Lazer ve Çizgisel Ccd Algılayıcı Tabanlı Optik Çap Ölçüm Sisteminin Geliştirilmesi

Hüseyin POLAT

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar, Ankara TÜRKİYE

ÖZET

Bu çalışmada lazer ve çizgisel CCD(Charge-Coupled Device) algılayıcı tabanlı bir optik çap ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Bu şekilde bir ölçüm sistemi ile optik temassız çap ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bir lazer diyot ve kollimatör lens kullanarak paralel bir ışık demeti oluşturulmuştur. Paralel ışık demeti karşısına çizgisel CCD algılayıcı yerleştirilmiş ve lazer ışık demeti ile aydınlatılmıştır. Paralel ışık demeti içerisine bir nesne konumlandırılıp çizgisel CCD algılayıcı üzerine nesne gölgesi düşürülmüştür. Bu şekilde çizgisel CCD algılayıcıda gölge altında kalan kısımlardaki pikseller aydınlanmadığından, nesnenin çapı oluşan gölgeden belirlenebilmektedir. Çalışmada silindirik kesit alanlı nesnelerin çapının temassız olarak ölçülmesi %0,24 - %1,34 hata payı ile gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lazer, çizgisel CCD algılayıcı, optik çap ölçümü, paralel ışık demeti

Development of Laser and Linear Ccd Sensor-Based Optıcal Diameter Measurement System

ABSTRACT

In this study, laser and linear CCD(Charge-Coupled Device) sensor-based optical diameter measurement system was developed. In this way, optical non-contact diameter measurements were carried out with the measurement system. A parallel light beam was created with a laser diode and collimator lens. Linear CCD sensor was placed across of the parallel light beam and illuminated by laser light beam. Parallel light beam into an object was positioned, the object shadow occurs on a linear CCD sensor and pixels of this section were not illuminated. So that the object's diameter can be determined from the shadow. In this study, cylindrical cross-sections of objects was carried out to measure of diameter as contactless. The relative errors of measurement were in the range from %0,24 - %1,34.

Key words: Laser, Linear CCD image sensor, optical diameter measurement, parallel light beam

1. **GİRİŞ** (INTRODUCTION)

Artan dünya rekabet ortamında, ürün kontrolü için sanayiye daha hızlı ve daha doğru ölçüm tekniklerini bulmayı zorlamaktadır. Bu ölçüm tekniklerinden, temassız lazer ölçüm sistemleri, henüz yeni bir teknoloji olarak kullanılmasına rağmen, üretilen ürünlerin temassız ve ayrıntılı hassas boyut ölçümü için kabul edilen bir araç haline gelmiştir. Rekabet ve kaliteli ürünler üretmek için üreticilerin üzerindeki artan baskılar, bu teknolojinin kullanımının önemini artırmaktadır. Dolaysıyla bu tip ölçüm sistemlerinin daha da geliştirilmesi, araştırmacıları ve ölçüm cihazı üreticilerini bu alana yönlendirmektedir.

Son yıllardaki teknik gelişmeler temassız ölçüm sistemleri alanında hayal edilemeyen ölçüm cihazlarının geliştirilmesini sağlamıştır. Bu, teknik gelişmeler özellikle üç alanda meydana gelmiştir. Birincisi sayısal sinyal işleme ile ilgili mikroişlemci sistemlerin gelişmesi, ikincisi CCD (Charge-Coupled Device) algılayıcı sistemlerindeki gelişmeler ve üçüncüsü de lazer ile optik sistemlerin gelişmesidir.

Endüstriyel uygulamalarda, geleneksel cihazlara göre daha doğru ölçme, daha hızlı ölçme, temassız ölçebilme, iyi tekrarlanabilirlik, sağlamlık ve uzun zaman dayanabilme gibi özel yetenek ve avantajlarından dolayı lazer ve çizgisel CCD algılayıcı tabanlı ölçüm cihazları tercih edilmektedir. Günümüzde, bu tipteki cihazlar hem otomatik üretim sistemlerinde üretimin basamakları ve değişkenleri için hem de kalite kontrol amaçlı olarak güvenilir bir çözüm olarak da yerini bulmaya başlamıştır [1]. İmalat esnasında geleneksel temaslı ölçüm tekniklerinin kullanılması pratik değildir. Temas olmadan ve imalat işlemini kesintiye uğratmadan hızlı bir şekilde ürün çapının ölçülmesi ve izlenmesini otomatikleştirmek için birçok girişim yapılmıştır [2,3,4,5,6].

Temassız ölçme için kullanılan teknolojiler optik ve optik olmayanlar olarak ikiye ayrılırlar. Optik olmayan teknolojiler mikrodalga, elektriksel ve manyetik alan teknikleri, infrared teknikleri ve ultrasonik teknikleri olarak sayılabilir [7,8].

