemektedir. DBM yöntemi ise daha büyük varyasyonlara sahiptir ve özellikle $x > 10$ mm bölgesinde hata artışı daha belirgindir. Bu sonuçlar, SBM'nin ışık yoğunluğu gradyanlarından daha az etkilenecek ölçüm doğruluğunu koruduğunu; DBM'nin ise özellikle görüntü alanının uç noktalarında daha hassas olduğunu göstermektedir. Her iki yöntemin de ortalama sapmaları ± 20 μm aralığında kalmakta olup, bu da sistemin x konumundaki değişimlere karşı genel olarak kararlı ve güvenilir ölçümler sunduğunu göstermektedir.



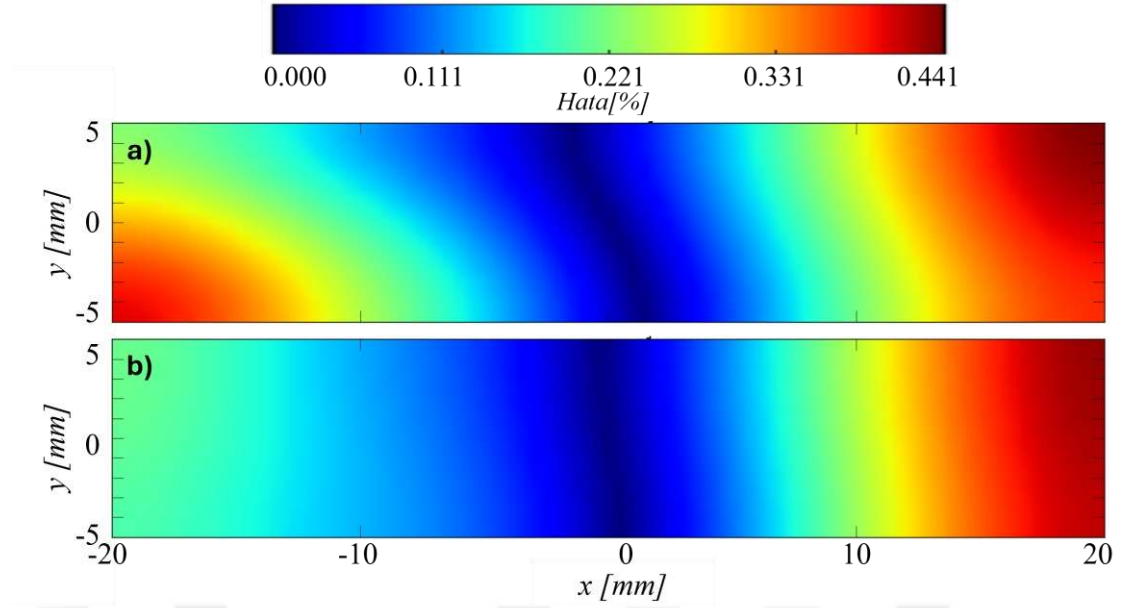
Şekil 4.6. Gerçek zamanlı analizde, 6 mm çaplı çubuk için farklı y konumlarında ölçüm hatalarının standart sapma dağılımı

Açı ve ROI parametrelerinin yanı sıra, bu çalışmada ele alınan bir diğer önemli konu, nesnenin görüntü merkezinden uzaklaştıkça çap ölçümünde ortaya çıkabilecek sapmaların analiz edilmesi ve uygun bir kalibrasyon stratejisinin geliştirilmesidir. Bu amaçla, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de, sırasıyla 6 mm ve 20 mm nominal çapa sahip çubuklar için, DBM ve SBM yöntemleri kullanılarak hesaplanan mutlak çap ölçüm hataları renk haritaları şeklinde sunuldu. Bu renk haritalarında, her piksel konumu için sistem tarafından ölçülen çap ile referans çap arasındaki fark mutlak değer olarak hesaplanmış ve ölçüm alanındaki dağılım görselleştirildi. Şekil 4.7(a-b)'de görüldüğü üzere, 6 mm çaplı çubuk için DBM yöntemi ortalama %0,37 oranında çap ölçüm hatası üretirken, SBM yöntemi bu değeri %0,35'e düşürerek daha düşük hata ile ölçüm gerçekleştirdi. Her iki yöntemde de ölçüm hatasının sistemin merkezine yakın bölgelerde minimum, kenar bölgelerde ise maksimum seviyeye ulaştığı gözlemlendi. Bu durum, sistemde optik eksenden uzaklaştıkça ışık açısı, odaklama kalitesi ve kenar belirginliğinde oluşan değişimlerin ölçüm doğruluğunu etkilediğini göstermektedir. Benzer bir eğilim, daha büyük çapa sahip 20 mm'lik çubuk için yapılan

analizlerde de gözlemlendi (Şekil 4.8(a-b)). Bu durumda DBM yöntemi ortalama %0,20 hata üretirken, SBM yöntemi %0,18 ile daha düşük bir hata değeri elde etti. Ayrıca, büyük çaplı çubukta hata yüzdelерinin genel olarak daha düşük olduğu ve sistemin farklı bölgelerinde daha homojen dağıldığı dikkat çekmektedir. Bu sonuç, büyük çaplı nesnelerde sistemin daha kararlı ve merkezden uzak bölgelerde dahi daha tutarlı ölçümler sunduğunu göstermektedir. Genel olarak her iki çubuk boyutu için de SBM yöntemi, DBM'ye kıyasla daha düşük mutlak hata yüzdesiyle sonuç vererek, özellikle kenar bölgelerde daha stabil bir performans sergiledi. Bu da SBM algoritmasının, ışık gradyanlarından daha az etkilenecek çap ölçümünde daha yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir.



Şekil 4.7. 6 mm nominal çapa sahip bir çubuğun 20 mm × 40 mm'lik ölçüm alanlarındaki a) DBM yöntemi ile b) SBM yöntemi ile elde edilen mutlak hatanın yüzdesi



Şekil 4.8. 20 mm nominal çapa sahip bir çubuğun 10 mm × 40 mm'lik ölçüm alanlarındaki a) DBM yöntemi ile b) SBM yöntemi ile elde edilen mutlak hatanın yüzdesi

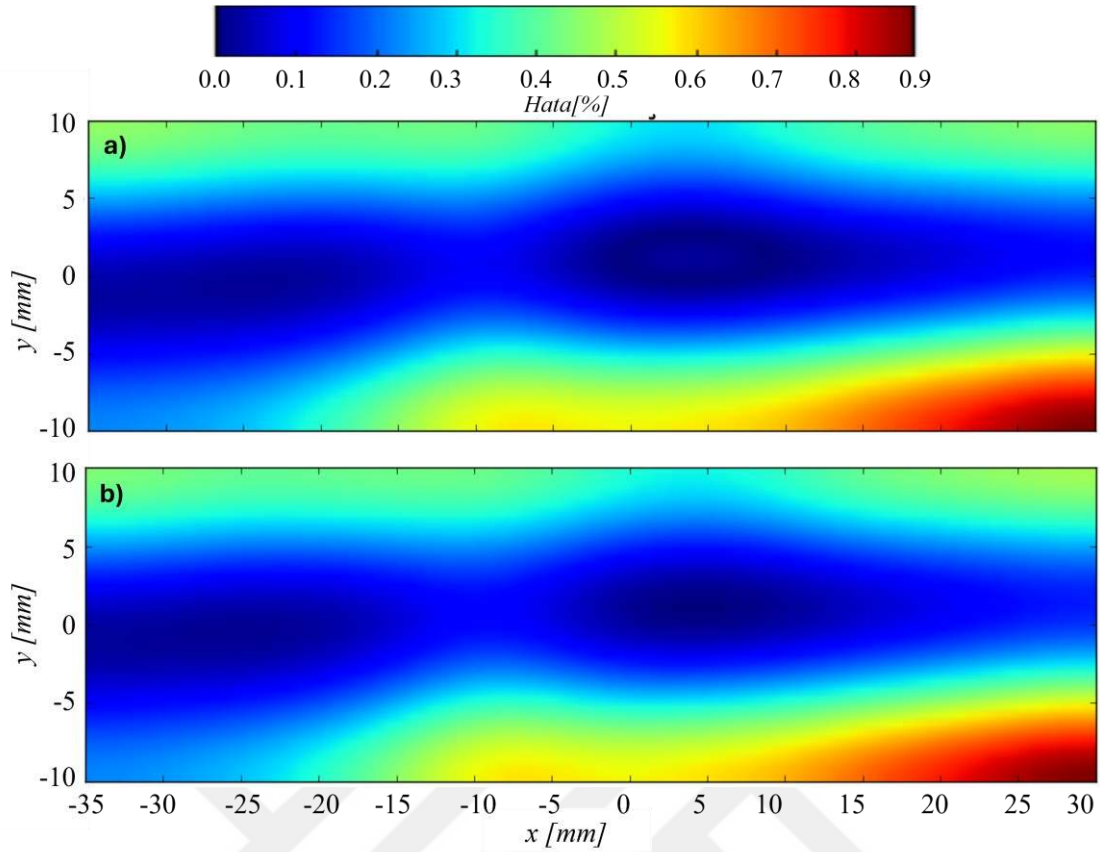
4.3. Telesentrik Görüntüleme Sistemi

Bu bölümde, geliştirilen telesentrik gölge görüntüleme sisteminin endüstriyel vida ve referans çubuk örnekleri üzerindeki çap ölçüm performansı değerlendirildi. Amaç, sistemin hem düz yüzeyli referans cisimler hem de dişli yapıya sahip endüstriyel elemanlar üzerindeki doğruluğunu, tekrarlanabilirliğini ve uygulama potansiyelini ortaya koydu. Farklı nominal çaplara sahip örnekler kullanılarak yapılan ölçümler, kaliper ile elde edilen referans değerlerle karşılaştırıldı. Deneysel uygulamalar, Bölüm 3.3.4'te açıklanan yöntem doğrultusunda gerçekleştirildi.

Ölçüm doğruluğunu etkileyebilecek sistematik hataların giderilmesi amacıyla kalibrasyon işlemleri kritik bir rol oynar. Özellikle geniş görüş alanlarında, görüntü sensörünün farklı bölgelerine düşen görüntülerde ortaya çıkabilecek geometrik sapmaların düzeltilmesi için dikkatli bir kalibrasyon gereklidir. Kamera sensörünün yerleşiminden veya sensörün kendisinden kaynaklanan çeşitli sebepler nedeniyle elde edilen görüntüde bozulmalar meydana gelebilir. CMOS sensörler görüntüyü satır satır kaydeder, buna dönen satır taramalı perde (Rolling Shutter) etkisi denir [75]. Bu etki, özellikle hareketli nesnelerle görüntü yakalarken görüntüde bozulmalara neden olabilir. Bozulma, sensörün satır satır okuma yapması nedeniyle oluşur ve dikey çizgilerin eğrilmesi veya yamulması şeklinde kendini gösterir. Bu tür bozulmaları düzeltmek için derin öğrenme algoritmaları kullanılabilir [76]. Literatürde bu amaçla genellikle evrimsel sinir ağları (Convolutional

Neural Networks, CNN) ve özellikle U-Net tabanlı mimariler tercih edilmektedir. Bu tür ağlar, bozulmuş görüntülerdeki satır tabanlı deformasyonları öğrenerek, görüntüleri satır bütünlüğünü koruyacak şekilde yeniden yapılandırabilir. Derin öğrenme tabanlı yöntemler, bozulmuş görüntüleri analiz ederek rulo deklanşör etkilerini tespit eder ve bu bozulmaları düzeltmek için eğitilmiş modeller kullanır. Derin öğrenme tabanlı yöntemler, bozulmuş görüntüleri analiz ederek rulo deklanşör etkilerini tespit eder ve bu bozulmaları düzeltmek için algoritmalar geliştirir. Sinir ağları, bozulmuş görüntülerden elde edilen verileri kullanarak bozulma modellerini öğrenir ve ardından bu bozulmaları giderir. Bu yöntemler, özellikle video karelerinde rulo deklanşör etkisini azaltmak için etkili olabilir. Derin öğrenme algoritmalarının yanı sıra kalibrasyon yapılarak da ilgili ölçümde doğruluk artırılmaktadır [77].

