



Endüstriyel makine görmesi uygulamalarında kullanılabilir alan tabanlı çap ölçüm algoritması

Area based diameter measurement algorithm for industrial machine vision applications

Ahmet Gökhan Poyraz^{1,*} , Hasan Melih Kınacı² , Semih Alan³ , Mehmet Atak⁴ 

^{1,2,3,4} Doğu Pres R&D Center. Minareliçavuş, Manolya Cd. No:8, 16140 Nilüfer/Bursa, Türkiye

¹ Bursa Technical University, Electrical and Electronics Engineering Department, 16310 Bursa, Turkey

Öz

Pul tipli seri üretim parçalarının çap kontrollerinde hız avantajı sayesinde kameralı sistemler tercih edilmektedir. Bu sistemlerin başarısı kullanılan görüntü işleme algoritmasına ve ortam şartlarına bağlıdır. Ortam şartlarının elverişli olmaması sebebiyle alan tabanlı yaklaşımlar endüstriyel makine görmesi uygulamalarında tercih edilmemektedir. Bu makalede endüstriyel makine görmesi uygulamalarında kullanılabilir sanayi şartlarına dayanıklı alan tabanlı bir çap ölçüm algoritması önerilmiştir. Önerilen yöntemin başarısı, alt hesaplama metriği baz alınarak gösterilmiştir. Önerilen yöntemde ilk olarak elde edilen görüntünün üzerindeki gürültüler bağlı bileşen analizine göre temizlenir. Ardından elde edilen en büyük bileşenden iç ve dış bölgeler belirlenerek çaplar alan hesabına göre bulunur. Tasarlanan deney düzeneğinde lensleri değişebilen bir kameranın alt tarafına yüzeyel bir aydınlatma cihazı yerleştirilmiştir. Kameranın görüş alanında 3 farklı konumlama tipine göre toplamda 4 türden 40 adet pul, 3 farklı lens ile 20'şer defa ölçülmüştür. Deney sonuçlarına göre parçanın kamera altındaki konumunun tekrarlanabilirlik ölçümlerine büyük ölçüde etki ettiği gözlemlenmiştir. Rastgele konulamada alt hesaplama metriğinin (C) 2 olduğu gözlemlenmiştir. Endüstriyel şartları sağlayan sınırlı konulamada ise bu değer 5'e kadar çıktığı tespit edilmiştir. Yapılan testler, önerilen yöntemin hassas toleransa sahip iş parçalarının çaplarının endüstriyel ortamda ölçülebileceğini göstermiştir

Anahtar kelimeler: Görüntü işleme, Çap ölçümü, Kamera, Pul, Hassasiyet

1 Giriş

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte hassas kesme işlemi endüstride yapılabilir hale gelmiş ve yaygınlaşmıştır. Mikron mertebelerinde hassasiyete sahip parçalar artık yeni nesil kalıp ve tornalar sayesinde rahatlıkla üretilebilmektedir. Bu durum üretilen hassas parçaların boyutsal kontrollerini yapabilecek sistemlerin gelişmesine öncülük etmiştir. Hassas ölçüm sistemleri genel olarak optik kameralı ölçüm ve dokunsal ölçümler olarak ikiye ayrılabilir. Dokunsal ölçüm sistemlerinde hassas problemler parça üzerinde gezdirilerek prob üzerindeki basınç farkına

Abstract

Measurements of serial production workpieces in the industry are performed by camera-controlled systems thanks to the advantage of speed. The measurement success of camera systems largely depends on the measurement algorithm and ambient conditions. Area-based approaches are not preferred in industrial machine vision applications due to the undesired environmental conditions. In this paper, an area-based diameter measurement algorithm that can be used in industrial machine vision applications is proposed. The success of the proposed method is demonstrated based on the sub-computation metric. In the proposed method, firstly, the noise on the obtained image is cleaned according to the connected component analysis. Then, the inner and outer diameters of the largest component are determined according to the area calculation. In the designed experimental setup, a back lighting illumination has been preferred. According to 3 different positioning types in the field of view of the camera, a total of 40 stamps of 4 types were measured 20 times with 3 different lenses. According to the test results, it has been observed that the position of the part on the field of view greatly affects the repeatability measurements. Also, sub-computation metric (C) is measured 2 in random positioning. This value increases up to 5 in the limited positioning that meets the industrial conditions. Tests have shown that the proposed method can measure the diameters of workpieces with precise tolerances in an industrial setting.

Keywords: Image processing, Diameter measurement, Camera, O-ring, Sensitivity

göre ölçüm yapılmaktadır. Bu sistemlerde problemlerin ölçülen mesafe boyunca hareket etmesi gerekliliğinden ölçüm için belirli bir süreye ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla seri üretim hassas parçaların kontrolü yapılırken dokunmatik sistemler yerine optik kameralı sistemler daha avantajlıdır. Optik sistemlerin temelinde ise iş parçasının bir kamera yardımıyla görüntüsü alınarak ölçülecek büyüklüğü (çap, kalınlık vb.) yazılan algoritma ile tahmin edilmektedir. Kameralı sistemlerin en büyük avantajı ölçüm süresinin birkaç saniye veya daha da az olmasıdır. Kameralı ölçüm konusunda birçok uygulama ve yazılım bulunmaktadır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: agpoyraz@gmail.com (A. G. Poyraz)

Geliş / Received: 07.01.2022 Kabul / Accepted: 17.09.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1069442

Malamas vd. [1], kameralı endüstriyel görüş konusunda dünyadaki uygulamaları ve yazılımları irdelemiştir. Yaptıkları araştırmada yalnızca boyutsal değil, aynı zamanda yüzeysel ve yapısal özelliklerin kontrollerini de yapabilen sistemleri anlatmışlardır. Bazı araştırmacılar malzemelerin boyutsal ölçülerini kameralı kontrol sistemleri kullanarak tespit etmişlerdir (Öztürk vd. [2] ve Bal [3]). Moru vd. [4] üretilen dişli parçalarının kontrollerini kameralı sistemle ölçmeyi hedeflemişlerdir. Geliştirdikleri robotik tabanlı yazılım sistemi ile dişli parçasının birçok ölçüsünü bulabilmektedir. Wei vd. [5] shaft yarıçapını ölçmek için kameralı bir sistem kullanmışlardır. Yuvarlak tipteki halka, yüzük vb. parçaların en önemli ölçüsü yarıçaplarıdır. Birçok araştırmacı üretilen parçaların yarıçaplarını kameralı kontrol sistemleriyle ölçmüşlerdir (Eldessouki vd. [6]). Yarıçap ölçümünde Chunyang vd. [7] çizgi tabanlı bir algoritma benimsemiştir. Üretilen top mermisinin yarıçapını ölçerken istenen bölgeye düz bir çizgi çekmiş ve yarıçapı görüntü işleme teknolojisini kullanarak tahmin etmişlerdir. Araştırmacılar görüntüler üzerindeki parçaların yarıçap ölçümünü yapabilmek için genel olarak 2 temel algoritma kullanmışlardır. Bayram vd. [8] metal sektöründeki hatalı ürünlerin tespiti için dairesel hough dönüşümü kullanmışlardır. Üzerinde dairesel halkalar içeren metal levhaların halka çaplarını kontrol etmek için kamera kontrollü bir sistem tasarlamışlardır. Telepatil vd. [9] metal kütüklerin yarıçap ölçümlerini yaparken gradyan tabanlı dairesel hough dönüşümünü tercih etmişlerdir. Dairesel hough dönüşümünün yanında pikselleri saymaya dayanan alan tabanlı yarıçap ölçüm algoritmaları bulunmaktadır. Cömert vd. [10] ve Kadhun vd. [11] meyve resimleri üzerinden çap tahmini için alan tabanlı görüntü işleme algoritması kullanmışlardır. Öncelikle kenar bulma ve morfolojik işlemler uygulanarak şeklin sınırları belirlenmiş, ardından ikili resim elde edilerek alan tabanlı yöntem ile meyvelerin yarıçapları ölçülmüştür. Heydari vd. [12], 9-16 mm boyutlarındaki demir topakların çaplarını alan tabanlı algoritma kullanarak ölçmüşlerdir. Bununla birlikte, dar toleransa sahip parçaların kontrolü için oldukça hassas ölçüm yapabilen sistemler gerekmektedir. Shim vd. [13] ve Tan vd. [14] dar toleranslı parçalar için makine görmesi tabanlı yarıçap ölçüm sistemi kullanmışlardır. Haibing vd. [15] ring tipli parçalar için kübik interpolasyon tabanlı ölçüm algoritması geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada öncelikle kenar tespiti için gürültüye dayanıklı matematiksel morfolojik işlem tabanlı bir yöntem kullanmışlardır. Sundukları sonuçlara göre kablo çapı için ölçüm hatası yaklaşık $\pm 15 \mu\text{m}$ 'dir. Xie vd. [16] endüstriyel parçaların boyutsal ölçümleri için Zernike moment tabanlı yöntem benimsemişlerdir. İlk olarak Robert kenar bulma metodunu kullanarak kenar noktalarını kabaca belirleyip ardından Zernike moment ile bu noktaları hem yön hem de pozisyon açısından daha da hassaslaştırarak ölçüm gerçekleştirmişlerdir. Yan vd. [17] tüp şeklindeki iş parçasının iç çapını kenar tespiti yaptıktan sonra interpolasyon yaparak ölçmeyi hedeflemişlerdir. Yaptıkları çalışmada 0.3 piksel ölçüm belirsizliğine erişmişlerdir. Haibing vd. [18] kübik interpolasyon tabanlı bir çap ölçüm yöntemi önermiştir. Uyguladığı yöntemde $\pm 100\mu\text{m}$