Elektriksel ve manyetik alan tekniklerini kullanarak temassız ölçüm yapabilen sistemlerden birisi Eddy akımlarını kullanan sistemlerdir. Bu sistemde aktif sensörün üzerinden alternatif akım akıtılır, bu hedef iletken yüzeyinde bir alternatif manyetik alan oluşturur ve yüzeyden küçük kendi akımlarını akıtmasına sebebiyet ve-

* *Sorumlu Yazar (Corresponding Author)*
e-posta: polath@gazi.edu.tr
Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2014.17.2 91-98

rir buna Eddy akımı (girdap akımı) adı verilir. Eddy akımın oluşturduğu ters manyetik alan Eddy sensör bobininin Z empedansını, a mesafesiyle orantılı olarak değiştirir. Eddy sensörü bir dönüştürücü devresinde kullanılırsa mesafe değişimi yani hareket değişimi gerilim değişimine dönüştürülmüş olur ve pozisyon ölçmelerinde kullanılabilir. Örneğin, Dr. T. Galouz ve arkadaşları temassız çap ölçmek için malzemenin özdirencini belirleyerek boyutunu ölçmenin olabilirliğini araştırmışlardır. Yani Eddy (girdap) akımlarını kullanarak temassız özdirenç ölçme teorisine dayanarak çalışma yapmışlardır fakat bu metod ile sadece iletken olan malzemelerin çapları temassız olarak ölçülebilmektedir [9].

Ultrasonik ölçüm prensibi ise ses hızını temel alır. Ultrasonik verici içindeki piezo elektrik kristali tetikleyerek elektrik sinyali ile 20.000 Hz üzerinde ses dalgası üretir ve hedefe doğru yayar. Bu aşamadan sonra verici, algılayıcı olarak çalışmaya başlar ve kendi yaydığı sesin yansıyan eko sinyalini hisseder. Daha sonra yayılan sinyal ile ölçülen süre bilgileri analiz edilerek, üretilen sinyalin, ölçülen zaman biriminde yansıyacağı mesafe hesaplanır. Mesafe = (Ses hızı x süre) / 2 ile hesaplanabilir. Yani üretilen ses sinyali ile yansıyan eko arasında ölçülebilen bir süre vardır. Ses hızı sabit bilinen olduğundan, bu süre mesafe bilgisi ile doğrudan orantılıdır. Ultrasonik ölçüm prensibi, endüstriyel işlemler için uygulanabilir. Ancak çoğu endüstriyel uygulamalarda ultrasonik sinyalleri bozucu harici sinyaller de mevcuttur. Ölçüm alanındaki engeller, elektriksel gürültüler hatalı bilginin üretilmesine sebep olabilir. Ultrasonik eko sinyali işlenmesinde bir diğer önemli hata kaynağı olabilecek husus ise sıcaklık kompanzasyonudur [10].

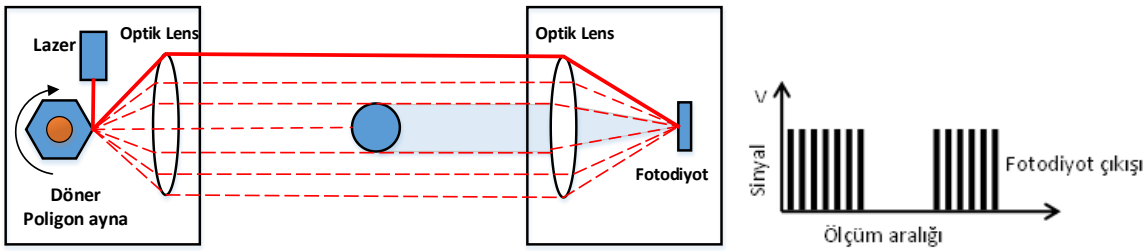
Optik teknolojiler ise LED ve lazer tabanlı ölçüm sistemleridir: Siegel M. W., optik çap ölçümü için ilk olabilecek bir prototip lazer mikrometre sistemi üzerinde çalışmıştır. Bu çalışmada her bir pikseli 13µm genişliğinde olan, 256 piksellik çizgisel CCD, 20 watt gücünde 895 nm'lik bir darbeli lazer, 6 bitlik analog sayısal dönüştürücü ile optik lensler kullanmıştır. Lazer verici ile çizgisel CCD alıcı arası mesafe de 16,7 cm olarak seçilmiş ve ince kablo çapları ölçülmeye çalışılmıştır. Gerçek çapları 404 µm, 320 µm, 203 µm, 102 µm olan kablolar, bu sistemde 400, 320, 200, 100 µm olarak ölçülmüştür. Siegel M. W bu çalışmasında ölçümlerin, ancak mükemmel sinyal-gürültü ve yüksek çözünürlüklü sayısallaştırma ile daha yüksek hassasiyette yapılabileceğini belirtmiştir [11]. Jan Fischer ve Tomas Radil, bir çalışmalarında temassız çap ölçümünü, optik lens kullanmadan gerçekleştirebilecek bir yöntem önermişlerdir. Çalışmalarında bir ışık kaynağı ve 2087 piksel CCD algılayıcı ile gölge düşümü yöntemini kullanarak 100 µm - 1 mm arasındaki nesnelerin çap ölçümlerini, %0,2 - %2 hata payı ile gerçekleştirdiklerini belirtmişlerdir [12]. Tomas Radil, Jan Fischer ve Jan Kucera yaptıkları diğer bazı çalışmalarında da yine optik lens kullanmadan çap ölçümüne ilişkin yöntemler önermişlerdir [13,14]. Optik çap ölçümünün endüstride en sık kullanıldığı alanlardan biri de kablo çap ölçümleridir. Bu yüzden literatürde bu amaç için yapılmış çalışmalarda yer almaktadır [15,16,17].