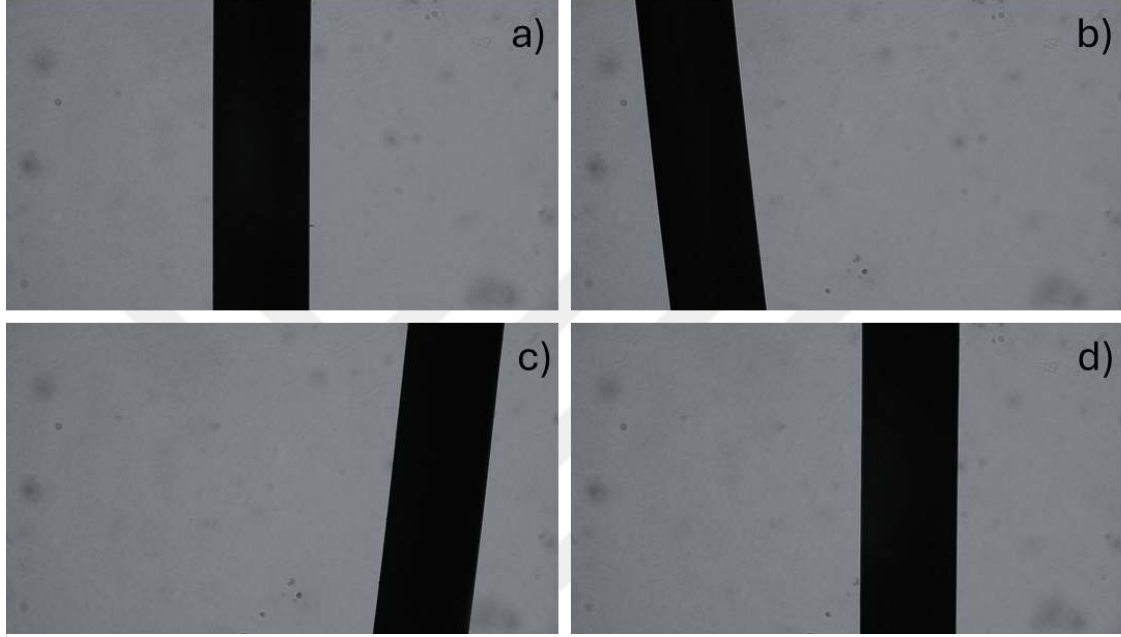
Sensöre bağlı olarak görüntü alanının farklı bölgelerinde oluşabilecek ölçüm sapmalarını tespit etmek amacıyla bir ön analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, nominal çapı 8 mm olan düz bir referans çubuğun farklı konumlarda elde edilen görüntüleri kullanılmış ve sensör düzlemindeki çeşitli noktalara karşılık gelen ölçüm hataları hesaplanmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda, çap ölçümlerinde konuma bağlı oluşan sapmalar görselleştirilmiş ve sensörün alan bağımlı sistematik hataları analiz edilmiştir. Şekil 4.9’da sunulan renk haritası, DBM yöntemiyle hesaplanan yüzde hata dağılımını göstermektedir. Görüldüğü üzere, sensör merkezine yakın bölgelerde hata minimum seviyedeysen, özellikle köşe ve kenar bölgelerde hata oranları artış göstermektedir. Bu durum, sistemin geometrik hizalanma, optik merkez sapmaları veya ışık dağılımı gibi faktörlere bağlı olarak alansal duyarlılığının değişebileceğini ortaya koymaktadır. Bu analiz, ileride uygulanacak kalibrasyon işlemleri için referans teşkil etmektedir.



Şekil 4.9. a) DBM, b) SBM yöntemiyle elde edilen kalibrasyon verisine ait yüzde hata dağılımını gösteren renk haritası.

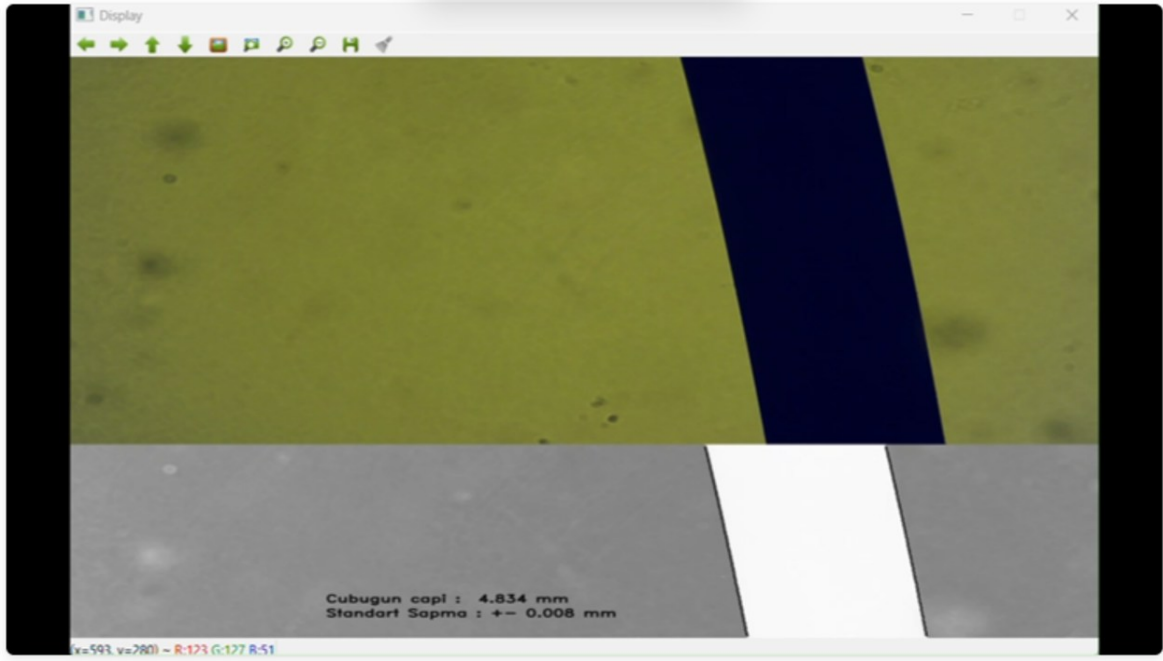
Farklı boyutlardaki çubuklardan görüntü alınarak aynı ölçüm işlemi tekrar edildi. Ölçüm sırasında çubuğun sistem içerisine belirli bir referans noktasına göre konumlandırılması zorunlu değildir; bu durum, sistemin esnekliğini artırmakta ve farklı parçaların hızlı bir şekilde ölçümüne olanak tanımaktadır. Şekil 4.10'da çubuğun farklı açılarda ve konumlarda alınan görüntüleri sunuldu. Yapılan dört farklı ölçümde çap değerleri sırasıyla 4,84 mm, 4,82 mm, 4,86 mm ve 4,83 mm olarak hesaplandı. Bu değerler, nominal çap etrafında $\pm 0,02$ mm sapma aralığında değişmekte olup, genel kabul gören ± 0.05 mm'lik tolerans sınırının oldukça altında kalmaktadır. Elde edilen sonuçlar, sistemin ölçüm doğruluğu açısından yüksek bir tutarlılık sağladığını gösterdi. Gerçekleştirilen deneysel uygulamalar, sistemin hem referans çubuklar hem de dişli yapıya sahip endüstriyel vidalar üzerindeki çap ölçümlerinde yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik sunduğunu gösterdi. Farklı yönelimlerde alınan ölçümler, sistemin yalnızca sabit konumda değil, değişken pozisyonlarda da güvenilir ölçüm yapabildiğini ortaya koydu. Benzer şekilde, farklı nominal dış çapa sahip vidalar üzerinde yapılan 10 tekrarlı ölçümler sonucunda, her bir vida için düşük standart sapma değerleri elde edildi. Minimum ve maksimum dış çaplar arasındaki

fark genellikle 0.04 mm'den az olup, bu durum sistemin tekrarlanabilirliği açısından yüksek bir tutarlılık sağladığını gösterdi. Bu sonuçlar, sistemin endüstriyel üretim hatlarında, özellikle parçaların geometrik boyutlarının kontrolünde, yeterli hassasiyette ölçüm yapabildiğini ortaya koymaktadır. Ancak havacılık ve savunma sanayii gibi ultra hassasiyet gerektiren uygulamalarda, sistemin ölçüm sınırlarının yeterliliği daha ileri düzeyde kalibrasyon teknikleri, yüksek çözünürlüklü optik bileşenler veya görüntü işleme algoritmalarındaki optimizasyonlarla desteklenmelidir.



Şekil 4.10. (a–d) Referans çubuğunun sistem görüş alanı içerisinde farklı konum ve açılarda elde edilen gölge görüntüleri.

Şekil 4.11’de, geliştirilen telesentrik görüntüleme sistemine entegre edilen yazılımın kullanıcı arayüzü ve ölçüm çıktısı örneklenmiştir. Görselde, çapı yaklaşık 4.83 mm olan referans çubuğun ölçüm sonucu ve hesaplanan standart sapma (± 0.008 mm) görüntülenmektedir. Bu sonuç, sistemin mikrometre düzeyinde hassasiyetle gerçek zamanlı çap ölçümü yapabildiğini göstermektedir. Yazılım, görüntü işleme algoritmaları ile alt piksel düzeyinde kenar tespiti yaparak, sistem doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini optimize etmektedir. Bu arayüz, hem kullanıcıya anlık ölçüm verisi sunmakta hem de kalibrasyon sonrası sistem güvenilirliğini görsel olarak doğrulama imkânı tanımaktadır.



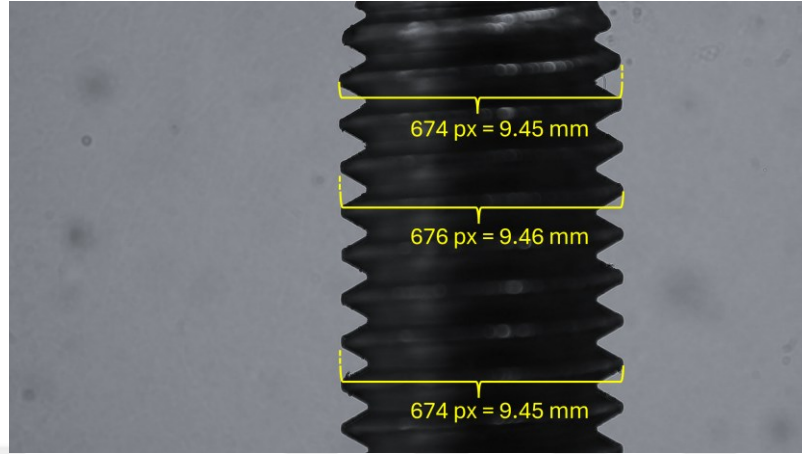
Şekil 4.11. Telesentrik görüntüleme sistemiyle ölçülen referans çubuğa ait yazılım ekran çıktısı (ölçülen çap: 4.834 mm, standart sapma: ± 0.008 mm)

Geliştirilen sistemi çubukların yanı sıra vidalarda çap ölçümünde kullanılabilirliğini test etmek amacı ile gerçek zamanlı vida dış ve iç çapını ölçmek için algoritma geliştirildi. Tıbbi vidalar, kemik kırığı sabitleme, spinal füzyon ve eklem değiştirme gibi çeşitli ortopedik ve cerrahi prosedürlerde kullanılır. Tıbbi vidanın iç çapı, vidanın merkezi veya şaftının çapıdır. İç çapın doğru ölçülmesi, vidanın gerekli dış boyutu ve adımını karşılayabilmesi için zorunludur. İç çapı çok küçük olan bir vida, yeterli dış tutuşunu sağlayamayarak vidanın stabilitesini azaltır ve hatta vidanın kırılmasına neden olabilir.