belirsizlik elde etmiştir. Liu vd. [19] bulanık kenarlara sahip görüntülerde çember tespit eden bir yöntem önermiştir.

Kameralı ölçüm sistemlerinde sistemin başarısı tekrarlanabilirlik testleriyle ölçülebilir. Seçilen iş parçası sistem üzerinde tekrar tekrar ölçülür. Yapılan ölçümlerin birbirlerine yakın olması beklenen durumdur. Aynı iş parçası için ölçüm değerlerinin birbirlerine yakın olması sistemin başarısını göstermektedir. Farklı kamera-lens kombinasyonlarında mm türünden aynı ölçüm hassasiyeti elde edilebilir. Ancak parçanın gerçek değerinin bulunması için kalibrasyon yapılması gerekmektedir. Bu da beraberinde kalibrasyon hatasını getirir. Değişmeyecek olan metrik ise yarıçapın piksel türünden karşılığıdır. 1 pikselin karşılık geldiği mm uzunluğu bilindiği müddetçe mm türünden ölçüm hassasiyeti bulunabilir. Dolayısıyla ölçümlerin lensten ve kameradan bağımsız olabilmesi adına milimetre türünden uzunluk yerine piksel türünden uzunluk tercih edilebilir. Bu çalışmada önerilen yöntemin başarısı ölçülürken kalibrasyondan gelebilecek hatalardan ötürü piksel cinsinden uzunluk baz alınmıştır. Böylelikle sistemin başarısı daha net bir şekilde ortaya konulmuştur. Alan tabanlı algoritmalarda ölçüm hassasiyeti bütün alana bakıldığından 1 pikselden küçük olabilmektedir. Hassasiyetin 1 pikselin ne kadar altında olduğu alt hesaplama metriği ile gösterilebilir. Alt hesaplama metriğinin yüksek olması sistemin başarısını göstermektedir.

Endüstriyel ortamda üretilen iş parçaları üzerinde üretim süreçlerinden kaynaklı olarak yağ, su, çapak vb. gibi ölçüme olumsuz etki edebilecek gürültüler bulunabilmektedir. Bu etkenler yıkama işlemleriyle giderilmeye çalışılsa da her parça istenen temizlikle olmamaktadır. Ayrıca parçaların tozlu olması ya da dışarıdan gelebilecek ışık gürültüsü ölçüm sonuçlarını saptırabilmektedir. Bu makalede endüstriyel görüntü işleme alanında kullanılacak ortam şartlarına dayanıklı alan tabanlı bir çap ölçüm algoritması önerilmektedir. Önerilen yöntem ile dışarıdan gelebilecek gürültüler giderilerek ölçümler daha doğru bir şekilde yapılmaktadır. Geliştirilen yöntem için 1 adet yüzeysel aydınlatma, üç farklı görüş alanına sahip telesentrik lensler ve bir adet 10 megapiksel endüstriyel tipli bir kamera kullanılarak deney sistemi oluşturulmuştur. Oluşturulan sistemde 4 farklı çapa sahip 40 adet pul parçası önerilen algoritma ile ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları piksel türünden hesaplanmıştır. Önerilen yöntemin başarısı, alt hesaplama metriği baz alınarak gösterilmiştir. Ek olarak ölçüm parçalarının görüş alanındaki konumunun çap ölçüm hassasiyetine etkisi 3 farklı deneyle incelenmiştir. Önerilen yöntem, hem ham görüntüdeki istenmeyen gürültülerin giderilmesini sağlaması açısından hem de alan tabanlı yaklaşımı endüstriyel makine görmesi uygulamasında kullanması açısından yenilik barındırmaktadır.

2 Materyal ve metot

2.1 Deneysel kurulum

Oluşturulan yöntemin testleri için gerçek endüstriyel ekipmanlar kullanılarak deney düzeneği tasarlanmıştır. (Şekil 1). İş parçalarının toleransları oldukça dar olduğundan (0.1-0.025 mm aralığında) gerekli hassasiyete erişebilmek için elde edilen görüntünün net olması ve dış ortamdaki

gürültülerden etkilenmemesi gerekmektedir. Klasik kamera ve lensler ile elde edilen görüntülerde balıkgözü etkisi oluşabilmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada en düzgün görüntüyü alabilmek için endüstriyel tipte bir kamera ve telesentrik lens kullanılmıştır (Şekil 1). Telesentrik lensler ile görüntülerde oluşan balıkgözü etkisi ve dışarıdan gelebilecek gürültüler elimine edilmektedir. İş parçasının sınırlarını belirleyebilmek için parçanın alt tarafına yüzeyel bir ışık kaynağı konulmuştur. Bu ışık kaynağı ile aynı zamanda dışarıdan gelen ışık gürültüleri de engellenmiştir.

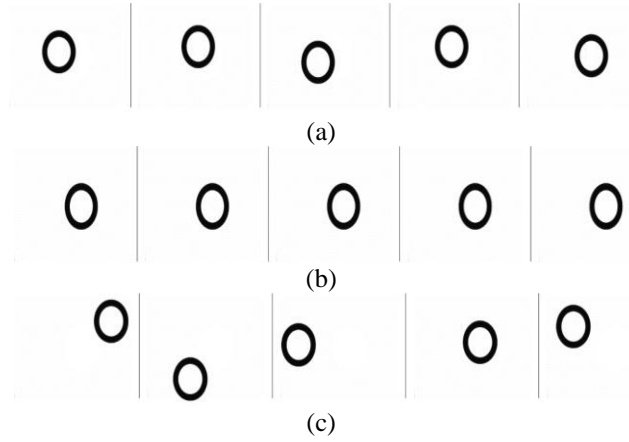
Tasarlanan sistem ile elde edilen görüntülerde ölçüm pulları tamamen siyah diğer bölgeler ise tamamen beyaz olmaktadır. Böylelikle yapılan eşikleme işlemi yüksek hassasiyetle gerçekleştirilmiştir. Parça ile kamera arasındaki mesafe kameraya takılı olan telesentrik lensin çalışma özelliğine göre değişiklik göstermektedir. Işık kaynağı ise her test için sabit konumda duracak şekilde tasarlanmıştır. Kamera ile ışık kaynağı arasına yerleştirilen parçaların görüntüsü MATLAB programı vasıtasıyla elde edilip işlenmiştir. Kamera olarak 3840x2748 piksel çözünürlüklü ve "rolling shutter" özellikli IDS marka kamera kullanılmıştır. Kameraya uyumlu olarak 3 farklı görüş alanına sahip telesentrik lensler deneylerde kullanılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Kullanılan telesentrik lenslerin özellikleri