Endüstriyel üretimdeki ürünlerin büyük bir kısmı silindirik geometrik şekillere sahiptir. Dolaysıyla bu çalışmada 29 mm'ye kadar çap ölçüsüne sahip nesnelerin temassız ve hassas olarak çap ölçümlerini gerçekleştirmek amacıyla, lazer ve çizgisel CCD algılayıcı tabanlı ölçüm sistemi geliştirilmeye çalışılmıştır.

2. MATERYAL ve METOD (MATERIAL and METHOD)

Endüstriyel optik çap ölçüm sistemlerinde şimdiye kadar değişik yöntemler kullanılmıştır: Kısaca bu yöntemlerden bahsedecek olursak;

Optik çap ölçüm sistemlerinden birincisi olan lazer taramalı sistem Şekil 1. de verilmiştir. Bu yöntemde doğrusal lazer ışığı, motor ile sabit hızda döndürülen bir poligon-ayna düzeneğine iletilip yansıtılması ile lazer taramasının elde edilip alıcı kısımda fotodiyot algılayıcı kullanılan klasik hareketli mekanizmalı yöntemdir [18].



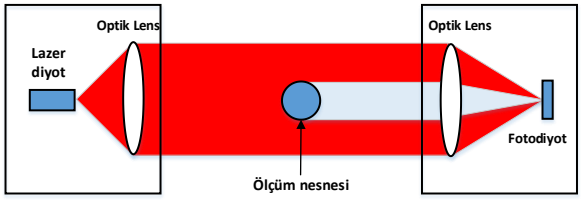
Şekil .1: Lazer tarama yöntemi ile çalışan optik ölçüm sistemi

Hareketli bir mekanizma ile lazer taraması yapılıp alıcı tarafında ise fotodiyot algılayıcı kullanılan klasik yöntemin çalışması şöyledir;

Tarayıcı lazer cihazı kendi etrafında dönebilen bir poligon-ayna tarafından yansıtılan ve ölçümü yapılacak nesnenin arkasında tekrar odaklanabilen bir lazer ışığı kullanır. Verici, üzerinde kullanılan lazer diyot lazer ışığını bir ayna ile optik lens üzerine yansıtarak bu sayede dikey bir düzlem boyunca paralel bir ışık kaynağı oluşuyor izlenimi verir. Nesnenin uzağındaki fotodiyot algılayıcı lazer ışığının nesne tarafından kesildiği anlar dışında algılama yapar. Lazer ışığının nesne tarafından kesildiği zaman aralığı nesnenin büyüklüğüne de bağlı olarak yüksek bir hassasiyetle belirlenebilir. Bir mikroişlemci tabanlı sistem tarayıcı lazer ışığının kesilmelerini sayar,

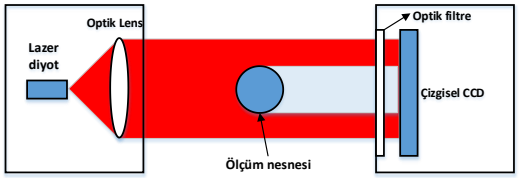
zamandan lineer bir koordinata çevirim yapar ve ölçüm gerçekleştirilmiş olur. Mevcut lazer taramalı sistemlerde 0.8 - 5 mW güç çıkışları ile görünür ve kızılötesi lazer diyotlar kullanmakta olup tarama hızları saniyede 100-2200 tarama aralığında olabilmektedir. Lazer taramalı sistemlerin en büyük dezavantajı hareketli mekanik aksamlarının bulunmasından dolayıdır. Yüksek hassasiyette ölçüm yapmak için tarama hızlarının da yüksek olması gerekmektedir.

İkinci bir yöntem ise paralel lazer ışık demetinin optik kollimator lensler ile oluşturulup alıcı kısımda fotodiyot algılayıcı kullanan yöntemdir. Bu yöntem Şekil 2 de gösterilmektedir. Bu yöntemi kullanan sistemler, mekanik esaslı sistemden daha kararlı ve daha hassas çalışabilmektedir.