Diğer yandan, tıbbi vidanın dış çapı, dişler ile birlikte vidanın dış yüzeyinin çapıdır. Dış çapın ölçülmesi, vidanın kemik veya dokuya düzgün bir şekilde yerleştirilmesi ve güvenli bir şekilde yerinde kalması için kritik bir adımdır. Dış çapı çok büyük olan bir vida, doku hasarına veya sıkışmaya (impingement) neden olabilir, bu da komplikasyonlara ve uzamış iyileşme sürelerine yol açar.

Tıbbi vidaların iç ve dış çaplarının doğru ölçülmesi, hasta güvenliği ve etkili tedavi sağlanabilmesi için gereklidir. Yanlış ölçümler vida kırılmasına, stabilitesinin azalmasına, doku hasarına, enfeksiyon riskinin artmasına ve uzamış iyileşme sürelerine yol açabilir. Şekil 4.12’de, nominal çapı 10 mm olan bir vidaya ait ölçüm sonuçları sunulmaktadır. Kaliper ile yapılan 10 tekrarlı manuel ölçüm sonucunda ortalama çap değeri 9,49 mm olarak belirlenmiş, ölçümler $\pm 0,02$ mm sapma aralığında (min: 9,47 mm, max: 9,51 mm) değişiklik göstermiştir. Geliştirilen sistemle piksel sayıları üzerinden yapılan hesaplamalar, bu kaliper

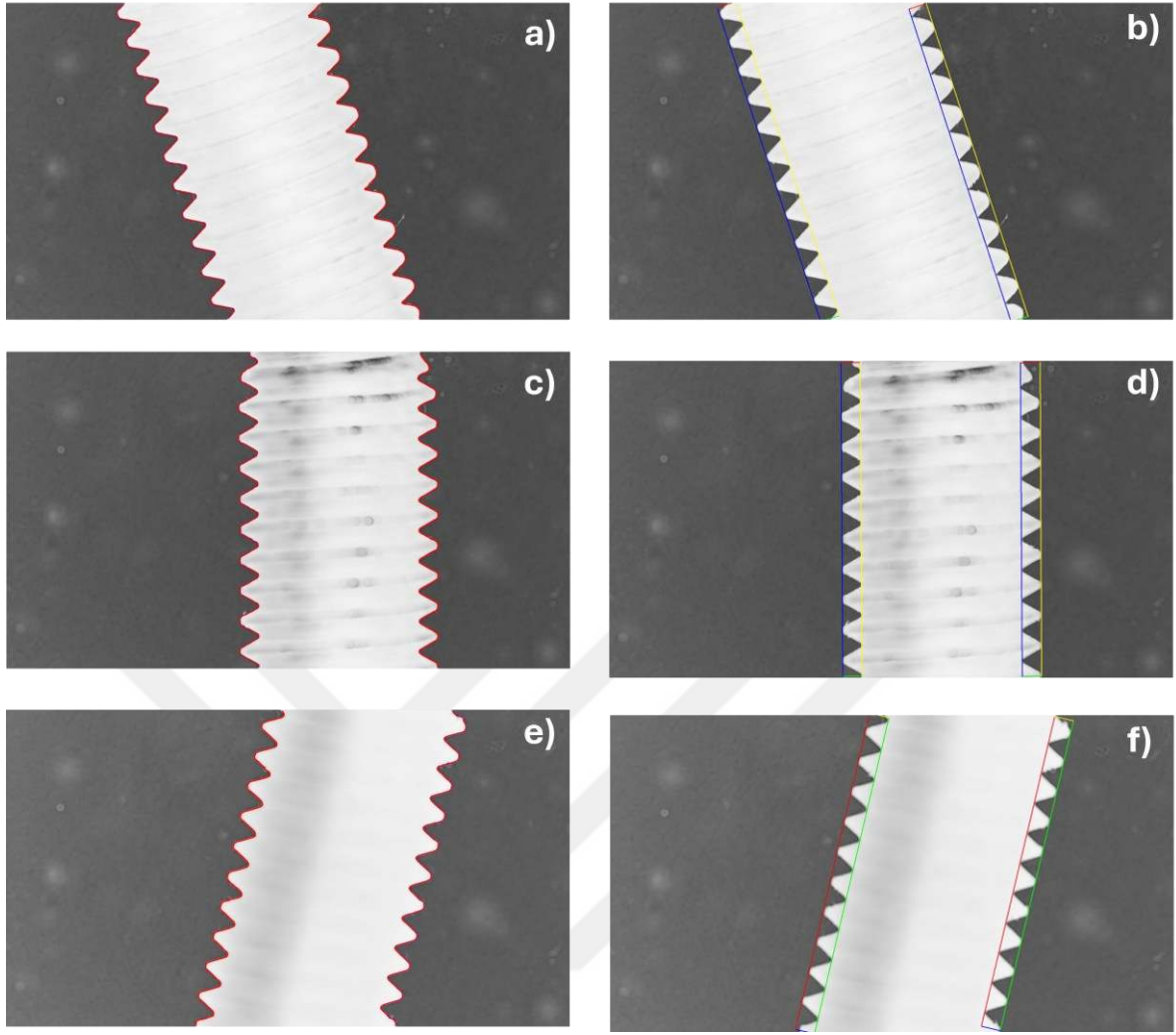
ölçümleri ile yüksek düzeyde uyum gösterdi. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen sistemin karmaşık geometrili endüstriyel bileşenlerde yüksek doğrulukla ölçüm yapabildiğini gösterdi.



Şekil 4.12. Geliştirilen sistem ile 10 mm nominal çapa sahip endüstriyel vidanın çap ölçüm sonuçları.

Vidanın iç ve dış çapını ölçebilmek için öncelikle dişlerin bulunduğu konum tespit edilerek, diş profiline bir dikdörtgen uyumlaması (fit etme işlemi) uygulandı. Bu işlemde, vida dişlerinin uç noktalarına temas edecek şekilde, en dış ve en iç sınırları temsil eden bir dikdörtgen şekil modellendi. Bu yöntem sayesinde dış çap, dikdörtgenin genişliğinden; iç çap ise diş boşluklarına denk gelen kısmın ölçümünden elde edildi. Şekil 4.13’de farklı açılarda alınan vida görüntüleri gösterildi.

Tablo 4.3’te, Şekil 4.13’de sunulan vida görüntülerinden farklı açılarda (72°, 90°, 104°) yapılan ölçümler sonucunda elde edilen iç ve dış çap değerleri sunuldu. Vida dişlerinin sınırları belirlendikten sonra her bir görüntüye dikdörtgen uyumlaması yapıldı ve çap değerleri hesaplandı. 72° açıyla elde edilen görüntüde dış çap 9,85 mm, iç çap 7,92 mm olarak belirlendi. 90° açıyla yapılan ölçümde dış çap 9,98 mm, iç çap 8,03 mm’ye ulaştı. 104° açıda ise dış çap 9,69 mm, iç çap 8,18 mm olarak ölçüldü. Elde edilen bu üç ölçüm, dış çapta 0,29 mm, iç çapta ise 0,26 mm’lik bir varyasyon gösterdi. Bu değişim aralığı, görüntüleme açısının ölçümler üzerinde sınırlı bir etkisi olduğunu ve sistemin yüksek düzeyde tekrarlanabilirlik sunduğunu ortaya koydu. İç çap değerlerinde gözlenen sapmaların, vida dişlerinin yapısından ve vida ekseninin görüntü düzlemine göre konumundan kaynaklandığı değerlendirildi. Buna rağmen, tüm ölçüm değerlerinin medikal vida üretiminde kabul edilen toleranslar içinde kaldığı tespit edildi. Bu sonuçlar, sistemin yönelim değişimlerine karşı duyarlılığının düşük olduğunu ve farklı açılardan alınan görüntülerle dahi güvenilir çap ölçümleri yapılabildiğini gösterdi.



Şekil 4.13. (a,c,e) Telesentrik görüntüleme sistemi ile elde edilen vida görüntülerinde, farklı açılarda (72°, 90°, 104°) vida dişlerinin tespiti. (b,d,f) Diş profillerine dikdörtgen uyumlaması uygulanarak elde edilen iç ve dış çap tespiti sonuçları.

Tablo 4.3. Şekil 4.13'teki farklı açı konfigürasyonlarına göre elde edilen vida görüntülerinden ölçülen iç ve dış çap değerleri.

	Açı	Dış çap (mm)	İç çap (mm)
a	72°	9,85	7,92
b	90°	9,98	8,03
c	104°	9,69	8,18

Farklı nominal dış çapa sahip vidalarla yapılan deneysel çalışmalarda, sistemin ölçüm doğruluğu ve tekrarlanabilirliği değerlendirilmiştir. Her bir vida için 10 tekrar ölçüm yapılmış ve dış çap ile diş yüksekliği analiz edilmiştir. Elde edilen dış çap sonuçları sırasıyla $3,908 \pm 0,021$ mm (4 mm vida), $4,927 \pm 0,027$ mm (5 mm vida), $7,813 \pm 0,054$ mm (8 mm vida) ve $9,893 \pm 0,039$ mm (10 mm vida) olarak belirlenmiştir. Diş yüksekliği ölçümleri ise $0,403 \pm 0,010$ mm ile $0,937 \pm 0,012$ mm arasında değişmektedir. Bu veriler, sistemin genel

endüstriyel üretim süreçlerinde karşılaşılan tolerans aralıkları içinde güvenilir ve tekrarlanabilir ölçümler yapabildiğini gösterdi. Özellikle otomotiv, makine imalatı ve medikal cihazlar gibi alanlarda bu doğruluk seviyesi uygulama açısından yeterlidir. Ancak havacılık ve uzay sanayisinde kullanılan özel bağlantı elemanlarında dış çap toleransları genellikle ± 0.02 mm'nin altında tutulmaktadır. Bu bağlamda, geliştirilen sistemin ölçüm doğruluğu bu hassasiyet düzeyinin sınırında veya biraz üzerinde kalmaktadır. Dolayısıyla sistemin, yüksek hassasiyet gerektiren bu tür uygulamalarda doğrudan kullanımı için daha ileri seviye kalibrasyon, yüksek çözünürlüklü optik bileşenler veya görüntü işleme algoritmalarında optimizasyon yapılması gereklidir.



5. TARTIŞMA

Bu bölümde, geliştirilen dört optik sistemin endüstriyel çap ölçümündeki avantajları ve sınırlılıkları, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılarak tartışıldı. Üretim süreçlerinde kalite kontrolün, özellikle metal çubuklar ve şaftlar gibi hareket halindeki silindirik nesnelerin doğru çap ölçümüne dayandığı görüldü. Geleneksel temaslı ölçüm tekniklerinin ve statik sistemlerin, hareketli ya da dönen parçaların gerçek zamanlı izlenmesinde yetersiz kaldığı belirlendi. Bu doğrultuda, bu tez kapsamında dört farklı optik sistem tasarlandı ve hareketli, yönelimi değişken silindirik cisimlerin çapları temassız ve yüksek hassasiyetle ölçüldü. Geliştirilen sistemler, literatürde yaygın olarak kullanılan üç temel optik yöntemle karşılaştırılarak performans açısından değerlendirildi. Son yirmi yılda, dinamik çapın ölçümü için üç önemli temassız optik teknoloji ortaya çıkmıştır:

1. Telesentrik görüntüleme sistemleri, gerçek boyutlu silüetleri yakalamak için telesentrik lensler ve aydınlatma kullanır.
2. Gölge görüntüleme teknikleri, nesnelerin gölgelerini yakalamak için telesentrik olmayan veya potansiyel olarak lenssiz yöntemlerin kullanımını içerir.
3. Lazer üçgenleme teknikleri, çapı tahmin etmek için lazerleri ve kamera geometrisini kullanır.