Lens Adı	Lens 1	Lens 2	Lens 3
Görüş Alanı (mm)	36.16 × 27.12	42.54 × 31.94	25.10 × 18.82

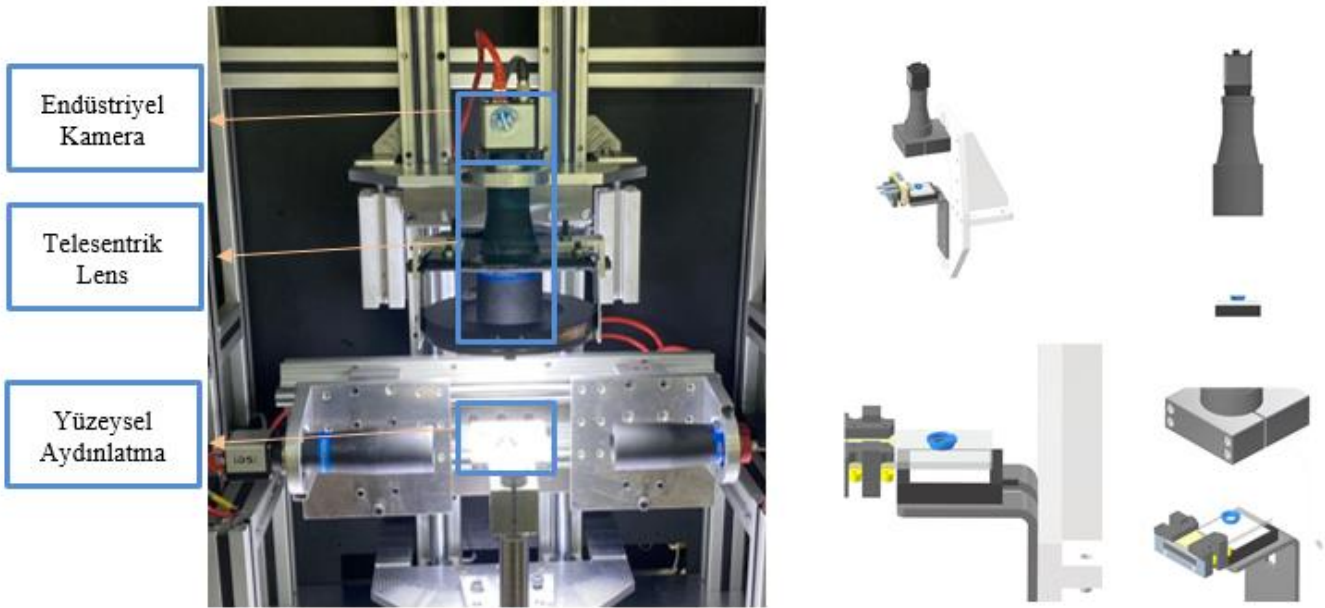
Sistemin ölçüm hassasiyetini belirlemek ve parça konumunun ölçüm hassasiyetine etkisini bulabilmek için iş

parçalarının sabit, rastgele ve sınırlı bölgede konumlandırıldığı üç ana deney gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).

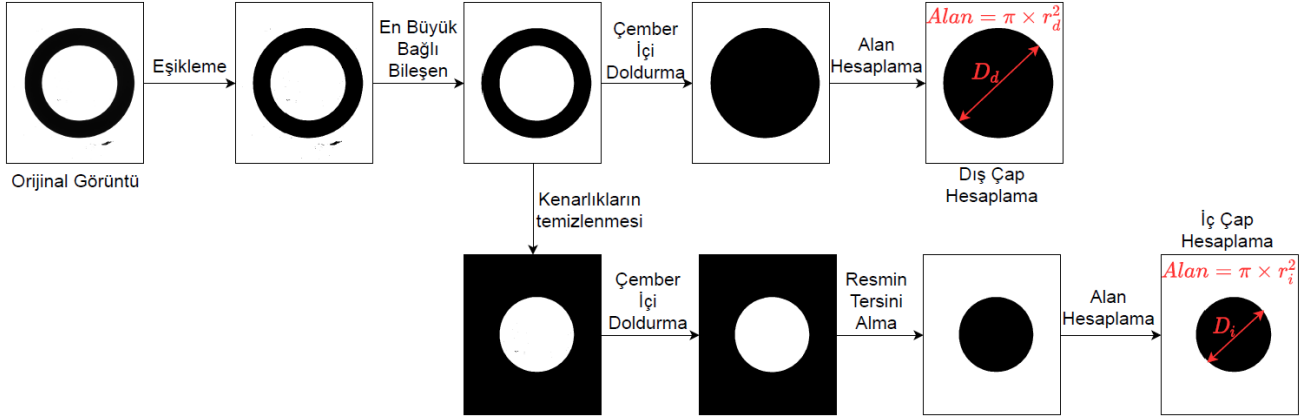


Şekil 2. Konumlanma durumlarına göre aynı pul için tekrar eden örnek test resimleri (a) sınırlı alan, (b) sabit (c) rastgele

Endüstriyel ölçüm uygulamalarında kullanılan ve iş parçasını ölçüm bölgesine yönlendiren piston veya iticilerin konumsal hassasiyeti nedeniyle, iş parçaları her seferinde aynı noktaya konumlandırılmamaktadır. Bu sebepten iş parçalarını tamamen aynı noktada konumlandırmak çoğunlukla mümkün olmamaktadır. Yapılan deneylerin gerçekçi olabilmesi açısından sabit konumlanmanın yanı sıra rastgele konumlanma ve sınırlı bölgede konumlanma deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler ile parçanın az ve fazla hareket ettiği gerçek uygulamalar incelenmiştir



Şekil 1. Deneylerin gerçekleştirildiği deney düzeneği tasarımı



Şekil 3. Görüntü işleme adımları

Her üç deney için de dört farklı tipteki toplam 40 adet pulun her biri için 20 tekrarlı olacak şekilde ölçümler gerçekleştirilmiştir (Tablo 2). Her bir görüntüdeki pulun çap uzunlukları piksel türünden hesaplanmıştır. Elde edilen bütün görüntülerde parçaların hem iç hem de dış çapı görüş alanında olmasından ötürü aynı görüntüler kullanılarak hem iç hem dış çap hesabı gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan pulların adetleri ve özellikleri

İsim	Pul 1	Pul 2	Pul 3	Pul 4
Adet	10	10	10	10
İç Çap Ölçüsü (mm)	9.50	6.20	4.52	11.57
Dış Çap Ölçüsü (mm)	13.92	11.06	7.65	19

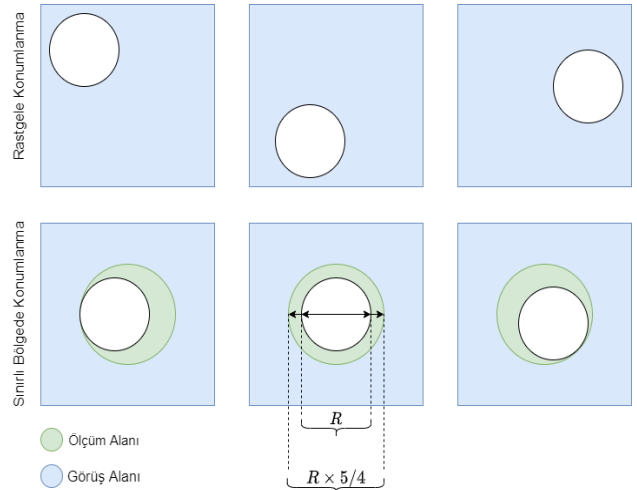
Parçanın kamera altında bulunduğu konuma göre Sabit Konumlama, Rastgele Konumlama ve Sınırlı Bölgede Konumlama olmak üzere üç tipte test gerçekleştirilmiştir. Sabit konumlama testinde kamera altına konulan parça yerinden hiç hareket ettirilmeden aralarında 1'er saniyelik bekleme ile 20 adet görüntüsü alınmıştır. Rastgele konulamada parça, kameranın görüş alanında rastgele konumlarda olacak şekilde görüntüsü alınmıştır.