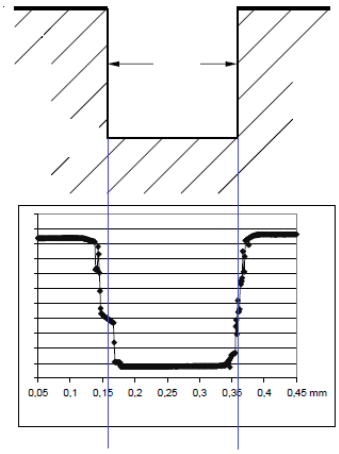


Şekil .2: Paralel ışık demeti ve fotodiyot algılayıcı kullanan sistem

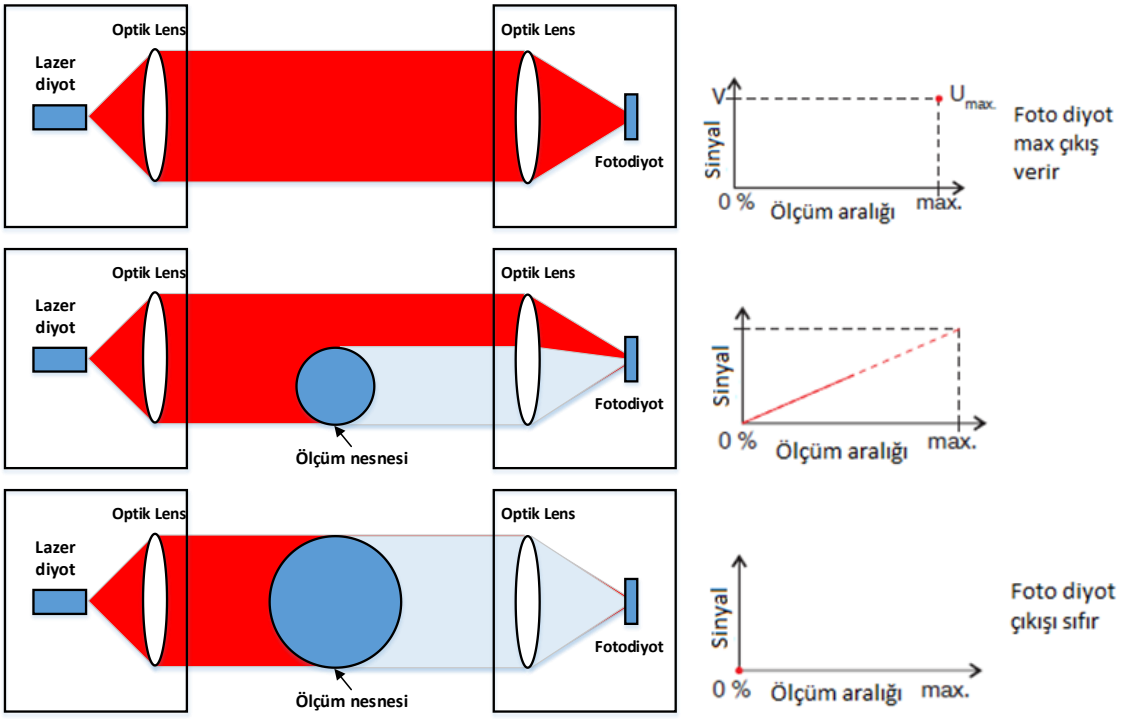
Bu yöntemde ise herhangi bir hareketli mekanizma kullanılmaz. Bir düşük güçlü lazerden (0.8-1mW ve 635-680nm dalgaboyunda) yayılan şekilsiz lazer ışığı optik kollimatör lens sisteminden geçer ve paralel ışık demetine dönüşür. Ölçümü yapılacak nesne paralel ışık demeti içerisine konumlandırılır. Paralel ışık demeti karşı tarafta fotodiyot algılayıcı tarafından algılanır, fakat paralel ışık demeti içerisinde bulunan nesne ışık demetinin bir kısmını keseceğinden dolayı fotodiyot üzerindeki aydınlanma miktarı ölçüm nesnesinin çapına göre değişim gösterir. Fotodiyot algılayıcıdan elde edilen sinyal çıkışının seviyesine göre işlem yapılır bu şekilde ölçüm gerçekleştirilir (Şekil 3).



Şekil 4: Lazer ve çizgisel CCD algılayıcı tabanlı optik çap ölçüm sistemi



Şekil 5: Çizgisel CCD algılayıcı çıkışından elde edilen sinyalden ölçüm değerinin elde edilmesi

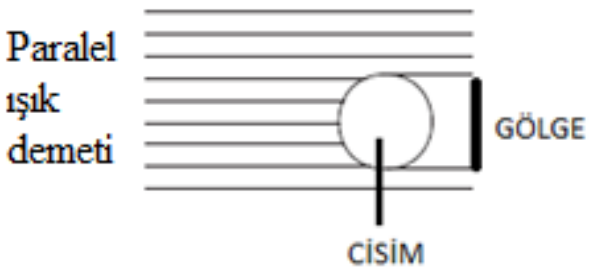


Şekil 3: Paralel ışık demeti ve fotodiyot algılayıcı kullanan sistemin çalışmasına ilişkin ayrıntılar

Bu yöntemde, gölge düşümü (Shadow Casting, Shadow Projection) olarak ifade edilen bir teknik ile ölçüm gerçekleştirilmektedir (Şekil 4). Bir düşük güçlü lazerden (0.8-1mW ve 635-680 nm dalga boyunda) yayılan şekilsiz lazer ışığı optik kollimatör lens sisteminden geçer ve paralel ışık demetine dönüşür, bu paralel ışık demeti karşı tarafta çizgisel CCD algılayıcı tarafından alınır. Ölçümü yapılacak nesne paralel ışık demeti içerisine konumlandırılır. Paralel ışık demeti içerisinde bulunan nesne ışık demetinin bir kısmını keseceğinden dolayı çizgisel CCD üzerinde bu kısım aydınlanmadan gölge şeklinde kalacaktır. Aslında bu gölge şeklinde olan kısım ölçüm yapılacak nesnenin boyutunu bize sağlamaktadır. Çizgisel CCD algılayıcıdan elde edilen aydınlatılmış ve aydınlatılmamış piksellere ait sinyal çıkışı sayısal olarak işlenir, böylece hızlı ve doğru olarak boyut ölçümü gerçekleştirilir (Şekil 5). Işık algılayıcı olarak çizgisel CCD kullanarak ölçüm yapan bu sistemler, ışık algılayıcı olarak klasik fotodiyot kullanan sistemlere göre daha hızlı ve daha hassas ölçümler yapmayı olanaklı hale getirmektedir.