Bu yöntemlerden her biri farklı avantaj ve sınırlamalara sahiptir: lazer üçgenleme hızlı ve doğrudan ölçüm sağlarken, telesentrik görüntüleme sistemleri yüksek doğruluk sunar, gölge görüntüleme yöntemleri ise yapısal olarak daha sade ve düşük maliyetlidir. Bu çalışmada uzamsal yönelimlerinden bağımsız olarak doğrusal olmayan hareket sergileyen yuvarlak nesnelerin çapının hassas ölçümü için yeni bir optik sistemler tasarlandı ve görüntü işleme yöntemleri ile nesnenin sınırları tespit edilerek çap hesabı yapıldı. Dört adet farklı sistem geliştirilmiş olup, önerilen sistemler, ölçülmekte olan nesnenin konumuna doğal olarak duyarlı olan geleneksel yöntemlerinin üstesinden geldiği için mevcut yaklaşımlara göre önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Hem donanım hem de yazılım bileşenlerinin entegrasyonu sayesinde optik sistemimiz, çok çeşitli endüstriyel ve bilimsel uygulamalar için umut verici bir çözüm sunarak yüksek derecede hassasiyet ve güvenilirlik elde eder.

Üç yöntem arasında lazer üçgenleme, gerçek zamanlı ölçümler için doğal olarak en iyisidir. Aktif lazer sistemleri hareket eden nesneleri tarayabilir veya üzerlerine yansıtabilir ve anında geometri toplayabilir. Örneğin, Demeyere'nin üçgenleme sistemi [17] hareketli bir

ortam için tasarlanmıştır (yani, hareket halindeyken nesneleri ölçmek). Üçgenleme, nesnenin durmasını gerektirmez; kamera lazer yansımaları veya çizgisini algılayabildiği sürece çap anında hesaplanabilir. Öte yandan, telesentrik ve gölge görüntüleme sistemleri tarihsel olarak yarı statik yapılandırmalarda kullanılmıştır.

Tablo 5.1, son yirmi yılda geliştirilen dinamik ve temassız optik çap ölçüm sistemlerini; kullanılan aydınlatma türü, optik teknik, çözünürlük, ölçüm aralığı, hassasiyet, maliyet ve uygulama alanı gibi temel parametreler üzerinden sistematik biçimde karşılaştırmaktadır. Literatürdeki bu sistemler incelendiğinde, her bir yaklaşımın belirli bir uygulama ihtiyacına hitap ettiği ve belirli yönlerden sınırlılık taşıdığı görülmektedir. Radil vd. [47] tarafından geliştirilen lenssiz gölge görüntüleme sistemi, basit donanım yapısı ve düşük maliyeti ile öne çıkmasına rağmen yalnızca çok küçük çaplı nesneler (0.3 mm) için tasarlanmıştır ve sensörle sınırlı bir ölçüm aralığına sahiptir. Bu yönüyle, yalnızca laboratuvar koşullarında mikrometre altı fiber ölçümleri için uygun bir yapı sunmaktadır. Demeyere vd. [17] ise lazer üçgenleme yöntemi ile hareketli parçaların ölçümünü sağlamış, ancak bu sistemin hassasiyeti çapın %1'i mertebesinde dir. Ayrıca lazer ve kamera senkronizasyonu gerektiren daha karmaşık bir yapıya ve orta düzeyde bir maliyete sahiptir. Sun vd. [1] ve Hao vd. [16] tarafından sunulan sistemler, klasik görüntüleme yaklaşımlarını alt piksel kenar tespiti ve çift mesafe düzeltmeleri ile geliştirerek endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir hassasiyet düzeylerine ulaşmıştır. Ancak her iki sistemde de kalibrasyon süreci karmaşık olup, ölçüm düzlemi sabitlenmediğinde sistematik hata riski oluşmaktadır. Chen vd. [78] ve Dvoinishnikov vd. [27], telesentrik görüntüleme sistemleriyle yüksek doğrulukta ölçümler elde etmişlerdir. Özellikle Dvoinishnikov'un çalışması, 0,24 μm gibi oldukça düşük standart sapma ile dikkat çekmektedir. Ancak telesentrik lens kullanımı, hem maliyet hem de görüş alanı sınırlamaları nedeniyle endüstriyel üretim hatlarında entegrasyonu zorlaştırmaktadır.

Kalibrasyon, sensör okumalarını gerçek boyutlara eşlemeyi ve herhangi bir yanlış hizalamayı telafi etmeyi ifade eder. Telesentrik lens mesafeye ilgili ölçeklemeyi ortadan kaldırdığı için, telesentrik sistemler kalibre edilmesi en kolay olanlardır; genellikle sadece bir kerelik ölçek kalibrasyonu gerekir (örneğin, bilinen çaplı bir nesnenin görüntülenmesi). Dvoinishnikov'un telesentrik yapılandırması [27], nesne merceğin alan derinliğinde herhangi bir yerde olsaydı aynı piksel-mm oranını korurdu. Sistematik önyargıyı nötrleştirmek dışında herhangi bir kalibrasyon olmadan, alt piksel kenar tespiti minimum bozulma verildiğinde son derece yüksek bir doğruluğa ulaşabilir. Telesentrik sistemler için,

birincil kalibrasyon zorluğu merceğin ve kameranın düzgün bir şekilde takıldığından emin olmaktır; kalan herhangi bir eğim veya mercek kusuru küçük bir yanlışlığa neden olabilir.

Gölge görüntüleme teknikleri için kalibrasyon daha karmaşıktır. Telesentrik optikler olmadan, görüntüdeki nesnenin görünen boyutu nesnenin kameraya olan uzaklığına göre değişir. Bu nedenle, sistem ya mesafe değişikliklerini ölçmek/ayarlamak için bir yöntem ya da belirli, bilinen bir mesafeye ihtiyaç duyar. Sun vd.'nin [1] yaklaşımı, şaft her yeniden konumlandırıldığında ölçüm düzleminin konumunu kalibre etmeyi gerektiriyordu. Şaftın merkez çizgisi kalibre edilmiş düzlemde değilse ölçülen çap yanlış olurdu. Her ek bileşen veya herhangi bir mekanik değişiklikten sonra bu ekstra adım nedeniyle daha fazla kurulum zorluğu eklenir. Üretim ortamlarında bu bir dezavantajdır; örneğin, yeni bir çubuk grubu biraz farklı bir yolda çalışıyorsa, kamerayı yeniden kalibre etmek veya ölçüğü düzeltmek için referans bileşenleri kullanmak gerekir. Hao vd. [16] tarafından yapılan iki mesafeli görüntüleme gibi bazı gelişmeler, gerçek çapı belirleyen iki gözlem yoluyla kalibrasyon hassasiyetini düşürmeyi amaçlar. Merceksiz sistemlerde [47] kalibrasyon, mesafe tasarım gereği olduğundan (nesne bir sensörün tam karşısında veya önceden tanımlanmış bir boşlukta) sadece o konumdaki bir referans nesnesini ölçmektir. Ancak bu hassas konumu değişen bir durumda tutmak zordur. Genellikle, gölge teknikleri, nesnenin konumuna bağlı olarak hassas mesafe/açı kalibrasyonunun yanı sıra ara sıra nesne başına kalibrasyon gerektirir.

Lazer üçgenleme yöntemleri, lazerin ve kamera yapılandırmasının geometrik kalibrasyonunu gerektirir. Genellikle, kameranın içsel ayarlarını ve lazer projeksiyon düzlemine göre konumunu ayarlamak gerekir. Lazer çizgisi kaymasını gözlemlemek için alan boyunca bilinen boyuttaki öğeler veya hedef hareketi bunu başarmaya yardımcı olabilir. Örneğin, bir üçgenleme cihazının kalibrasyonu, hesaplamayı ayarlamak için bilinen bir referans çapının ölçülmesini gerektirebilir ve çizgi ofsetini çapa göre değiştirebilir. Kalibrasyon, birkaç kamera veya lazer kullanılırsa biraz karmaşık hale gelir; örneğin Song ve diğerlerinin çift kamera yöntemi, iki kameranın koordinat sistemlerinin birbirine yakın t içinde senkronize edilmesini gerektirir.

Tablo 5.1'de verilen araştırmaların çoğu ([17], [79] hariç), genellikle resim toplama sırasında sabitlenmiş veya sabitlenmiş hareketsiz örnekleri ölçmüştür. Bunun nedeni, nesnenin odak derinliği içinde kalması ve iyi bir gölge elde etmenin genellikle kısa pozlama ve az hareket bulanıklığı gerektirmesidir. Yine de, doğru mimari ile optik görüntüleme gerçek zamanlı olabilir: hareket, yüksek hızlı kameralar ve flaşlı LED arka ışıklarla dondurulabilir. Literatürde yer alan Demeyere vd.'nin [17] çalışmasında 10–30 cm gibi

makro boyuttaki küresel nesneler için yaklaşık %1 doğrulukla ölçüm yapılabildiği belirtilmiştir. Ancak bu hata oranı, biyomedikal cihazlarda olduğu gibi mikrometre düzeyinde hassasiyet gerektiren uygulamalar için yetersizdir. Geliştirilen sistemlerimiz ise hem daha küçük çaplı (1–50 mm) nesnelerde hem de daha düşük mutlak ve görelî hata oranlarıyla ölçüm yapabilmektedir. Bu da özellikle stent, iğne ve ince çubuk gibi hassas uygulamalarda sistemimizin teknik olarak üstünlüğünü ortaya koymaktadır. 13 ms pozlama ve 10 m/s'ye kadar hareket eden çubukları yakalamak için parlak bir LED kullanılan bölüm 3.3.2'de yer alan sistemimiz özellikle hareket eden bir üretim hattında gerçek zamanlı geri bildirim için tasarlandı. Yapılan çalışma, gölge görüntülemenin gerçek zamanlı ölçümler için kullanılabileceğini ortaya koydu. Kolime edilmiş LED ışını ve bir ekran üzerinden görüntü alınması, çubuğun hareket etmesine (düzensiz bir şekilde salınmasına) rağmen her karede kabul edilebilir bir silüet/gölge görüntüsü oluşturulmasına olanak sağlar. Gerçek zamanlı ölçümler için de telesentrik görüntüleme sistemleri kullanılabilir; ancak bu sistemlerin en büyük sorunu, görüş alanlarının küçük olmasıdır, bu yüzden nesne görüntü içinde kalmalıdır. Sonuç olarak, lazer üçgenleme gerçek zamanlı ölçüm için en kolay yöntemdir; görüntüleme temelli yöntemler ise hareketi tolere edebilmek için pozlama ve görüş alanının dikkatlice ayarlanmasını gerektirir. Yakın zamana kadar çok az görüntüleme sistemi dinamik (hareketli) çap takibi yapmayı denemişti; çalışmamız, video görüntüsünden anlık olarak çap okunmasını mümkün olduğunu gösterdi.

Bu tez kapsamında geliştirilen dört sistem, literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında çok sayıda açıdan öne çıkmaktadır: Dinamik ve geniş çap aralığı: Sistemler, 1 mm'den 27 mm'ye kadar geniş bir çap aralığında, saniyede 10 m'ye kadar hızla hareket eden çubuklar üzerinde gerçek zamanlı ve temassız ölçüm gerçekleştirebilmiştir. Literatürde yer alan birçok çalışma, ya statik örneklerle sınırlı kalmış ya da bu kadar geniş aralıkta doğrulama sunmamıştır. Düşük maliyetli, modüler donanım yapısı: Özellikle 3.3.2 ve 3.3.4 numaralı sistemlerde, piyasada yaygın olarak bulunan LED, ekran ve kamera gibi standart bileşenlerle, yüksek doğrulukta ölçüm gerçekleştirilmiştir. Telesentrik lens gibi yüksek maliyetli elemanların yerine daha erişilebilir çözümler kullanılmıştır. Alt piksel doğrulukta ölçüm algoritmaları: Özellikle 3.3.3 ve 3.3.4 sistemlerinde geliştirilen alt piksel kenar algılama algoritmaları sayesinde, yaklaşık 9–11 µm standart sapma ile, telesentrik sistemlerle karşılaştırılabilir hassasiyet düzeylerine ulaşılmıştır. Bu, sistemin yalnızca donanımsal olarak değil, yazılım seviyesinde de rekabetçi olduğunu göstermektedir. Gerçek zamanlı ölçüm kabiliyeti: 1 ms pozlama süresi ile 10 m/s hızla ilerleyen çubukların net silüetleri elde edilmiş; bu sayede gölge görüntüleme tekniğinin de dinamik uygulamalarda

etkili şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir. Literatürdeki birçok sistem bu düzeyde hareket toleransına sahip değildir. Uygulama odaklı özgün sistem mimarisi: Tablo 5.1’de sunulan literatür örneklerinin büyük bölümü ya laboratuvar ortamında kalmış ya da tek boyutta örnekler üzerinden değerlendirme yapmıştır. Bu çalışmada ise, gerçek üretim hattına benzer koşullarda test edilen, farklı mimari yapıdaki dört sistem karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve sistem mimarisinin uygulama koşullarına göre nasıl optimize edilebileceği detaylı biçimde gösterilmiştir.