Sınırlı alanda konulamada ise parça, kendisinin çapından 5/4 kadar büyüklükte bir çapa sahip alanda konumlandırılmıştır (Şekil 4). Bu testler sayesinde yüzeyel ışık kaynağı kullanıldığı zaman parça konumunun ölçüme ne kadar etki ettiği tespit edilmiştir. Sınırlı Bölgede Konumlama testinde amaç parçanın tanımlanan alan içerisinde olduğu durumdaki ölçüm sonuçlarını gözlemlemektir. Bunu sağlayabilmek adına ölçülecek parçanın çapının 5/4 kadar büyüklükte bir çapa sahip sanal daire oluşturulmuştur. İş parçası, oluşan bu sanal daire içerisinde yer değiştirilerek ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Böylelikle parçanın konumu her seferinde birbirlerine yakın olmakta ve endüstriyel koşullar sağlanabilmektedir

Deney Prosedürü:

1. Lens takılır,

2. Parçaya göre lensin uzaklığı ayarlanır ve sabitlenir,
3. Parça kameranın görüş alanında olmak üzere:
 - 3.1 Test-1 için rastgele konumlanarak,
 - 3.2 Test-2 için sabit konumlanarak,
 - 3.3 Test-3 için sınırlı bölgede konumlanarak 20'şer adet görüntüsü alınır,
- 4 Görüntü işleme algoritması uygulanarak çap değeri piksel türünden elde edilir,



Şekil 4. Rastgele konumlama ve sınırlı bölgede konumlama için ölçüm alanları

- 5 Aynı parça için elde edilen 20 adet çaptan maksimum ve minimum arasındaki fark belirlenir.
- 6 Bu işlem seçilen 4 türden toplam 40 adet parçanın her birinin iç ve dış çapı için uygulanır.

2.2 Alan tabanlı ölçüm algoritması

Oluşturulan düzener ile elde edilen görüntüler her ne kadar görüntüsüz beklense de resim üzerinde ölçüm camının kirli olmasından, tozdan ya da kamera sensörünün hatasından ötürü bazı ufak boyutlarda (1-25 piksel) siyah bölgeler oluşmaktadır. Bu sebeple nihai bir ürün oluşturulduğunda camın sürekli temiz kalması

beklenmemelidir. Dolayısıyla etraftaki tozdan, kirden ya da öngörülemeyecek gürültülerden kaynaklanan hataları giderebilmek için bütün-bağlı bileşen analizine dayalı ön bir görüntü işleme adımı benimsenmiştir (Şekil 3).

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (1)$$

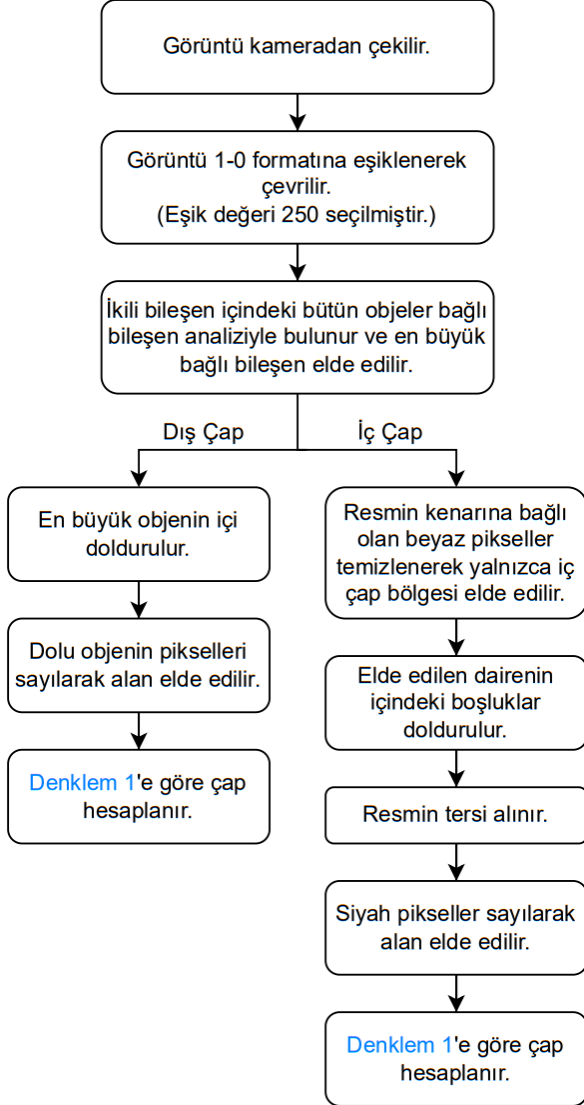
Alan tabanlı yaklaşım tercih edilerek ölçüm hassasiyetinin 1 pikselin altına inmesi amaçlanmıştır. Böylelikle hem iki nokta arası ölçüme göre daha hassas ölçüm yapılabilen hem de iş parçasının bölgesel değişkenliklerinden etkilenmemektedir. Ayrıca ön işleme adımıyla ham görüntüdeki istenmeyen etkilerden büyük oranda sıyrılmaktadır. Bu çalışmada siyah-beyaz özellikli bir kamera kullanıldığından RGB renk kanallarından gri seviyeye çevirme adımı eklenmemiştir. Araştırmacılar renkli kamera tercih etmesi durumunda gri seviyeye çevirerek ölçüm gerçekleştirebilir. Önerilen yöntem, resimdeki istenmeyen gürültüleri bağlı bileşen analiziyle gidermesi ve endüstriyel şartlara uygun olması açısından yenilik barındırmaktadır. Araştırmacılar, önerilen yaklaşımdaki ön işleme adımlarını kendi yöntemlerini geliştirmek için de tercih edebilirler

2.3 Kamera-lens ikilisinin ölçüm belirsizliği

Bir objenin boyutunu kameralı sistemlerde ölçerken genellikle gerçek boyutu bilinen bir referans parçasına ihtiyaç duyulmaktadır. Gerçek boyutu bilinen bir parça görüntüsünün resim üzerinde kaç adet piksel karşılık geldiği bir eşikleme işlemiyle bulunabilmektedir. Bu değer kullanılarak mm/piksel değeri Denklem 2'deki gibi hesaplanmaktadır. Kameranın görüş alanı ve çözünürlüğü en temelde ölçüm hassasiyetini mm türünden belirlemektedir. Bu hassasiyet 1 piksel karşılık gelen mm türünden ifade edilecek olursa şu şekilde yazılabilir:

$$\text{mm/piksel} = \frac{\text{Uzunluk}}{\text{Piksel Sayısı}} \quad (2)$$

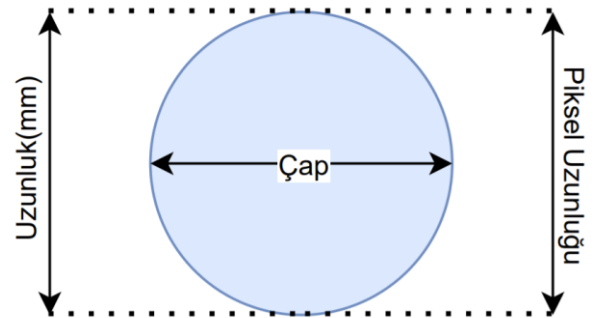
Buradaki *Uzunluk*, değeri bilinen parçanın mm türünden çapı, *Piksel Uzunluğu* ise mm değeri bilinen parçanın piksel türünden uzunluğudur (Şekil 6). Örneğin 20 mm lik çapa sahip bir parçanın karşılık gelen piksel değeri 2000 piksel olduğunda *mm/piksel* değeri $20 / 2000 = 0.01$ mm yani 10 mikrondur. Bu değer sistemin 1 pikselde değiştiği uzunluk ve kamera-lens ikilisinin 1 pikseldeki değişimini verir.