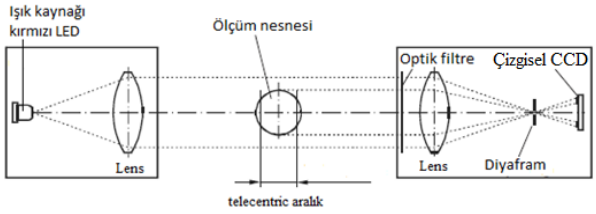
Bu çalışmada da ölçülecek nesne gölgesinin elde edilmesi için gölge düşümü (Shadow Casting) yöntemi kullanılmıştır. Gölgeyi oluşturan ışık kaynağı kaliteli ise gölge oldukça ayrıntılı ve net olabilmektedir. Bu çalışmada ışık kaynağı olarak 670 nm dalga boyunda 1mW gücünde kırmızı ışık veren lazer diyot kullanılmıştır.

Bilindiği gibi nesnenin ışık kaynağına yaklaşması veya uzaklaşması, nesnenin zemine yakın veya uzak olması gibi durumlarda, gölgede büyüme, küçülme, net olmama gibi sorunlar meydana gelmektedir. Bu sorunları ortadan kaldırmak için gölgenin boyutlarının değişmediği, netliğinin sabit kaldığı bir ortam oluşturmak gerekmektedir. Yani ışığın nesnenin her noktasına tam karşısından gelmesi gerekmektedir (Şekil 6). İşte bu özellikten yararlanarak hassas çap ölçümleri yapılabilmektedir [20].



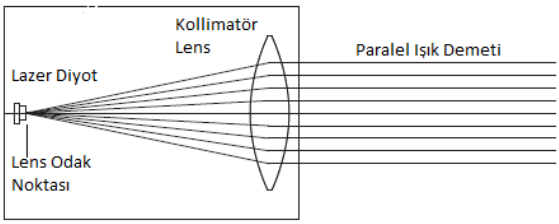
Şekil 6: Cisim üzerine düşen ışınlar

Şekil 6.'da görülen ortamı sağlamanın en kolay yolu ince kenarlı optik lensler kullanmaktır. Aslında çok daha kesin sonuçlar elde edilmek isteniyorsa telecentric lensler kullanmak gerekir (Şekil 7).



Şekil 7: Telecentric lens kullanan ölçüm sistemi yapısı

Fakat telecentric lenslerin oldukça pahalı olmasından dolayı, bu çalışmada achromatic doublet lensler tercih edilmiştir. Farklı dalga boylarındaki ışınların optik lens üzerinde farklı kırılmasından dolayı achromatic lens sayesinde lazer ışık kaynağından çıkan ışık optik lensin odak noktasından yansıtılarak optik lensin bütün yüzeyine dağıtılır. Optik lensi geçtikten sonra ışık paralel olarak daha uzak noktalara ulaşmaya başlar (Şekil 8).

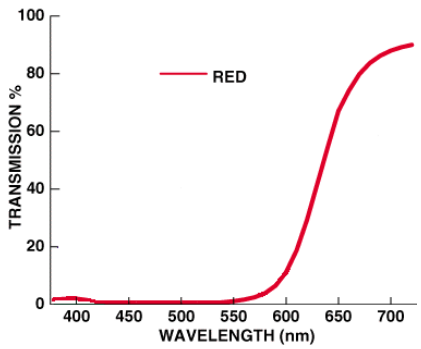


Şekil 8: Işığın paralelleştirilmesi

Bu sayede;

1) Paralel ışık içinde konumlandırılmış bir nesnenin oluşan gölgesinin netliği artar.
2) Nesne gölgesi bozulmadan nesnenin birebir boyutunda elde edilebilir.
3) Ayrıca nesnenin konumunun değişmesi önemini yitirmeye başlayıp çok daha az etkili (ihmal edilebilecek) bir parametre haline gelir.

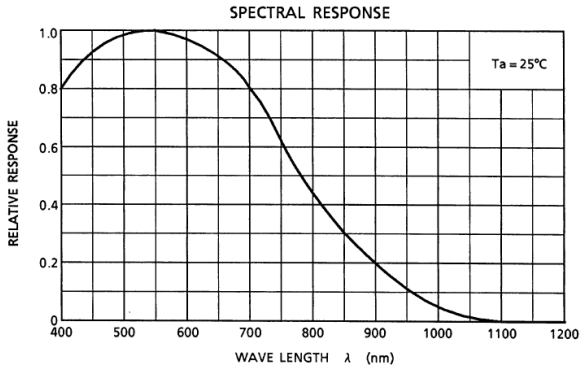
Fakat paralel ışık demetinin harici ışık kaynaklarından etkilenmemesi sadece lazer diyot tarafından gönderilen dalga boylarındaki ışığı alabilmesi için çizgisel CCD önüne optik filtre yerleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan filtre, 2" x 2" boyutunda, 1.5mm kalınlıkta, 1.320 g/cm^3 yoğunluklu, kırmızı optik plastik filtredir. Optik filtrenin karakteristik eğrisi Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9: Çalışmada kullanılan optik kırmızı plastik filtre karakteristik eğrisi

Paralel ışık demeti içinde konumlu nesnenin gölgesi bozulmadan nesnenin birebir boyutunda oluştuktan sonra bu gölge çizgisel CCD algılayıcı üzerine düşürülmüştür.