Tablo 5.1’in genel değerlendirmesi, bu çalışmada geliştirilen optik çap ölçüm sistemlerinin, mevcut literatürle karşılaştırıldığında birçok açıdan özgün ve yenilikçi bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir. Özellikle dinamik ortamlarda ölçüm yapabilme kapasitesi, düşük maliyetli donanım kullanımı, yüksek hassasiyet düzeyi ve farklı mimarilerin sistematik karşılaştırılması, bu çalışmayı alanındaki benzer araştırmalardan anlamlı şekilde ayırmaktadır. Bu yönleriyle tez çalışması, yalnızca akademik katkı değil, aynı zamanda endüstriyel ölçüm teknolojilerine doğrudan uygulanabilir pratik bir çözüm sunarak literatüre değerli bir katkı sağlamaktadır.

Tablo 5.2’de geliştirilen optik çap ölçüm sistemlerinin performansı, biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan uluslararası standartlar ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Cerrahi iğneler için ISO 9626:2016 standardı $\pm 0,02$ mm (20 μ m) tolerans önermektedir. Minimal doku hasarı ve hassas yönlendirme gibi kritik unsurlar göz önüne alındığında, bu uygulama için önerilen Sistem 3.3.2, 3.3.3 ve 3.3.4 gerekli hassasiyeti sağlamaktadır. Ancak, Sistem 3.3.1’in hassasiyeti (120 μ m STD), belirtilen tolerans değerinin üzerinde olduğundan, bu uygulama alanında kullanımı önerilmemektedir. Benzer biçimde, damar içi güvenli geçişin kritik olduğu kateterlerde ISO 10555-1 standardına göre $\pm 0,05$ mm (50 μ m) tolerans önerilmiştir. Bu doğrultuda, Sistem 3.3.2, 3.3.3 ve 3.3.4 kateter uygulamalarında kabul edilebilir ölçüm hassasiyetine sahipken, Sistem 3.3.1’in performansı yeterli bulunmamıştır. Ortopedik vidalar için ASTM F543 standardına göre belirlenen $\pm 0,1$ mm (100 μ m) tolerans değeri ise kemik stabilitesi açısından kritiktir ve belirtilen toleransların üzerindeki farklar önemli mekanik mukavemet kayıplarına neden olabilir. Bu nedenle, Sistem 3.3.2, 3.3.3 ve 3.3.4 ortopedik vida ölçümlerinde gerekli hassasiyeti sağlarken, Sistem 3.3.1’in hassasiyeti bu uygulama için uygun değildir.

Tablo 5.1. Dinamik/temassız optik çap ölçüm sistemlerinin karşılaştırılması (geçtiğimiz ~20 yıldaki seçilmiş çalışmalar). Her satır aydınlatmayı, tekniği, çözünürlüğü, aralığı, hassasiyeti, maliyeti ve uygulama alanını gösterir. (STD = ölçümün standart sapması)

Çalışma (Yıl)	Aydınlatma	Teknik (Ölçüm Yöntemi)	Piksel Çözünürlüğü	Ölçülen Çap Aralığı	Hassasiyet (Standart Sapma)	Maliyet	Uygulama Alanı
Radil vd., 2007 [47]	LED nokta ışık kaynağı	Lenssiz gölge görüntüleme sistemi (sensör)	– (sensör)	0,3 mm (sensör-sınırlı)	~3 µm doğruluk (1%)	Düşük (lens yok, basit setup)	İnce teller/fiberler (mikrometre ölçekli)
Demeyere vd., 2007 [17]	Lazer	Lazer üçgenleme (kamera ve lazer profil analizi)	– (geometri tabanlı)	10-30 cm (küresel nesneler)	~Çapın %1'i	Orta (lazer ve kamera)	Hareketli küresel parçalar (örn. rulmanlar)
Sun vd., 2014 [1]	LED arka aydınlatma	Standart görüntüleme (telesentrik olmayan, alt piksel kenar tespiti; düzlem kalibrasyonu gerektirir)	– (~10–20 µm/px, tahmini)	~20–27 mm	~5 µm hata	Orta (1 kamera ve lens)	İşlenmiş miller (CNC tezgâhı çalışırken)
Chen vd., 2017 [78]	LED arka aydınlatma	Telesentrik görüntüleme (dijital görüş sistemi)	– (belirtilmemiş)	~6 mm (tek bir çubuk kullanılmış)	~10 µm STD	Yüksek (telesentrik lens)	Makinelerdeki destek çubuğu (6 mm çubuk)
Hao vd., 2019 [16]	LED arka aydınlatma	Standart görüntüleme, İki mesafeli bileşim (perspektif düzeltme)	– (belirtilmemiş)	30–40 mm	~15 µm STD	Orta (1 kamera ve bilgisayar)	Büyük miller (laboratuvar/endüstriyel)
Dvoinishnikov vd., 2022 [27]	LED arka aydınlatma (kolime ışık)	Telesentrik görüntüleme (gölge kenarı algılama)	~9,85 µm/pixel	7–10 mm	~0,24 µm STD	Yüksek (telesentrik lens)	Küçük silindirik parçalar (laboratuvar QA/QC)
3.3.1 360° Görüntüleme Sistemi	LED arka aydınlatma	Aynalı çoklu görünüm gölge görüntüleme sistemi	~62,50 µm/pixel	1–50 mm	~120 µm STD	Düşük (kamera, led ve ayna)	Dinamik hareketli çubuklar (çelik tel/çubuk üretimi)
3.3.2 Gölge Görüntüleme Sistemi	LED arka aydınlatma	Lenssiz gölge görüntüleme sistemi	~22,03 µm/pixel	1–50 mm	~14,73 µm STD	Düşük (kamera ve led)	Dinamik hareketli çubuklar (çelik tel/çubuk üretimi)
3.3.3 Telesentrik Gölge Görüntüleme Sistemi [79]	Yüksek güçlü LED ve Lensler (telesentrik aydınlatma)	Hibrid: telesentrik gölge görüntüleme (kolime ışın ve kamera; alt piksel kenar algılama algoritmaları)	~17,85 µm/pixel	4–27 mm	~9,1 µm STD (≈0,25% çap.)	Düşük (standart, piyasadan temin edilebilen optikler)	Dinamik hareketli çubuklar (çelik tel/çubuk üretimi)
3.3.4 Telesentrik Görüntüleme Sistemi	Yüksek güçlü LED ve Lensler (telesentrik aydınlatma)	Telesentrik görüntüleme (kolime ışın ve kamera; alt piksel kenar algılama algoritmaları)	~14,57 µm/pixel	1–27 mm	~8,20 µm STD	Düşük (standart, piyasadan temin edilebilen optikler)	Dinamik hareketli çubuklar (çelik tel/çubuk üretimi)

Tabloda belirtilen ϕ toleransları ilgili biyomedikal standartlardan alınmıştır. Sistemin kullanılabilirliği, ölçülen hassasiyet değerleri (standart sapma – STD) doğrultusunda değerlendirilmiştir. Standart sapması toleranstan daha yüksek olan sistemlerin, ilgili biyomedikal uygulamalarda kullanımı önerilmemektedir. Genel endüstriyel uygulamalarda tolerans değerleri ürün ve süreç özelinde değişkenlik göstermekte olup, bu tür uygulamalarda tüm sistemlerin kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Tablo genelinde sistemlerin uygunluk değerlendirmesi, deneysel çalışmalardan elde edilen standart sapma (STD) değerlerine göre yapılmıştır. Böylece geliştirilen sistemlerin biyomedikal ve endüstriyel uygulamadaki potansiyeli ve sınırlamaları net bir şekilde ortaya konmuştur.

Tablo 5.2. Biyomedikal uygulamalardaki standart ϕ toleransları ve önerilen optik sistemlerin kullanılabilirliği

Uygulama Alanı	Standartlar	Kabul Edilebilir ϕ Toleransı	Bu Toleransı Sağlayan Tezdeki Sistemler
Cerrahi İğneler	ISO 9626:2016	$\pm 0,02$ mm (20 μ m) Minimal doku hasarı için kritik	3.3.2, 3.3.3, 3.3.4
Kateterler	ISO 10555-1	$\pm 0,05$ mm (50 μ m) Damar içi güvenli geçiş için kritik	3.3.2, 3.3.3, 3.3.4
Ortopedik Vidalar	ASTM F543	$\pm 0,1$ mm (100 μ m) Kemik stabilitesi için kritik (0,2 mm fark %15 mukavemet kaybı)	3.3.2, 3.3.3, 3.3.4
Genel Endüstriyel Uygulamalar	—	Uygulamaya göre değişken	Tüm sistemler kullanılabilir

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Geliştirilen optik ölçüm sistemlerinin sağladığı olanaklar, boyutsal ölçüm doğruluğu ve tutarlılığının hayati önem taşıdığı biyomedikal uygulamalar alanı için ilgi çekicidir. Biyomedikal tüplerin, kateterlerin, stentlerin ve diğer silindirik tıbbi bileşenlerin boyutlarının doğru ve hassas bir şekilde belirlenmesi, hasta güvenliğini, terapötik etkinliği ve genel tıbbi cihaz performansını doğrudan etkiler. Biyomedikal üretim süreçlerindeki küçük boyutsal değişiklikler önemli klinik sorunlara neden olabilir, bu nedenle kontrolünün yapılmasına ihtiyaç duyulur. Araştırmamız biyomedikal üretim standartlarını iyileştirmenin yanı sıra acil endüstriyel kalite kontrol ihtiyaçları için de kullanılabilecektir. Önerilen optik sistem, donanım ve görüntü işleme teknikleri aracılığıyla çeşitli endüstrilerde kalite güvence prosedürlerinde önemli iyileştirmeler sunar. Sonuç olarak, optik metroloji çözümlerinin endüstriyel ve biyomedikal ortamlara etkili bir şekilde entegre edilmesiyle, bu çalışma doğrudan ürün güvenilirliğini artırmaya, atığı ve maliyeti düşürmeye, hasta güvenliğini garanti etmeye ve giderek daha fazla kaynak bilincine sahip bir dünyada sürdürülebilir, sorumlu üretim uygulamalarını desteklemeye yardımcı olur.