Şekil 5. Görüntü işleme algoritması akış diyagramı

Resimdeki bütün bağlı bileşenler eşikleme işleminden sonra belirlenir. Ardından iç ve dış çap için ayrı olacak şekilde en büyük bağlı bileşen seçilerek istenen daire seçilmiş olunur. Elde edilen görüntülerde en büyük bağlı bileşenin iş parçası olduğu varsayılmıştır. Elde edilen görüntüden hem iç hem de dış çap için çap ölçümü alana bakılarak tahmin edilebilmektedir. Görüntü işleme algoritması akış diyagramı Şekil 5'te verilmiştir.

Şekil 3'te verilen D_i parçanın iç çapını, D_d ise parçanın dış çapını göstermektedir. Görüntü üzerindeki yuvarlak bir parçanın çapı D tahmin edilirken, Denklem 1'de verilen alan A ve pi sayısı kullanılmaktadır. 1 denklemindeki değerler piksel cinsindedir.



Şekil 6. Değeri bilinen parça ile mm/pikselin hesaplanması

Ayrıca parça boyutundan bağımsız, kamera çözünürlüğüne ve kameranın görüş alanına bağlıdır. **Denklem 2** kullanılarak 1 piksele karşılık gelen mm mesafesi bulunmaktadır. *mm/piksel* değeri bulunduktan sonra eğer kamera ile obje arasındaki mesafe sabitse gerçek boyutu bilinmeyen bir nesnenin boyutu tahmin edilebilmektedir. **Denklem 2**'deki *mm/piksel* oranı bilindiği durumda mm cinsinden gerçek ölçüm **Denklem 3** kullanılarak tahmin edilmektedir.

$$\text{Tahmini mm} = D \times \frac{\text{mm}}{\text{piksel}} \quad (3)$$

Burada D değeri, algoritmanın tahmin ettiği piksel türünden uzunluğu, *mm/piksel* kamera-lens ikilisinde 1 piksele karşılık gelen mm değerini ve Tahmini mm bulunan tahmini gerçek ölçüm sonucunu göstermektedir. *mm/piksel* oranı donanım özelliğinden, D değeri yazılımdan gelmektedir. Dolayısıyla sabit bir donanımda D değerinin hassaslaştırılması algoritmanın başarısını arttırmaktadır. Önerilen alan tabanlı yöntemde bütün pikseller hesaba katıldığından ölçüm hassasiyetinde 1 pikselin altına inmemize olanak sağlamaktadır. Algoritmanın ne oranda 1 pikselden daha hassas belirsizliği olduğunu bulabilmek için alt hesaplama metriği baz alınmıştır.

2.4 Alt hesaplama metriği

Makine görmesi uygulamalarında ölçüm gerçekleştirilirken genellikle kullanılan yaklaşım iki nokta arasındaki mesafenin ölçülmesidir. Dolayısıyla ölçüm hatası 1'er piksel artar ya da azalır. Bu durumda ölçüm belirsizliği 1 pikseldir. Birim piksele karşılık gelen gerçek ölçüm değeri ise seçilen lens ve kameraya bağlı olarak **Denklem (2)**'deki gibi hesaplanabilmektedir. Ancak sistemin yaklaşık ölçüm hatasını tespit edebilmek için gerçek ölçüsü bilinen birçok parça ile tekrarlanabilirlik testi yapılması gerekmektedir. Bu durum her kamera-lens ikilisinde tekrarlanmalıdır. Ölçüm hassasiyeti gelişmiş algoritmalarda 1 pikselin altına inebilmektedir. Ölçüm hassasiyetinin ne oranda 1 pikselin altına indiğini gösteren metrik alt hesaplama metriği C olarak tanımlanabilir. C değeri tekrarlanabilirlik testleriyle belirlenmektedir (**Şekil 7**). Aynı iş parçasının tekrarlı ölçümlerindeki piksel türünden ölçüm farkı, bize 1/C değerini vermektedir (**Denklem 4**).

$$\text{Maksimum Ölçüm} - \text{Minimum Ölçüm} = \frac{1}{C} \quad (4)$$

Dolayısıyla alt hesaplama metriğinin 5 olduğu bir yöntemde ölçüm hassasiyeti 0.2 pikseldir. Alt hesaplama metriği C olmak üzere sistemin ölçüm belirsizliği mm cinsinden şu şekilde yazılabilir:

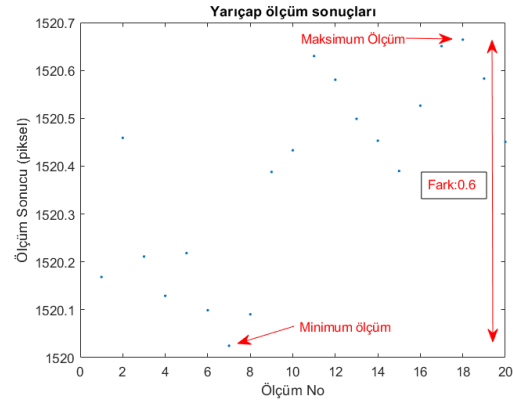
$$\text{Belirsizlik} = \frac{\text{mm}}{\text{piksel}} \div C \quad (5)$$

C değeri kameradan ve lensten bağımsız olarak sadece ölçüm algoritmasına bağlıdır. Bu değer bize sistemin ölçüm

belirsizliğini direkt olarak piksel türünden verecektir. C değeri, ölçüm algoritmasının ne oranda 1 pikselin altına inemediğini göstermektedir. Ayrıca bu değer kullanılarak, oluşturulacak yeni bir makine görmesi sisteminde olması gereken *mm/piksel* oranını önceden belirlemek mümkündür. Bu durum seçilecek kamera-lens ikilisinin uygun maliyetlerde belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Örneğin, ± 0.050 mm toleranslara sahip 20 mm çapındaki yuvarlak bir pul parçası için belirsizliğin en az ± 0.005 mm (onda biri) olması gerekir. Donanım özelliğinden gelen *mm/piksel* oranının 0.025 olması durumunda istenen toleransın ölçülebilmesi için C değerinin 5 olması gerekir.

3 Bulgular ve tartışma

Seçilen her bir pul parçasının 20'şer kez Sabit Konumlama, Rastgele Konumlama ve Sınırlı Bölgede Konumlama olmak üzere görüntüleri alınmıştır. Önerilen yöntem bu görüntüler üzerinde çalıştırılarak çap değerleri piksel türünde üretilmiştir. Örnek ölçüm sonucu **Şekil 7**'de gösterilmiştir. Her bir pul parçasının ölçümünde elde edilen maksimum ve minimum çap ölçümleri arasındaki fark hesaplanmıştır. Bu fark ölçümün tekrarlanabilirlik hatasını göstermektedir.



Şekil 7. Piksel cinsinden örnek çap ölçüm sonuçları (20 tekrar)

Örneğin **Şekil 7**'de verilen ölçümler için çap maksimum 1520.6 iken minimum ölçülen çap 1520.0 pikseldir. Yirmi ölçüm için sistemin ölçüm hatası 0.6 piksel olarak belirlenebilir. Çünkü aynı sistemle benzer konumda çekilen aynı pul için 0,6 piksellik bir fark oluşmuştur. Örneği verilen bu test toplamda 4 türden 40 adet pul için gerçekleştirilip sonuçları elde edilmiştir (**Tablo 3-4-5-6-7-8**). Parça isimleri Tip1, Tip2, Tip3 ve Tip4 olarak isimlendirilmiştir. **Tablo 3-4-5-6-7-8**'de 20 tekrarlı ölçümler için aralarında en çok ölçüm farkı bulunan parçanın fark değeri koyu olarak belirtilmiştir.