Çizgisel CCD algılayıcı, özelliğinden dolayı gölgeyi ışıktan çok hassas biçimde ayırt edebilmektedir. Çizgisel CCD algılayıcılar birçok mühendislik (spektroskopi, kalite kontrol, hassas ölçümler, medikal görüntüleme, astronomi, fotogrametri vs.) ve tüketici uygulamalarında (barkod okuma, resim tarama, faks, fotokopi vs.) kullanılan önemli bir yarıiletken elemandır. Çizgisel CCD algılayıcı yan yana sıralanmış bir sıra piksel dizisi şeklinde çok sayıdaki piksellerden oluşmaktadır (1x1024, 1x2048, 1x3648, 1x5000 gibi). Bir çizgisel CCD algılayıcı için piksel sayısı, piksel boyutları, duyarlılığı ve gürültü değerleri önemli parametrelerdir. Çizgisel CCD algılayıcının piksellerinin sık olması duyarlılığı ile doğru orantılıdır [21]. Çalışmada Toshiba TCD1304DG çizgisel CCD algılayıcı kullanılmıştır. Bu çizgisel CCD algılayıcı 3648 piksel ve her bir piksel 8µm uzunluğundadır. Kullanılan çizgisel CCD algılayıcı spektral karakteristik eğrisi Şekil 10'da verilmiştir [22].



Şekil 10: Çalışmada kullanılan çizgisel CCD algılayıcı spektral karakteristik eğrisi

Çizgisel CCD algılayıcı üzerine düşen ışık ve gölge, bir mikroişlemci tabanlı sayısal sinyal işleme modülünde 16 bit çözünürlükte analog-sayısal dönüştürücü kullanılarak sayısal hale getirilmiştir. Daha sonra elde edilen veriler USB arabirimi üzerinden PC 'ye aktarıldıktan sonra gölgenin tespiti yapılıp ölçüm değerleri elde edilmiştir (Şekil 11).

3. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME (RESULTS and DISCUSSION)

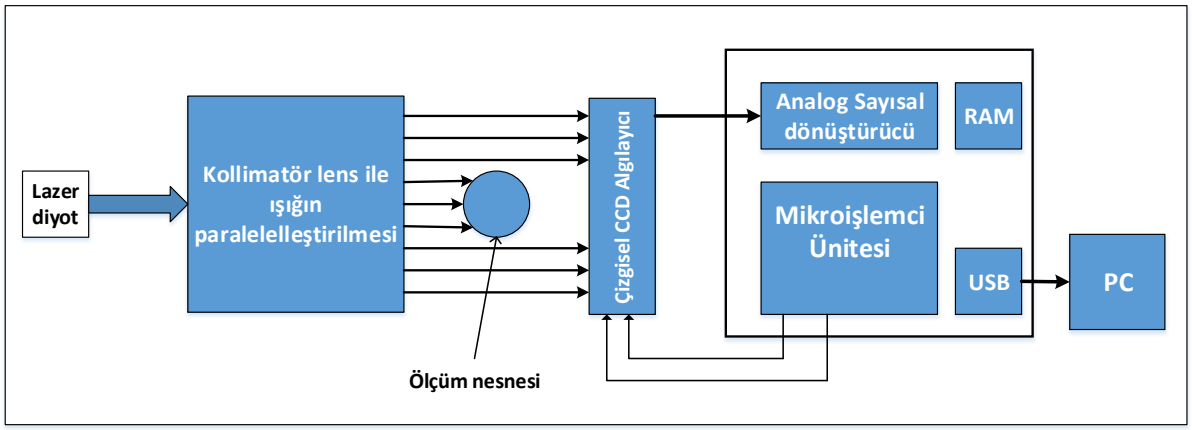
Deneysel ölçümler 1.5-10 mm aralığında (1.5 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm) çap ölçülerine sahip silindirik nesnelerin ölçümü yoluyla yapılmıştır. Kesin çap değeri bilinen nesneler 12 cm verici - alıcı ünite mesafesine göre deneysel ölçümlere tabi tutulmuştur. Bu ölçümlerden elde edilen ölçüm verilerinin grafikleri aşağıda verilmiştir (Şekil 12).

Aynı zamanda ölçüm verileri üzerinde lineer interpolasyon uygulayarak gerçek ölçüm değerleri elde edilmiştir. Pikseller arasındaki interpolasyon kenar algılama çözünürlüğünü artırmak için kullanılmıştır. Lineer interpolasyon için:

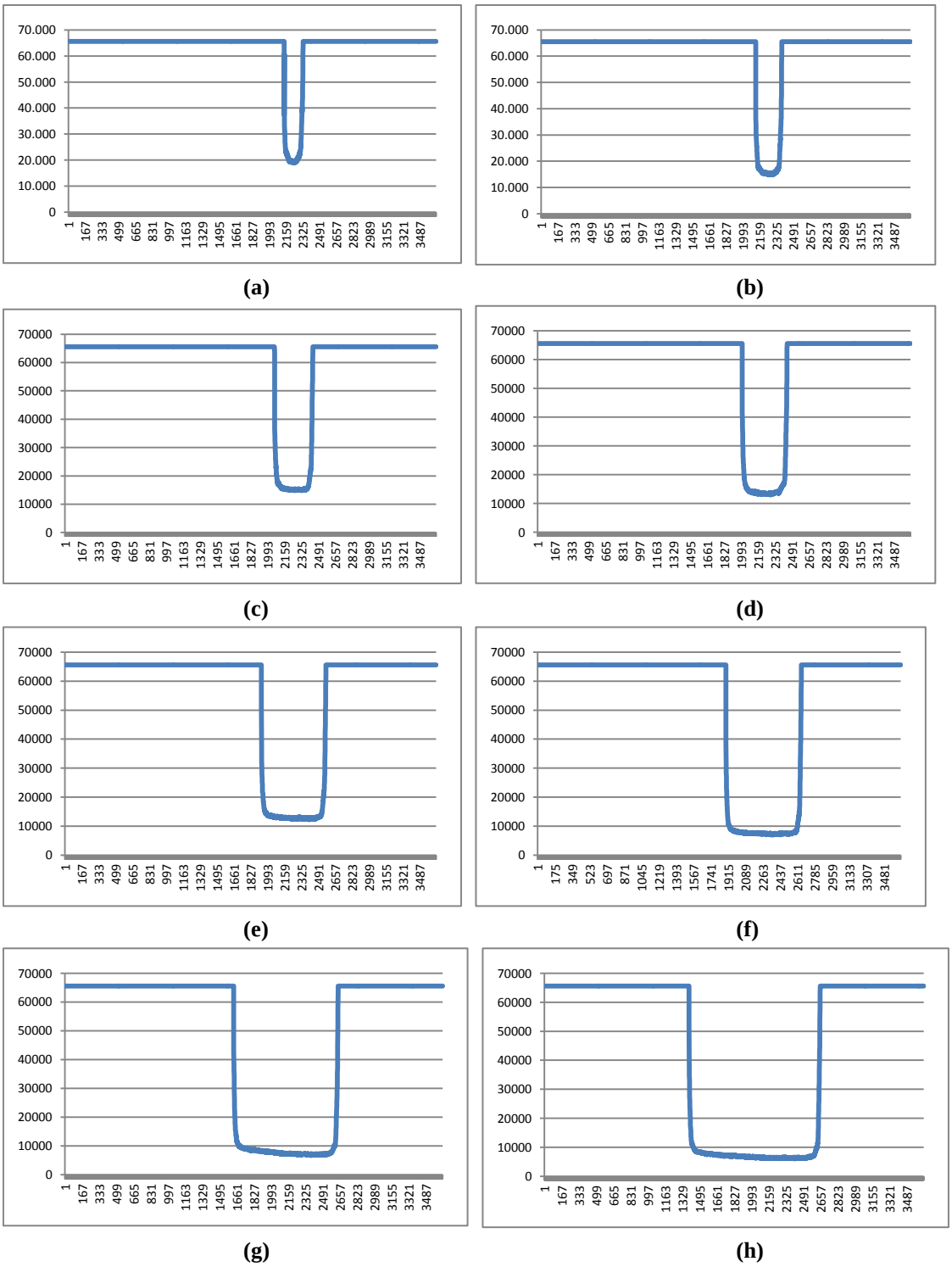
$$X_T = \frac{y_T - y(i)}{y(i) - y(i-1)} + 1 \qquad (1)$$

ifadesi kullanılmıştır. Burada X_T kenar pozisyonu, y(t) eşik seviyesi, y(i) i. pikselin aydınlık seviyesidir.

Ölçüm sonuçları ile gerçek değerler karşılaştırılarak ölçüm hataları ve ölçüm doğruluk miktarları hesaplanmıştır.



Şekil 11: Çizgisel CCD algılayıcıdan elde edilen sinyallerin aktarılması



Şekil 12: (a) 1.5 mm, (b) 2 mm, (c) 3 mm, (d) 4 mm, (e) 5 mm, (f) 6 mm, (g) 8 mm, (h) 10 mm çapları için ölçüm sonucuna ait grafikler

Tablo 1. Ölçülen çap değerleri ile gerçek çap değerlerine göre ölçüm hataları ve ölçüm doğrulukları.

Verici-Alıcı mesafesi : 12cm			
Ölçülen nesnenin gerçek çap değeri(mm)	**Ölçülen çap değeri (mm)**	**Ölçüm Hatası (mm)**	**Doğruluk (%)**
1,5	1,512	+0,012	99,20
2	2,019	+0,019	99,05
3	2,984	-0,016	99,46
4	3,950	-0,050	98,75
5	4,988	-0,012	99,76
6	5,920	-0,080	98,66
8	7,934	-0,066	99,17
10	9,930	-0,070	99,30