Bu araştırmanın arkasındaki motivasyon, ortopedik ve biyomedikal müdahalelerde hasta sonuçlarını ve implant etkinliğini iyileştirmeye yönelik kritik ihtiyaçtır. Mevcut çap ölçümü yanlışlıkları implant instabilitesine, iyileşmenin gecikmesine, cerrahi işlemi yenileme riskinin artmasına ve hastalarda ek rahatsızlıklara yol açabilir. Son derece hassas bir ölçüm sistemi geliştirerek ve entegre ederek, bu riskleri en aza indirme, hastaların iyileşme süreçlerini geliştirme, yeniden bir cerrahi operasyon yapılmasına ilişkili sağlık hizmeti maliyetlerini azaltma ve nihayetinde biyomedikal implantların kalitesini artırma potansiyeli vardır. Bu zorluğun ele alınması önemli klinik etkilere sahip olmakla birlikte, daha güvenilir ve daha güvenli biyomedikal çözümlere ulaşmak için gereklidir. Geliştirilen optik ölçüm sistemlerinin sağladığı olanaklar, boyutsal ölçüm doğruluğu ve tutarlılığının hayati önem taşıdığı biyomedikal uygulamalar alanı için ilgi çekicidir. Biyomedikal tüplerin, kateterlerin, stentlerin ve diğer silindirik tıbbi bileşenlerin boyutlarının doğru ve hassas bir şekilde belirlenmesi, hasta güvenliğini, terapötik etkinliği ve genel tıbbi cihaz performansını doğrudan etkiler. Biyomedikal üretim süreçlerindeki küçük boyutsal değişiklikler önemli klinik sorunlara neden olabilir, bu nedenle kontrolünün yapılmasına ihtiyaç duyulur. Araştırmamız biyomedikal üretim standartlarını iyileştirmenin yanı sıra acil endüstriyel kalite kontrol ihtiyaçları için de kullanılabilecektir. Önerilen optik sistem, donanım ve görüntü işleme teknikleri aracılığıyla çeşitli endüstrilerde kalite güvence prosedürlerinde

önemli iyileştirmeler sunar. Sonuç olarak, optik metroloji çözümlerinin endüstriyel ve biyomedikal ortamlara etkili bir şekilde entegre edilmesiyle, bu çalışma doğrudan ürün güvenilirliğini artırmaya, atığı ve maliyeti düşürmeye, hasta güvenliğini garanti etmeye ve giderek daha fazla kaynak bilincine sahip bir dünyada sürdürülebilir, sorumlu üretim uygulamalarını desteklemeye yardımcı olur. Bu araştırmanın arkasındaki motivasyon, ortopedik ve biyomedikal müdahalelerde hasta sonuçlarını ve implant etkinliğini iyileştirmeye yönelik kritik ihtiyaçtır. Mevcut çap ölçümü yanlışlıkları implant instabilitesine, iyileşmenin gecikmesine, cerrahi işlemini yenileme riskinin artmasına ve hastalarda ek rahatsızlıklara yol açabilir. Son derece hassas bir ölçüm sistemi geliştirerek ve entegre ederek, bu riskleri en aza indirme, hastaların iyileşme süreçlerini geliştirme, yeniden bir cerrahi operasyon yapılmasına ilişkili sağlık hizmeti maliyetlerini azaltma ve nihayetinde biyomedikal implantların kalitesini artırma potansiyeli vardır. Bu zorluğun ele alınması önemli klinik etkilere sahip olmakla birlikte, daha güvenilir ve daha güvenli biyomedikal çözümlere ulaşmak için gereklidir. Bu bağlamda, elde edilen bulgular yalnızca mevcut ihtiyaçlara yanıt vermekle kalmayıp, gelecekte geliştirilebilecek daha kapsamlı, entegre ve akıllı sistemler için de bir temel oluşturmaktadır. Geliştirilen sistemlerin gelecekte daha geniş uygulama alanlarında kullanılabilmesi için bazı teknik ve yapısal iyileştirmeler önerilmektedir. Özellikle mikrometre altı hassasiyet gerektiren havacılık, savunma sanayi ve mikro-mekanik üretim gibi alanlara uyarlama amacıyla, telesentrik lenslerin optik tasarımı ile kalibrasyon algoritmalarının daha ileri düzeyde optimize edilmesi gerektiği değerlendirilmektedir. Bu sayede sistemin bu sektörlerde de etkin ve güvenilir biçimde kullanılabilmesi mümkün olacaktır. Bunun yanı sıra, hareketli nesnelerden kaynaklanan satır taramalı perde etkisi, ışık yetersizliği ve titreşim gibi bozulmaları telafi edebilmek amacıyla, evrimsel sinir ağları (CNN) gibi derin öğrenme tabanlı görüntü işleme algoritmalarının sisteme entegre edilmesi önerilmektedir. Bu yaklaşımlar, yalnızca kenar tespiti ve çap ölçümünü daha kararlı hale getirmekle kalmayıp, aynı zamanda kalibrasyon sürecinin otomatikleştirilmesine de katkı sağlayabilir. Endüstriyel ortamlarda karşılaşılan sıcaklık değişimi, mekanik titreşim ve hat içi salınımlar gibi çevresel faktörlerin etkilerini azaltmak amacıyla, sistemin pasif veya aktif titreşim sönümleme mekanizmalarıyla desteklenmesi ve sıcaklık dengeleme algoritmalarının geliştirilmesi önerilmektedir. Bu tür iyileştirmeler, sistemin endüstriyel ortamlarda daha kararlı ve güvenilir çalışmasını sağlayacaktır. Sistemlerin modüler yapısı, farklı malzeme türleri (örneğin polimer, kompozit veya biyomalzeme) ve çap aralıkları için kolay adaptasyona olanak sağlamaktadır. Bu nedenle, gelecekte değiştirilebilir aydınlatma, lens veya sensör bileşenlerinin geliştirilmesiyle

sistemin çok amaçlı ve ölçeklenebilir hale getirilmesi faydalı olacaktır. Son olarak, özellikle ortopedik cerrahiye yönelik vida, stent ve çubuk gibi implant bileşenlerinin üretim öncesi ve sonrası çap doğrulama süreçlerine sistemin entegre edilmesi önerilmektedir. Ayrıca biyouyumlu malzemelerin deformasyon analizleri gibi biyomedikal uygulamalarda sistemin kullanımı araştırılabilir. Bu bağlamda, elde edilen bulgular yalnızca mevcut ihtiyaçlara yanıt vermekle kalmayıp, gelecekte geliştirilebilecek daha kapsamlı, entegre ve akıllı sistemler için de bir temel oluşturmaktadır.

Geliştirilen sistemlerin gelecekte daha geniş uygulama alanlarında kullanılabilmesi için bazı teknik ve yapısal iyileştirmeler önerilmektedir. Özellikle mikrometre altı hassasiyet gerektiren havacılık, savunma sanayi ve mikro-mekanik üretim gibi alanlara uyarlama amacıyla, telesentrik lenslerin optik tasarımı ile kalibrasyon algoritmalarının daha ileri düzeyde optimize edilmesi gerektiği değerlendirilmektedir. Bu sayede sistemin bu sektörlerde de etkin ve güvenilir biçimde kullanılabilmesi mümkün olacaktır. Bunun yanı sıra, hareketli nesnelerden kaynaklanan satır taramalı perde etkisi, ışık yetersizliği ve titreşim gibi bozulmaları telafi edebilmek amacıyla, evrişimsel sinir ağları (CNN) gibi derin öğrenme tabanlı görüntü işleme algoritmalarının sisteme entegre edilmesi önerilmektedir. Bu yaklaşımlar, yalnızca kenar tespiti ve çap ölçümünü daha kararlı hale getirmekle kalmayıp, aynı zamanda kalibrasyon sürecinin otomatikleştirilmesine de katkı sağlayabilir. Endüstriyel ortamlarda karşılaşılan sıcaklık değişimi, mekanik titreşim ve hat içi salınımlar gibi çevresel faktörlerin etkilerini azaltmak amacıyla, sistemin pasif veya aktif titreşim sönümleme mekanizmalarıyla desteklenmesi ve sıcaklık dengeleme algoritmalarının geliştirilmesi önerilmektedir. Bu tür iyileştirmeler, sistemin endüstriyel ortamlarda daha kararlı ve güvenilir çalışmasını sağlayacaktır. Sistemlerin modüler yapısı, farklı malzeme türleri (örneğin polimer, kompozit veya biyomalzeme) ve çap aralıkları için kolay adaptasyona olanak sağlamaktadır. Bu nedenle, gelecekte değiştirilebilir aydınlatma, lens veya sensör bileşenlerinin geliştirilmesiyle sistemin çok amaçlı ve ölçeklenebilir hale getirilmesi faydalı olacaktır. Son olarak, özellikle ortopedik cerrahiye yönelik vida, stent ve çubuk gibi implant bileşenlerinin üretim öncesi ve sonrası çap doğrulama süreçlerine sistemin entegre edilmesi önerilmektedir. Ayrıca biyouyumlu malzemelerin deformasyon analizleri gibi biyomedikal uygulamalarda sistemin kullanımı araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Q. Sun, Y. Hou, Q. Tan, and C. Li, “Shaft diameter measurement using a digital image,” *Opt Lasers Eng*, vol. 55, pp. 183–188, 2014, doi: 10.1016/j.optlaseng.2013.11.005.
- [2] S. Liu, Q. Tan, and Y. Zhang, “Shaft Diameter Measurement Using Structured Light Vision,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 8, pp. 19750–19767, Aug. 2015, doi: 10.3390/s150819750.
- [3] X. Li, K. Xu, and S. Wang, “Precision Measurement Method of Large Shaft Diameter Based on Dual Camera System,” *Sensors*, vol. 22, no. 11, Jun. 2022, doi: 10.3390/s22113982.
- [4] Y. Huang and C. Zhou, “Overview on Optical Measurements of Shaft Diameter Detection,” *International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy*, 2015. doi: 10.2991/icismme 15.2015.201.
- [5] D. G. A. Ibrahim, “Recent Techniques in Surface Metrology,” *Journal of Measurement Science & Applications, JMSA*, vol. 1, no. 1, 2021.
- [6] J. W. McBride, K. J. Cross, and T. Bull, “Optical Metrology for the Morphological Characterization of Surfaces: Limitations, Innovations, Registration, and New Directions,” *SPIE-Intl Soc Optical Eng*, Nov. 2019, p. 31. doi: 10.1117/12.2540438.
- [7] O. R. Real et al., “Surface Measurement Techniques in Machine Vision,” in *Optoelectronics in Machine Vision-Based Theories and Applications*, 2018, ch. 4, pp. 79–104. doi: 10.4018/978-1-5225-5751-7.ch004.
- [8] K. J. Stout and L. Blunt, “Nanometres to micrometres: three-dimensional surface measurement in bio-engineering,” *Surf Coat Technol*, vol. 71, p. 69, 1995, doi: 10.1016/0257-8972(95)80023-9.
- [9] W. Chen, P. Mirdehghan, S. Fidler, and K. N. Kutulakos, “Auto-Tuning Structured Light by Optical Stochastic Gradient Descent,” in *Proceedings of the IEEE Computer*

Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society, 2020, pp. 5969–5979. doi: 10.1109/CVPR42600.2020.00601.

- [10] S. Jecić and N. Drvar, “The Assessment of Structured Light and Laser Scanning Methods in 3d Shape Measurements,” in 4th International Congress of Croatian Society of Mechanics, 2003, pp. 237–244.
- [11] Y. Su, B. J. Davis, and R. A. Robb, “A Method for Size Estimation for Small Objects and Its Application in Brachytherapy Seed Identification,” in Medical Imaging 2004: Image Processing, SPIE, May 2004, p. 1679. doi: 10.1117/12.535426.
- [12] M. Martarelli, G. M. Revel, and C. Santolini, “Automated modal analysis by scanning laser vibrometry: Problems and uncertainties associated with the scanning system calibration,” *Mech Syst Signal Process*, vol. 15, no. 3, pp. 581–601, 2001, doi: 10.1006/mssp.2000.1336.
- [13] Z. Shi and Y. Sun, “An overview on line laser 3D measurement of gears,” *Precis Eng*, vol. 88, pp. 823–844, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.precisioneng.2024.04.018.
- [14] M. Zhong, J. Cui, J. S. Hyun, L. Pan, P. Duan, and S. Zhang, “Uniaxial Three-dimensional Phase-Shifting Profilometry Using a Dual-telecentric Structured Light System in Micro-scale Devices,” *Meas Sci Technol*, vol. 31, no. 8, Aug. 2020, doi: 10.1088/1361-6501/ab63b2.
- [15] B. Li and S. Zhang, “Flexible Calibration Method for Microscopic Structured Light System Using Telecentric Lens,” *Opt Express*, vol. 23, no. 20, p. 25795, Oct. 2015, doi: 10.1364/oe.23.025795.
- [16] F. Hao, J. J. Shi, D. L. Chen, F. Wang, and Y. T. Hu, “Shaft diameter measurement using digital image composition at two different object distances,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Apr. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/504/1/012097.