Ölçüm sonuçlarına göre iç ve dış çap ölçümlerinde özellikle rastgele konumlama büyük bir farklılık bulunmaktadır. Gerçekleştirilen deneylerde yüzey ışık kaynağı kullanılması nedeniyle kameraya gelen gölgenin boyutu konuma bağlı olarak değişmektedir. Bu değişim ölçüm farklarına sebep olmaktadır. Parçaların iç çapları doğal olarak dış çaplarından küçük olduğu için parça hareket miktarı değişmektedir

Tablo 3. Rastgele konumlamada iç çap için maks ve min ölçüm farkları

Parça No	Lens-1				Lens-2				Lens-3		
	Tip1	Tip2	Tip3	Tip4	Tip1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 1	Tip 2	Tip 3
1	0.59	0.23	0.65	0.40	0.24	0.35	0.42	0.79	0.43	0.24	0.29
2	0.42	0.42	0.43	0.43	0.50	0.36	0.40	0.64	0.34	0.33	0.28
3	0.43	0.34	0.29	0.51	0.45	0.37	0.28	0.79	0.31	0.26	0.26
4	0.37	0.36	0.36	0.49	0.46	0.21	0.34	1.02	0.45	0.24	0.25
5	0.41	0.46	0.69	0.39	0.36	0.24	0.37	0.72	0.34	0.21	0.26
6	0.57	0.47	0.48	0.50	0.36	0.24	0.41	1.15	0.36	0.30	0.34
7	0.58	0.50	0.65	0.35	0.66	0.36	0.31	0.80	0.28	0.31	0.80
8	0.31	0.44	0.70	0.35	0.56	0.35	0.44	1.03	0.27	0.29	0.31
9	0.52	0.53	0.36	0.37	0.36	0.69	0.34	0.75	0.29	0.26	0.21
10	0.44	0.43	0.45	0.36	0.37	0.42	0.40	0.59	0.27	0.26	0.35
Ort.	0.46	0.42	0.51	0.41	0.43	0.36	0.37	0.83	0.34	0.27	0.33

Tablo 4. Rastgele konumlamada dış çap için maks ve min ölçüm farkları

Parça No	Lens-1				Lens-2				Lens-3		
	Tip1	Tip2	Tip3	Tip4	Tip1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 1	Tip 2	Tip 3
1	0.39	0.36	0.48	0.50	0.82	0.22	0.56	0.96	0.84	0.80	0.62
2	0.36	0.27	0.19	0.43	1.34	0.26	0.24	0.94	0.80	1.09	0.46
3	0.31	0.34	0.23	0.66	0.91	0.30	0.37	0.82	1.05	0.96	0.58
4	0.21	0.26	0.25	0.59	1.20	0.30	0.22	1.46	1.32	0.61	0.61
5	0.24	0.61	0.39	0.44	0.81	0.26	0.56	0.88	0.94	0.64	0.71
6	0.19	0.35	0.43	0.69	1.01	0.25	0.23	1.02	1.22	0.94	0.89
7	0.30	0.53	0.56	0.43	1.30	0.71	0.17	1.41	0.82	1.38	0.41
8	0.26	0.36	0.49	0.49	0.98	0.32	0.25	1.17	0.90	0.89	0.77
9	0.40	0.48	0.28	0.21	0.94	0.57	0.30	1.40	1.20	1.26	0.60
10	0.29	0.37	0.40	0.41	0.83	0.29	0.31	1.03	0.90	0.96	0.59
Ort.	0.29	0.39	0.37	0.48	1.01	0.35	0.32	1.10	1.00	0.95	0.63

Tablo 5. Sabit konumlamada iç çap için maks ve min ölçüm farkları

Parça No	Lens-1				Lens-2				Lens-3		
	Tip1	Tip2	Tip3	Tip4	Tip1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 1	Tip 2	Tip 3
1	0.06	0.07	0.03	0.03	0.02	0.03	0.09	0.05	0.03	0.03	0.03
2	0.06	0.04	0.02	0.05	0.03	0.03	0.12	0.03	0.02	0.03	0.04
3	0.04	0.05	0.03	0.03	0.01	0.05	0.03	0.05	0.04	0.04	0.02
4	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	0.04	0.08
5	0.05	0.10	0.03	0.07	0.04	0.05	0.07	0.03	0.03	0.03	0.08
6	0.08	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06	0.06	0.09	0.05	0.05	0.04
7	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.07	0.11	0.07	0.04	0.05	0.02
8	0.08	0.07	0.03	0.02	0.02	0.06	0.05	0.05	0.02	0.04	0.03
9	0.03	0.03	0.05	0.02	0.04	0.05	0.09	0.06	0.03	0.02	0.05
10	0.04	0.13	0.03	0.02	0.04	0.05	0.06	0.06	0.03	0.02	0.03
Ort.	0.05	0.06	0.03	0.03	0.03	0.05	0.07	0.05	0.03	0.04	0.04

Tablo 6. Sabit konumlamada dış çap için maks ve min ölçüm farkları

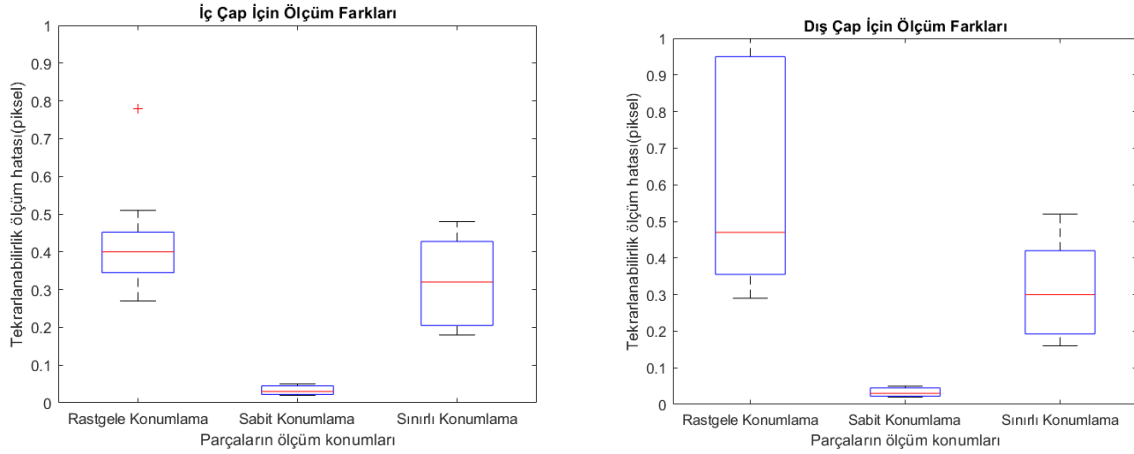
Parça No	Lens-1				Lens-2				Lens-3		
	Tip1	Tip2	Tip3	Tip4	Tip1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 1	Tip 2	Tip 3
1	0.10	0.10	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.04	0.02	0.04
2	0.05	0.03	0.03	0.05	0.02	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04
3	0.02	0.04	0.02	0.06	0.01	0.04	0.02	0.04	0.03	0.02	0.04
4	0.03	0.04	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02
5	0.03	0.10	0.03	0.08	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03
6	0.08	0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02
7	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
8	0.07	0.08	0.02	0.02	0.02	0.06	0.03	0.03	0.06	0.02	0.02
9	0.05	0.04	0.02	0.03	0.04	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03
10	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.09	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03
Ort.	0.05	0.05	0.02	0.04	0.02	0.05	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03