Tablo 1'den görüleceği gibi yapılan ölçümler sonucunda en düşük 0,012 mm ve en yüksek 0,070 mm ölçüm hataları elde edilmiştir. Buna göre ölçüm sonuçlarında %0,24 - %1,34 aralığında doğruluk hatası ortaya çıkmıştır. Ölçüm sonuçlarının daha iyileştirilmesi için çizgisel CCD algılayıcının daha yüksek piksele sahip olması faydalı olacaktır. Ölçümlerde ölçülecek nesnenin gelen ışığa dik bir şekilde yerleştirilmesi kritiktir. Ölçülecek nesne tam dik yerleştirilemediği takdirde hassas ölçümlerde hata oranı artmaktadır. Bu sebeple de ölçüm esnasında bu durumun tam olarak sağlanamamasından kaynaklanan hatalar yine ölçüm sonuçlarını etkileyebilmektedir. Ayrıca bu çalışmada ölçüm nesnesinin ışık demeti içindeki konumu, yani alıcı ile verici arasındaki bulunduğu mesafesi de dikkate alınmamıştır. Yukarıda sayılan hususlar ile ilgili daha detaylı çalışmalar yapıldığı takdirde çok daha kesin ve yüksek hassasiyette ölçümler elde edilebilecektir.

Sonuç olarak, lazer ve çizgisel CCD algılayıcıların kullanımı, temassız ölçüm yapmayı ve bu ölçümü yapabilen yüksek hassasiyetteki cihazların tasarımını, kolaylaştırmıştır.

4. **TEŞEKKÜR** (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, 07/2012-08 kodlu Gazi Üniversitesi bilimsel araştırma projesi kapsamında gerçekleş-tirilmiştir.

5. **KAYNAKLAR** (REFERENCES)

1. Kennedy, William P., "Noncontact measurement; Can laser triangulation help you?" Quality, Vol. 37,Issue 9, p36, 1998.
2. Feigenbaum A.V., "Total Quality Control (Third Edition)", McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, U.S.A., 1991
3. Nemoto, M., "Total Quality Control for Management: Strategies and Techniques from Toyota and Toyoda Gosei", Prentice Hall, USA, 1987.
4. Silfvast, W. T., "Laser Fundamentals", Cambridge University Press, UK, 2004.
5. Luxon, J. T., Parker D. E., "Industrial Lasers and Their Applications", Prentice Hall, 1992.
6. Read, J. F., "Industrial Applications of Lasers (Second Edition)", Academic Press, UK, 1997.
7. Li B., "Polygon-based large diameter measurement with modular gauges", Measurement, Volume 27, Issue 1, Pages 1-11, January 2000.
8. How T.V., Bhuvaneshwar G.S, Annis D., "Infrared diameter gauge for in vitro mechanical testing of vascular grafts", Journal of Biomedical Engineering, Volume 6, Issue 3, Pages 195-199, July 1984.
9. Galouz T., Rafik T., Neumann K., Jordanov I., "Contactless Diameter Measurement of Wires Using Eddy Current", Test and Measurement Conference, 2005.
10. Wang M., Han D., Li S., "The application and research of high-frequency ultrasonic reflection technique used in the measurement of small diameter's tube cavity size", Measurement Volume 46, Issue 1, Pages 521–526 January 2013.
11. Siegel M. W., "Lasers and CCDs For Flash Measurement Of Small Diameters", Proc. SPIE 0730, Automated Inspection and Measurement, 119, May 18, 1987.
12. Fischer J., Radil T., "DSP Based Measuring Line-scan CCD Camera", IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications 8-10, Lviv Ukraine, September 2003.
13. Radil T., Fischer J., Kucera Jan., "A Novel Optical Method of Dimension Measurement of Objects with Circular Cross-section", IMTC 2006 – Instrumentation and Measurement Technology Conference, Sorrento Italy, 24-27 April 2006.
14. Radil T., Fischer J., Kucera J., "Dimension Measurement of Objects With Circular Cross Section Using Point Light Sources and an Image Sensor Without Lens", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 56, No: 4, August 2007.
15. Arque H., Schmidt P., "Theory of the measurement of thickness and conductivity of cylindrical shells by an inductive method", J. Applied Physics, Vol 43, pp. 3952-3958, 1972.
16. Avarvarei I., Dontu O., Filipoiu I. D., Besnea D., Turcan O., Savastru D., "Control System, Device and

Technologies for Thin Wire Diameter Measurement", Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 13, No: 8, p. 1030 – 1036, August 2011.

17. Hong Z., Xuan W., Rui W., "High Speed On Line Measurement of Digital Wire Outer Diameter With Laser and CCD Technology", Proceedings of the 7th Intemational Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, June 1-5 2003.
18. Borissova D., Bantutov E., "Laboratory Model of a Contactless Device for Measuring Diameter of Objects with Circular Cross-section Objects", Cybernetics and Information Technologies,Volume 1, No:2, Sofia, 2001.
19. Chugui Y.V., "Optical Measuring Systems and Laser Technologies for Scientific and Industrial Applications", Measurement Science Rewiew, Volume 7, Section 3, No:1, 2007.
20. Qing S., Wenqian W., Sijia Z., Han Y., "Optical path design of the external diameter measurement system based on CCD and parallel light projection method with double light paths", International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2007: Related Technologies and Applications, edited by Liwei Zhou, Proc. of SPIE Vol. 6625, 66251U, 2008.
21. Peterson C., "How It Works: The Charged-Coupled Device, or CCD", Journal of Young Investigators, Volume Three, Issue 1, March 2001.
22. TOSHIBA CCD Linear Image Sensor

www.semicon.toshiba.co.jp/info/lookup.jsp?pid=TCD1304DG&lang=en#documents