- [17] M. Demeyere, D. Rurimunzu, and C. Eugène, “Diameter Measurement of Spherical Objects by Laser Triangulation in an Ambulatory Context,” *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 56, no. 3, pp. 867–872, Jun. 2007, doi: 10.1109/TIM.2007.894884.
- [18] C. Chen, Y. Kong, H. Wang, and Z. Zhang, “A High-Accuracy Calibration Method for a Telecentric Structured Light System,” *Sensors*, vol. 22, no. 17, Sep. 2022, doi: 10.3390/s22176370.
- [19] H. Li, Z. Liao, W. Cai, Y. Zhong, and X. Zhang, “Flexible Calibration of the Telecentric Vision Systems Using Only Planar Calibration Target,” *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 73, pp. 1–10, 2024, doi: 10.1109/TIM.2023.3332934.
- [20] J. Huang, Z. Wang, Q. Xue, and J. Gao, “Calibration of a Camera-projector Measurement System and Error Impact Analysis,” *Meas Sci Technol*, vol. 23, no. 12, 2012, doi: 10.1088/0957-0233/23/12/125402.
- [21] J. Caja, E. Gómez, P. Maresca, and M. Berzal, “Uncertainty Estimation for the Optical System of Optical Measuring Machines,” in *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 2014, pp. 95–101. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.615.95.
- [22] O. Bai and D. A. Maisano, “A Comparison of Two Different Approaches to Camera Calibration in LSDM Photogrammetric Systems,” 2014, [Online]. Available: <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>
- [23] K. Chen et al., “Calibration of Telecentric Cameras with an Improved Projection Model,” *Optical Engineering*, vol. 57, no. 04, p. 1, Apr. 2018, doi: 10.1117/1.oe.57.4.044103.
- [24] H. Liu, H. Lin, and L. Yao, “Calibration Method for Projector-camera-based Telecentric Fringe Projection Profilometry System,” *Opt Express*, vol. 25, no. 25, p. 31492, Dec. 2017, doi: 10.1364/oe.25.031492.
- [25] L. Rao, F. Da, W. Kong, and H. Huang, “Flexible Calibration Method for Telecentric Fringe Projection Profilometry Systems,” *Opt Express*, vol. 24, no. 2, p. 1222, Jan. 2016, doi: 10.1364/oe.24.001222.

- [26] Huiyang Liao, Zhong Chen, and Xianmin Zhang, "Calibration of Camera with Small FOV and DOF Telecentric Lens," IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp. 498–503, 2013, doi: 10.1109/ROBIO.2013.6739509.
- [27] S. V. Dvoinishnikov, V. V. Rakhmanov, I. K. Kabardin, V. G. Meledin, and D. O. Semenov, "A Way of Edge Detection for Cylindrical Objects on an Image by the Shadow Method of Dimensional Control," Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, vol. 58, no. 1, pp. 30–35, Feb. 2022, doi: 10.3103/S8756699022010034.
- [28] B. N. Vijay Kumar Gowda, S. Gauni, and V. Maik, "An Optical Design for Enhanced Image Quality Based on Minimal Lens Error Optimization," Optik (Stuttg), vol. 270, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.ijleo.2022.169934.
- [29] D. C. H. Schleicher and B. G. Zagar, "High Dynamic Range Imaging by Varying Exposure Time, Gain and Aperture of a Video Camera," IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings, 2010, pp. 486–491. doi: 10.1109/IMTC.2010.5488197.
- [30] H. Lin et al., "Optimizing Camera Exposure Time for Automotive Applications," Sensors, vol. 24, no. 16, Aug. 2024, doi: 10.3390/s24165135.
- [31] Q. Song, W. Wu, S. Zhu, and H. Yan, "Optical Path Design of the External Diameter Measurement System based on CCD and Parallel Light Projection Method with Double Light Paths," in International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2007: Related Technologies and Applications, SPIE, Sep. 2007, p. 66251U. doi: 10.1117/12.791232.
- [32] B. Li, "Research on geometric dimension measurement system of shaft parts based on machine vision," EURASIP J Image Video Process, vol. 2018, no. 1, Dec. 2018, doi: 10.1186/s13640-018-0339-x.
- [33] S. Guo, J. Zhang, X. Jiang, P. Yin, and W. Lei, "Mini Milling Cutter Measurement Based on Machine Vision," in Procedia Engineering, 2011, pp. 1807–1811. doi: 10.1016/j.proeng.2011.08.336.

- [34] Q. Tan, Y. Kou, J. Miao, S. Liu, and B. Chai, "A Model of Diameter Measurement Based on the Machine Vision," *Symmetry (Basel)*, vol. 13, no. 2, pp. 1–15, Feb. 2021, doi: 10.3390/sym13020187.
- [35] L. Gao, Z. Wang, Y. Liu, J. Guo, and C. Liu, "Vision Measurement Technique of Axle Based on Double Beam," *Optik (Stuttg)*, vol. 174, pp. 757–765, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.ijleo.2018.08.131.
- [36] G. Wei and Q. Tan, "Measurement of Shaft Diameters by Machine Vision," 2011, doi: 10.1364/AO.50.003246.
- [37] J. K. Che and M. M. Ratnam, "Real-time Monitoring of Workpiece Diameter During Turning by Vision Method," *Measurement (Lond)*, vol. 126, pp. 369–377, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.05.089.
- [38] W. Liu et al., "An Improved Online Dimensional Measurement Method of Large Hot Cylindrical Forging," *Measurement (Lond)*, vol. 45, no. 8, pp. 2041–2051, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.measurement.2012.05.004.
- [39] B. Liu, P. Wang, Y. Zeng, and C. Sun, "Measuring Method for Micro-diameter Based on Structured-light Vision Technology," *Chinese Optics Letters*, vol. 8, no. 7, p. 666, 2010, doi: 10.3788/col20100807.0666.
- [40] A. G. Poyraz, M. Kaçmaz, H. Gürkan, and A. E. Dirik, "Sub-Pixel counting based diameter measurement algorithm for industrial Machine vision," *Measurement (Lond)*, vol. 225, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2023.114063.
- [41] J. Lowell, A. Hunter, D. Steel, A. Basu, R. Ryder, and R. L. Kennedy, "Measurement of Retinal Vessel Widths from Fundus Images Based on 2-D Modeling," *IEEE Trans Med Imaging*, vol. 23, no. 10, pp. 1196–1204, Oct. 2004, doi: 10.1109/TMI.2004.830524.
- [42] M. Chu, W. Huang, M. Xu, S. Jia, X. Zhang, and Y. Lu, "Sub-pixel Dimensional Measurement Algorithm Based on Intensity Integration Threshold," *OSA Contin*, vol. 3, no. 10, p. 2912, Oct. 2020, doi: 10.1364/osac.402101.

- [43] A. Elen and E. Dönmez, "Histogram-based global thresholding method for image binarization," *Optik (Stuttg)*, vol. 306, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.ijleo.2024.171814.
- [44] P. N. Priyanka Vijay C Patil, "Gray Scale Image Segmentation using OTSU Thresholding Optimal Approach," *Journal for Research*, vol. 02, p. 5, 2016, [Online]. Available: www.journalforresearch.org
- [45] N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray Level Histograms," *IEEE*, pp. 62–66, 1979, doi: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [46] H. Guedri, M. Ben Abdallah, F. Echouchene, and H. Belmabrouk, "Novel Computerized Method for Measurement of Retinal Vessel Diameters," *Biomedicines*, vol. 5, no. 2, Jun. 2017, doi: 10.3390/biomedicines5020012.
- [47] T. Radil, J. Fischer, and J. Kucera, "A Novel Optical Method of Dimension Measurement of Objects with Circular Cross-section," *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, Mar. 2007, pp. 386–391. doi: 10.1109/imtc.2006.328478.
- [48] M. Terlau, A. von Freyberg, D. Stöbener, and A. Fischer, "Shadow-Imaging-Based Triangulation Approach for Tool Deflection Measurement," *Sensors (Basel)*, vol. 23, no. 20, Oct. 2023, doi: 10.3390/s23208593.
- [49] S. V. Dvoynishnikov, I. K. Kabardin, G. V. Bakakin, V. V. Rakhmanov, and V. G. Glavny, "Determination of edge coordinates of cylinder in diameter measurements by the projection shadow method," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 1137–1140. doi: 10.1109/ISIE51582.2022.9831718.
- [50] R. Szewczyk, C. Zieliński, and M. Kaliczyńska, "Advances in Intelligent Systems and Computing 440 Challenges in Automation, Robotics and Measurement Techniques," 2016. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/11156>

- [51] J. Duan, J. Li, Y. Zhu, H. Zhang, Y. Liu, and Y. Zhao, "Design of an Imaging Optical System for Large-Sized Stepped Shaft Diameter Detection," *Applied Sciences* (Switzerland), vol. 14, no. 8, Apr. 2024, doi: 10.3390/app14083423.
- [52] S. Yang et al., "Label-free 3D optical Angiography via Time-frequency Domain Analysis of Focal Modulated Dynamic Blood Flow," *Appl Phys Lett*, vol. 126, 2025, doi: 10.1063/5.0245417.
- [53] K. Lenhardt and B. Kreuznach, "Optical measurement techniques with telecentric lenses," 2005.
- [54] "ISO 9626:2016 Stainless Steel Needle Tubing for the Manufacture of Medical Devices-Requirements and Test Methods," 2016. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/60480.html>
- [55] "ISO 10555-1:2013 – Intravascular Catheters — Sterile and Single-use Catheters — Part 1: General Requirements," 2013.
- [56] "ASTM F543-17 – Standard Specification and Test Methods for Metallic Medical Bone Screws," ASTM International, 2017. doi: 10.1520/F0543-17.
- [57] K. Matsukawa, Y. Yato, and H. Imabayashi, "Impact of Screw Diameter and Length on Pedicle Screw Fixation Strength in Osteoporotic Vertebrae: A Finite Element Analysis," *Asian Spine J*, vol. 15, no. 5, pp. 566–574, 2021, doi: 10.31616/asj.2020.0353.
- [58] M. Sensale, T. Vendeuvre, C. Schilling, T. Grupp, M. Rochette, and E. Dall'Ara, "Patient-Specific Finite Element Models of Posterior Pedicle Screw Fixation: Effect of Screw's Size and Geometry," *Front Bioeng Biotechnol*, vol. 9, Mar. 2021, doi: 10.3389/fbioe.2021.643154.
- [59] C. Zhao, X. Li, Q. Wu, and X. Liu, "A Thread-based Wearable Sweat Nanobiosensor," *Biosens Bioelectron*, vol. 188, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.bios.2021.113270.