Tablo 7. Sınırlı bölgede konumlama için iç çap için maks ve min ölçüm farkları

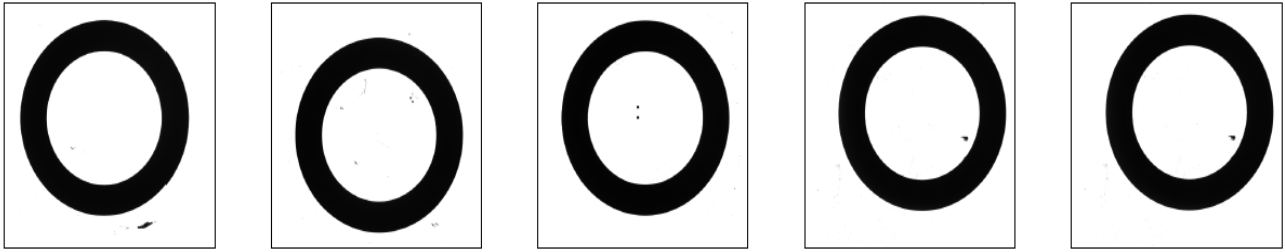
Parça No	Lens-1				Lens-2				Lens-3		
	Tip1	Tip2	Tip3	Tip4	Tip1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 1	Tip 2	Tip 3
1	0.43	0.50	0.20	0.36	0.17	0.08	0.21	0.21	0.26	0.31	0.11
2	0.57	0.29	0.25	0.33	0.14	0.15	0.22	0.15	0.40	0.86	0.60
3	0.38	0.28	0.47	0.38	0.16	0.26	0.12	0.16	0.37	0.41	0.65
4	0.51	0.29	0.44	0.67	0.31	0.16	0.25	0.50	0.27	0.56	0.57
5	0.57	0.18	0.20	0.63	0.17	0.22	0.23	0.25	0.40	0.49	0.41
6	0.35	0.51	0.18	0.51	0.17	0.18	0.18	0.15	0.64	0.17	0.40
7	0.32	0.27	0.40	0.45	0.16	0.18	0.18	0.26	0.82	0.20	0.44
8	0.28	0.27	0.37	0.34	0.22	0.18	0.15	0.20	0.41	0.40	0.64
9	0.50	0.44	0.40	0.30	0.12	0.15	0.26	0.17	0.39	0.34	0.54
10	0.38	0.15	0.35	0.40	0.29	0.19	0.21	0.20	0.23	0.44	0.51
Ort.	0.43	0.32	0.32	0.44	0.19	0.18	0.2	0.22	0.42	0.42	0.48

Tablo 8. Sınırlı bölgede konumlama için dış çap için maks ve min ölçüm farkları

Parça No	Lens-1				Lens-2				Lens-3		
	Tip1	Tip2	Tip3	Tip4	Tip1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 1	Tip 2	Tip 3
1	0.35	0.42	0.24	0.25	0.21	0.25	0.15	0.12	0.20	0.20	0.34
2	0.40	0.31	0.17	0.55	0.15	0.24	0.24	0.14	0.42	0.56	0.56
3	0.31	0.36	0.28	0.55	0.19	0.12	0.10	0.12	0.28	0.39	0.96
4	0.48	0.35	0.45	0.62	0.20	0.21	0.19	0.18	0.32	0.53	0.35
5	0.38	0.14	0.23	0.70	0.31	0.17	0.19	0.25	0.33	0.69	0.42
6	0.30	0.33	0.16	0.73	0.18	0.10	0.17	0.20	0.41	0.41	0.55
7	0.25	0.20	0.43	0.50	0.20	0.17	0.11	0.24	0.44	0.29	0.36
8	0.40	0.12	0.24	0.40	0.22	0.16	0.20	0.12	0.14	0.57	0.77
9	0.37	0.32	0.45	0.41	0.16	0.26	0.14	0.13	0.43	0.29	0.36
10	0.35	0.12	0.32	0.46	0.21	0.18	0.18	0.16	0.19	0.53	0.49
Ort.	0.36	0.27	0.30	0.52	0.20	0.19	0.16	0.17	0.42	0.42	0.52



Şekil 8. Piksel türünden ortalama çap ölçüm belirsizliği. (Tablo 3-4-5-6-7-8’deki ortalama verilerden elde edilmiştir.)



Şekil 9. Deneysel düzeneğinden elde edilen kirli görüntüler

Parçalar hareket ettiğinde iç çaplar dış çaplara göre daha az hareket etmektedirler. Bu sebepten ötürü dış çap ölçüm farkı iç çap ölçüm farkına göre daha yüksek olmaktadır. Bu çalışmada ele alınan parçalar için, Tablo 3-4-5-6-7-8’in ortalama verileri Şekil 8’de gösterilmiştir. Şekil 8’de rastgele konumlanmış parçaların iç çap ölçüm hassasiyetleri ortalama olarak 0.4 civarında toplanmışken, yine rastgele konumlanmış parçaların dış çap ölçüm hassasiyetleri ortalama 0.5 olup 0.9-1 piksele kadar çıkmaktadır. Eğer yalnızca iç çap ölçümü yapılacaksa rastgele konumlama durumunda bile hassasiyet 0.4 piksel mertebesinde kalmıştır.

Parçanın, kameranın görüş alanındaki değişen konumu ne kadar az ise ölçüm hassasiyeti o kadar iyi olmaktadır. Ölçümün tekrarlanabilirliği irdelendiğinde, ölçüm hassasiyetini düşürmek için parçanın her seferinde dar bir bölge içerisinde konumlandırılması gerektiği belirlenmiştir. Ayrıca maksimum hassasiyetin aynı konumdaki ölçümlerde elde edilebildiği gözlemlenmiştir. İç çap ölçümünde Rastgele Konumlama için ortalama belirsizlik 0.4 piksel mertebesinde kümelenmiş iken, Sınırlı Bölgede Konumlama için yapılan ölçümlerde ortalama belirsizlik 0.3 piksel mertebesinde, maksimum değerleri aynı olacak şekilde sifira doğru yayılmıştır. En büyük fark ise dış çaplar için Rastgele Konumlama ve Sınırlı Bölgede Konumlama ölçümlerinde gözlemlenmiştir. Dış çap için Rastgele Konumlama ölçümlerinde 1 piksele yakın bir belirsizlik görülmekte iken bu durum Sınırlı Bölgede Konumlama ölçümlerinde 0.3 piksel civarına inmektedir. Sabit Konumlama ölçümlerinde parça hiç hareket ettirilmeden 20’şer defa pozlandığından,

bu ölçümler endüstriyel uygulamada karşılığı olmayan kontrollü bir test özelliği taşımaktadır. Buna rağmen, parça hareketinin sıfır olduğu durumda inebileceğimiz minimum değeri gösterdiği için referans teşkil etmektedir.

Tablo 9. Alt hesaplama metriğinin konumlama türüne göre ortalama değerleri (büyük olan iyidir)

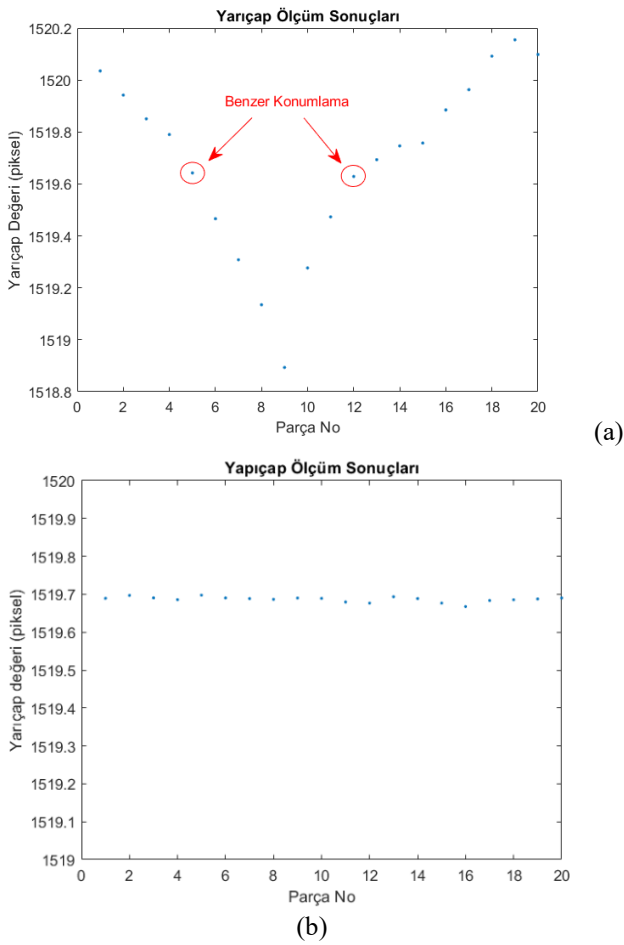
(C)	Sabit Konumlama	Sınırlı Bölgede Konumlama	Rastgele Bölgede Konumlama
İç Çap	25.0	3.12	2.32
Dış Çap	33.3	3.12	1.58

Ek olarak Tablo 3-4-5-6-7-8 için alt hesaplama metrikleri (C), Tablo 9’da verilmiştir. Elde edilen bulgulara göre Sabit Konumlama için C değeri 25-33 mertebelerinde iken Rastgele konumlama 1.5-2 mertebelerine kadar düşmektedir. Gerçek endüstriyel ortamı modelleyen sınırlı bölgede konumlama testlerinde sonuçlar önem arz etmektedir. Sınırlı bölgede konumlama testlerinde alt hesaplama metriğinin 3 mertebesinde olduğu gözlemlenmiştir. Mekanik olarak konumlanın daha da hassas olabileceği bir tasarım gerçekleştirilebilirse C değerinin 25-30 mertebelerine kadar çıkabileceği deneysel olarak gösterilmiştir. Önerilen algoritma, alan hesabına dayalı bir ölçüm gerçekleştirdiğinden parça kenarında bulunabilecek birkaç piksel boyutundaki çapak veya tozlardan

etkilenmemektedir. Ayrıca içerisinde bulundurduğu bağlı bileşen analiziyle, alınan görüntüdeki toz, kir, yağ vb. gürültüler (Şekil 9) otomatik olarak giderilmektedir.