- [60] F. A. Merchant, S. K. Shah, and K. R. Castleman, "Microscope Image Processing," 2nd ed., F. A. Merchant and K. R. Castleman, Eds., 2023, ch. Object Measurement, pp. 483–498. doi: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-01813-4>.
- [61] L. Wang, Y. Zhang, and J. Feng, "On the Euclidean Distance of Images," *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, vol. 27, pp. 1334–1339, 2005, doi: 10.1109/TPAMI.2005.165.
- [62] F. P. Preparata and M. Ian. Shamos, *Computational Geometry : an Introduction*. Springer-Verlag, 1985. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1098-6>.
- [63] Z. Wang, J. Feng, S. Yan, and H. Xi, "Linear Distance Coding for Image Classification," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 22, no. 2, pp. 537–548, 2013, doi: 10.1109/TIP.2012.2218826.
- [64] K. Jensen and D. Anastassiou, "Subpixel Edge Localization and the Interpolation of Still Images," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 4, pp. 285–295, 1995, doi: 10.1109/83.366477.
- [65] M. Rostykus, M. Rossi, and C. Moser, "Compact Lensless Subpixel Resolution Large Field of View Microscope," *Opt Lett*, vol. 43, no. 8, p. 1654, Apr. 2018, doi: 10.1364/ol.43.001654.
- [66] W.-C. Siu, "Review of image interpolation and super-resolution," in *Proceedings of The 2012 Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference*, IEEE, 2012, pp. 1–10. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/261462028>
- [67] X. Wang, "Interpolation and Sharpening for Image Upsampling," in *Proceedings - 2022 2nd International Conference on Computer Graphics, Image and Virtualization, ICCGIV 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 73–77. doi: 10.1109/ICCGIV57403.2022.00020.
- [68] Y. Z. Rawash, B. Al-Naami, A. Alfraihat, and H. A. Owida, "Advanced Low-Pass Filters for Signal Processing: A Comparative Study on Gaussian, Mittag-Leffler, and

- Savitzky-Golay Filters,” *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 11, no. 7, pp. 1841–1850, Jul. 2024, doi: 10.18280/mmep.110713.
- [69] Savitzky A and Golay M.J., “Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures,” 1964.
- [70] A. G. Flesia, G. Ames, G. Bergues, L. Canali, and C. Schurrer, “Sub-pixel Straight Lines Detection for Measuring Through Machine Vision,” in *Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014, pp. 402–406. doi: 10.1109/I2MTC.2014.6860776.
- [71] A. HajiRassouliha, A. J. Taberner, M. P. Nash, and P. M. F. Nielsen, “Subpixel phase-based image registration using Savitzky–Golay differentiators in gradient-correlation,” *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 170, pp. 28–39, May 2018, doi: 10.1016/j.cviu.2017.11.003.
- [72] S. Suzuki, “Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following,” pp. 32–46, 1985, doi: 10.1016/0734-189X(85)90016-7.
- [73] G. Xie and W. Lu, “Image Edge Detection Based On Opencv,” *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 104–106, 2013, doi: 10.12720/ijeee.1.2.104-106.
- [74] E. M. Fedorov and A. A. Koba, “Three-axis Laser Method for Measuring the Diameter of Cylindrical Objects,” 2016 *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. IEEE, 2016. doi: 10.1109/Dynamics.2016.7819008.
- [75] S. Su and W. Heidrich, “Rolling Shutter Motion Deblurring,” *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. doi: 10.1109/CVPR.2015.7298760.
- [76] V. Rengarajan, Y. Balaji, and A. Rajagopalan, “Unrolling the Shutter: CNN to Correct Motion Distortions.”

- [77] Z. Zhang, “A Flexible New Technique for Camera Calibration,” 2000.
- [78] J. Chen, C. Hu, Z. Yu, J. Cui, and X. You, “Vision-based Online Detection System of Support Bar,” in 2016 IEEE International Conference on Information and Automation, IEEE ICIA 2016, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jan. 2017, pp. 1594–1599. doi: 10.1109/ICInfA.2016.7832073.
- [79] A. Didem, O. Karayegen, and H. Kurtuldu, “Dynamic Characterization of Diameter for Round Surfaces Using a Non-Contact Optical Measurement System,” IJFMR240426484, vol. 6, no. 4, 2024, doi: <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i04.26484>.

EKLER

EK-1: ZEMAX Simülasyon Programı Optik Sistem Tasarım Parametreleri

System/Prescription Data

File : D:\PhD Thesis\Analizler\zemax\sistem4_basic_withoutFilter.zmx
Title:
Date : 4/3/2025

GENERAL LENS DATA:

Field Unpolarized : On
Convert thin film phase to ray equivalent : On
J/E Conversion Method : X Axis Reference
Glass Catalogs : LACROIX HIKARI FD1Y_CUSTOM
Temperature (C) : 2.00000E+01
Pressure (ATM) : 1.00000E+00
Adjust Index Data To Environment : Off
Primary Wavelength [μm] : 0.5875618
Lens Units : Millimeters
Source Units : Watts
Analysis Units : Watts/cm²
Afocal Mode Units : milliradians
MTF Units : cycles/millimeter

NSC SYSTEM DATA:

Maximum Intersections Per Ray : 100
Maximum Segments Per Ray : 500
Maximum Nested/Touching Objects : 10
Maximum Source File Rays In Memory : 1000000
Minimum Relative Ray Intensity : 1.0000E-03
Minimum Absolute Ray Intensity : 0.0000E+00
Glue Distance In Lens Units : 1.0000E-06
Missed Ray Draw Distance In Lens Units : 0.0000E+00

Wavelengths : 1

Units: μm

#	Value	Weight
1	0.587562	1.000000

Wavelengths : 1

Units: μm

#	Value	Weight
1	0.587562	1.000000

OBJECT DATA DETAIL:

There are 24 objects:

```

Object      1      :
Object Type      : Source Point (NSC_SRC_P)
Reference Object  : 0
Inside Of        : 0
XYZ Position     :           0           0
0
Tilt About XYZ   :           0           0
0
Pos. Mtrx. R11 R12 R13 X : 1.00000000E+00  0.00000000E+00  0.00000000E
+00  0.00000000E+00
Pos. Mtrx. R21 R22 R23 Y : 0.00000000E+00  1.00000000E+00  0.00000000E
+00  0.00000000E+00
Pos. Mtrx. R31 R32 R33 Z : 0.00000000E+00  0.00000000E+00  1.00000000E
+00  0.00000000E+00
Source uses system wavelengths
# Layout Rays      :           1000
# Analysis Rays    :          2000000
Power(Watts)       :           1
Wavenumber         :           0
Color #            :           0
Cone Angle         :           7

Object      2      :
Object Type      : Rectangular Volume (NSC_RBLK)
Face 0           : Side Faces
Face Is          : Object Default
Coating           : (none)
Scattering        : None
Face 1           : Front Face
Face Is          : Object Default
Coating           : (none)
Scattering        : Gaussian, sigma = 6.400000E-01
Scatter Fraction   : 0.9
Number of Scatter Rays : 50
Thin Window Scattering option not selected
Face 2           : Back Face
Face Is          : Object Default
Coating           : (none)
Scattering        : None
Reference Object   : 0
Inside Of         : 0
XYZ Position      :           0           0
2
Tilt About XYZ    :           0           0
0
Pos. Mtrx. R11 R12 R13 X : 1.00000000E+00  0.00000000E+00  0.00000000E
+00  0.00000000E+00
Pos. Mtrx. R21 R22 R23 Y : 0.00000000E+00  1.00000000E+00  0.00000000E
+00  0.00000000E+00
Pos. Mtrx. R31 R32 R33 Z : 0.00000000E+00  0.00000000E+00  1.00000000E
+00  2.00000000E+00

```

```

Material          : N-BK7
Index at 0.587562 μm = 1.51680003
X1 Half Width    : 2
Y1 Half Width    : 2
Z Length         : 1
X2 Half Width    : 2
Y2 Half Width    : 2
Front X Angle    : 0
Front Y Angle    : 0
Rear X Angle     : 0
Rear Y Angle     : 0

Object 3         :
Object Type      : Null Object (NSC_NULL)
Reference Object  : 0
Inside Of        : 0
XYZ Position     : 0 0 0
3
Tilt About XYZ   : 0 0 0
0
Pos. Mtrx. R11 R12 R13 X : 1.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E
+00 0.00000000E+00
Pos. Mtrx. R21 R22 R23 Y : 0.00000000E+00 1.00000000E+00 0.00000000E
+00 0.00000000E+00
Pos. Mtrx. R31 R32 R33 Z : 0.00000000E+00 0.00000000E+00 1.00000000E
+00 3.00000000E+00
Material         : ABSORB

Object 4         :
Object Type      : Annular Volume (NSC_AVOL)
Face 0           : Outside Face
Face Is          : Object Default
Coating          : (none)
Scattering       : None
Face 1           : Front Face
Face Is          : Object Default
Coating          : (none)
Scattering       : None
Face 2           : Back Face
Face Is          : Object Default
Coating          : (none)
Scattering       : None
Face 3           : Inside Face
Face Is          : Object Default
Coating          : (none)
Scattering       : None
Reference Object  : 3
Inside Of        : 3
XYZ Position     : 0 0 0
0
Tilt About XYZ   : 0 0 0

```

```

0
Pos. Mtrx. R11 R12 R13 X :    1.00000000E+00    0.00000000E+00    0.00000000E
+00    0.00000000E+00
Pos. Mtrx. R21 R22 R23 Y :    0.00000000E+00    1.00000000E+00    0.00000000E
+00    0.00000000E+00
Pos. Mtrx. R31 R32 R33 Z :    0.00000000E+00    0.00000000E+00    1.00000000E
+00    3.00000000E+00
Material                : ABSORB
Front X Min             :                0.2
Front Y Min             :                0.2
Rear X Min              :                0.2
Rear Y Min              :                0.2
Front X Max             :                2
Front Y Max             :                2
Rear X Max              :                2
Rear Y Max              :                2
Z Length                :                1
Front X Angle           :                0
Front Y Angle           :                0
Rear X Angle            :                0
Rear Y Angle            :                0

Object      5           :
Object Type           : Null Object (NSC_NULL)
Reference Object      : 4
Inside Of             : 4
XYZ Position          :                0                0
92
Tilt About XYZ        :                0                0
0
Pos. Mtrx. R11 R12 R13 X :    1.00000000E+00    0.00000000E+00    0.00000000E
+00    0.00000000E+00
Pos. Mtrx. R21 R22 R23 Y :    0.00000000E+00    1.00000000E+00    0.00000000E
+00    0.00000000E+00
Pos. Mtrx. R31 R32 R33 Z :    0.00000000E+00    0.00000000E+00    1.00000000E
+00    9.50000000E+01
Material              :
Index at    0.587562 µm = 1.00000000

Object      6           : LA1509-A.1
Object Type           : Standard Lens (NSC_SLEN)
Face 0               : Side Faces
Face Is              : Object Default
Coating               : (none)
Scattering            : None
Face 1               : Front Face
Face Is              : Object Default
Coating               : THORA
Scattering            : None
Face 2               : Back Face
Face Is              : Object Default

```

```

Coating           : THORA
Scattering        : None
Reference Object   : 5
Inside Of         : 0
XYZ Position      :           0           0
0
Tilt About XYZ    :           0          180
0
Pos. Mtrx. R11 R12 R13 X :  -1.00000000E+00    0.00000000E+00    0.00000000E
+00    0.00000000E+00
Pos. Mtrx. R21 R22 R23 Y :    0.00000000E+00    1.00000000E+00    0.00000000E
+00    0.00000000E+00
Pos. Mtrx. R31 R32 R33 Z :    0.00000000E+00    0.00000000E+00   -1.00000000E
+00    9.50000000E+01
Material          : N-BK7
Index at 0.587562  $\mu\text{m}$  = 1.51680003
Radius 1         :           51.5
Conic 1          :           0
Clear 1          :          12.7
Edge 1           :          12.7
Thickness        :          3.59
Radius 2         :           0
Conic 2          :           0
Clear 2          :          12.7
Edge 2           :          12.7

Object 7         :
Object Type      : Detector Rectangle (NSC_DETE)
Face 0          : All Faces
Face Is         : Object Default
Coating         : (none)
Scattering      : None
Reference Object : 6
Inside Of       : 0
XYZ Position    :           0           0
-2
Tilt About XYZ  :           0           0
0
Pos. Mtrx. R11 R12 R13 X :  -1.00000000E+00    0.00000000E+00    0.00000000E
+00    0.00000000E+00
Pos. Mtrx. R21 R22 R23 Y :    0.00000000E+00    1.00000000E+00    0.00000000E
+00    0.00000000E+00
Pos. Mtrx. R31 R32 R33 Z :    0.00000000E+00    0.00000000E+00   -1.00000000E
+00    9.70000000E+01
Material        :
Index at 0.587562  $\mu\text{m}$  = 1.00000000
X Half Width    :           15
Y Half Width    :           15
# X Pixels      :          1000
# Y Pixels      :          1000
Data Type       :           0

```

Color	:	0
Smoothing	:	0
Scale	:	0
Plot Scale	:	0
Front Only	:	0
PSF Wave #	:	0
X Angle Min	:	-90
X Angle Max	:	90
Y Angle Min	:	-90
Y Angle Max	:	90
Polarization	:	0
Mirroring	:	0
Object 8	:	
Object Type	:	Detector Rectangle (NSC_DETE)
Face 0	:	All Faces
Face Is	:	Object Default
Coating	:	(none)
Scattering	:	None
Reference Object	:	7