3.1 Parça konumunun çap ölçüm hassasiyetine etkisi

Rastgele Konumlanma testlerinde çap ölçüm hassasiyetinin 1 pikseli aşabileceği yapılan testlerde gözlemlenmiştir. Hata oranının yüksek olduğu bu parçalar ve resimleri incelendiğinde birbirine yakın konumdaki parçaların ölçüleri arasındaki farkın 0.1-0.2 piksel gibi değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumu gösterebilmek adına 1 parça için sabit konumda olduğu çap ölçüm sonuçları ile sistematik bir düzen içinde konumlanarak ölçülen görüntülerin çap değerleri görselleştirilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Pulun bir çizgi üzerinde hareket ettiği ve sabit kaldığı durumlardaki ölçüm sonuçları (a) pulun bir çizgi üzerinde önce soldan sağa, ardından sağdan sola hareket ettirildiği durum (b) pulun hareket etmediği durum

4 Sonuç

Bu makalede endüstriyel makine görmesi uygulamalarında kullanılabilir alan tabanlı bir çap ölçüm algoritması önerilmiştir. İki temel adımdan oluşan yöntemde istenmeyen gürültüyü giderebilmek için ilk olarak bağlı bileşen analizine dayalı ön işleme uygulanmaktadır. İkinci olarak oluşan dairenin çapı alan formülüne göre

hesaplanmaktadır. Test ortamı için bir adet endüstriyel tipli kamera, üç adet telesentrik lens ve bir adet yüzeysel aydınlatma kullanılmıştır. Toplamda 40 adet pul parçasının çapları 3 farklı konumlanma tipine göre önerilen algoritma ile ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlarda iç çap ölçümlerinin dış çap ölçümlerine göre daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca rastgele konumlanmada 0.5 piksel, sabit konumlanmada 0.02 piksel tekrarlanabilirlik hassasiyetine erişildiği gözlemlenmiştir. Endüstriyel ortamın modellenmesi olan sınırlı alanda konumlanma testinde ise 0.33 piksel tekrarlanabilirlik hassasiyetine erişilmiştir. Ek olarak alt hesaplama metriği baz alınarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Alt hesaplama metriğinin dar konumlanmada 25, sınırlı alanda konumlanmada 3 ve sabit konumlanmada 1.5-2 mertebelerinde olduğu gözlemlenmiştir. Parça konumunun ölçüm başarısına etkisi ayrıca bir teste incelenmiş ve yakın konumda ölçülen parçaların aynı değeri üretmeye meyilli olduğu gözlemlenmiştir. Önerilen yöntem mekanik olarak konumlanmanın doğru olduğu sistemlerde yüksek başarımda çalışabileceği gösterilmiştir. Literatürde sanayi ortamına uygulanan alan tabanlı bir ölçüm çap algoritması bulunmamakta olup, bu çalışma ile endüstriyel ortamda gürültüye dayanıklı alan tabanlı yeni bir algoritma önerilmiş ve makine görmesi literatürüne katkı sağlanmıştır. Önerilen yöntemin endüstriyel ortamda rahatlıkla kullanılabilirliği ortaya koyulmuştur.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 13

Kaynaklar

- [1] E.N. Malamas, E.G. Petrakis, M. Zervakis, L. Petit, and J. D. Legat, A survey on industrial vision systems, applications and tools. Image and vision computing, 21(2), 171-188, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(02\)00152-X](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(02)00152-X)
- [2] F. Öztürk, M. H. Baş, and S. Kılıç Malzemelerde süneklığın görüntü işleme yöntemiyle ölçülmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2(2), 34-42, 2013. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.239380>
- [3] H. Bal, Kamera ile görüntü işleme teknikleriyle malzeme tane büyüklüğü analizi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2006.
- [4] D. K. Moru, and D. Borro, A machine vision algorithm for quality control inspection of gears. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106(1), 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04426-2>
- [5] G. Wei, and Q. Tan, Measurement of shaft diameters by machine vision. Applied optics, 50(19), 3246-3253, 2011. <https://doi.org/10.1364/AO.50.003246>
- [6] M. Eldessouki, S. Ibrahim, and J. Militky, A dynamic and robust image processing based method for measuring the yarn diameter and its variation. Textile Research Journal, 84(18), 1948-1960, 2014. <https://doi.org/10.1177/0040517514530032>

- [7] Q. Chunyang, Z. Liping, and L. Tao, Study on inner diameter measurement of cannon barrel based on image processing. First International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control pp. 280-282, 2011. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2011.77>
- [8] R.B. Bayram ve E. Yılmaz, Gömülü sistem tabanlı bir hatalı ürün tespit sistemi. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 24(1), 391-400, 2019. <https://doi.org/10.17482/uumfd.525696>
- [9] A.R. Telepatil and S. A. Patil, Parameter estimation of metal blooms using image processing techniques. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2, 3500-3507, 2013.
- [10] O. Cömert, M. Hekim, and A.D.E.M. Kemal, Weight and Diameter Estimation Using Image Processing and Machine Learning Techniques on Apple Images. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 9(3), 147-154, 2017. <https://doi.org/10.29137/umagd.350588>
- [11] S. Abd Kadhum, T.H. Obaida, and H.N. Zugair, Image Processing Techniques for Measuring Diameter Tomato Vegetable Using MATLAB Applications. Asian Journal of Information Technology, 18(1), 28-36, 2019. <https://doi.org/10.36478/ajit.2019.28.36>
- [12] M. Heydari, R. Amirfattahi, B. Nazari, and A. Bastani, Iron ore green pellet diameter measurement by using of image processing techniques. 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE) pp. 1-6, 2013. <https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2013.6599563>
- [13] J.H. Shim, and T.H. Nam, Machine vision based automatic measurement algorithm of concentricity for large size mechanical parts. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 806, No. 1, p. 012002). 2017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/806/1/012002>
- [14] Q. Tan, Y. Kou, J. Miao, S. Liu, and B. Chai, A Model of Diameter Measurement Based on the Machine Vision. Symmetry, 13(2), 187, 2021. <https://doi.org/10.3390/sym13020187>
- [15] H. Haibing, X. Zheng, J. Yin, and Y. Wang, Research on O-ring Dimension Measurement Algorithm Based on Cubic Spline Interpolation. Applied Sciences, 11(8), 3716, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11083716>
- [16] X. Xie, S. Ge, M. Xie, F. Hu, and N. Jiang, An improved industrial sub-pixel edge detection algorithm based on coarse and precise location. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 11(5), 2061-2070, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01232-2>
- [17] X. Yan, G. Jing, M. Cao, C. Zhang, Y. Liu, and X. Wang, Research of Sub-Pixel Inner Diameter Measurement of Workpiece Based on OpenCV. International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS) pp. 370-373, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICRIS.2018.00098>
- [18] Haibing H, Zheng X, Yin J, Wang Y, Research on O-ring Dimension Measurement Algorithm Based on Cubic Spline Interpolation. Applied Sciences 11.8 2021. <https://doi.org/10.3390/app11083716>
- [19] W. Liu, X. Yang, H. Sun, X. Yang, X. Yu and H. Gao, A novel subpixel circle detection method based on the blurred edge model. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 71 pp.1-11 2021. <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3130924>

