

Mikro ayna dizinli (DMD™) 3 boyutlu yüzey ölçme sisteminin geliştirilmesi

Karun Alper TİFTİKÇİ*, A. Talha DİNİBÜTÜN

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Gelişen teknolojilere paralel olarak imal edilen ürünlerin boyutlarının küçülmesi ve yüzey hassasiyetlerinin artıp parçaların daha kırılğan yapıya sahip olmaları, araştırmacıları bilinen standart temaslı ölçme aletlerinin dışında hasarsız ve hızlı yeni ölçme tekniklerini aramaya yönlendirmiştir. Optik ölçme teknikleri de hasarsız ölçme kapasiteleri nedeniyle 1960'lardan başlayarak günümüze kadar büyük bir hızla gelişmiş ve günümüzde hiç tartışmasız mikro teknolojiden bio-teknolojiye birçok alanda temaslı ölçme cihazlarının yerini almıştır. Konfokal mikroskop ise 1960 yılında M. Minsky tarafından geliştirilmiş ve standart mikroskoplara oranla daha hassas ve detaylı ölçme kapasitesi sunması nedeniyle diğer optik ölçme metodları arasından hızla sıyrılmıştır. 1990'larda, Xiao, Corle, ve Kino'nun çalışmaları ile gerçek zamanlı görüntüleme özelliği kazandırılmış ve konfokal mikroskop endüstrinin vazgeçilmez temel optik ölçme cihazı haline gelmiştir. Bu çalışma kapsamında mikro ayna dizinli (DMD™) optik anahtarların yardımı ile yeni bir tip konfokal mikroskop geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yeni ölçme sisteminde mikro ayna dizini ölçülecek yüzey üzerine 1-1 görüntülenmiş ve bu sayede yüzlerce noktanın aynı anda video frekansında ölçülmesi gerçekleştirilmiştir. 3D yüzeyin elde edilmesi çeşitli yüksekliklerde elde edilen 2D bilgilerinin üst üste getirilmesi ile oluşturulmuştur. Bu çalışma sırasında mikroskobun optik tasarımı ve elde edilen optik sistemin geliştirilme aşamaları bütün detayları ile verilmiş, geliştirilen deneysel düzenek detayları ile tartışılmıştır. Ölçümler sırasında 50 defa büyütme ve 0.95 NA'ya sahip mikroskop objektifi ile yapılan ölçümlerde yatay çözünürlük değeri 1.5 µm olarak bulunmuştur. Sonuçların bu kadar iyi olmasında kullanılan mikro ayna dizinli elemanın önemli bir rolü olmuştur. Geliştirilen sistemin ölçme kapasitesi farklı ölçme standartları kullanılarak örneklendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: DMD, optik ölçümler, konfokal mikroskop.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Karun Alper TİFTİKÇİ. k.a.tiftikci@orange.nl; Tel: +31 (6) 25 21 57 57.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Optical design and development of a micromirror based high accuracy confocal microscope" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 24.03.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 23.07.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.07.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Development of a Digital Micromirror (DMDTM) based 3D profilometer

Extended abstract

In this paper a new method for non-contact scanning of engineering surfaces will be presented. Similar to the classical confocal microscope principal but without using real physical pinholes a new method that uses Digital Micromirror Device¹ (DMDTM) as virtual illumination pinhole and selective CCD camera as virtual detection is developed. With this study, this new, flexible and highly accurate a micromirror-based system will be introduced. The concept concerning system layout and system performance together with the measurement results will be presented.

Confocal microscopy was first described by M. Minsky in 1957 and in last couple decades it becomes one of the most powerful tool for 3D characterization of complex engineering surfaces. In reflection mode confocal microscopy applications a point illumination source is imaged onto object by using a microscope objective (first focus point). This focusing point on object results with maximum intensity on a detector by passing through the detector pinhole (second focus point) where the lights from defocused neighborhoods object regions are strongly suppressed by the pinhole. In other words, the detector signal that is determined by the pinhole size is reduced strongly by defocusing the specimen. This characteristic of confocal system gives us a chance to make optical sectioning with high vertical resolution discrimination by suppressing the scattered light from defocused object position. It is also well known that confocal microscopy gives some improvements in the sense of lateral resolution compared to the classical microscopy.

(DMDTM) technology was developed by Texas Instruments. The DMD that used in the setup consists of 600x800 programmable micromirrors. Each of these mirrors has 16 μ m x 16 μ m square size with a 1 μ m gap between them and each mirror tilt $\pm 10^\circ$ around the diagonal axis with help of underlying memory cel. DMD as a member of MEMS device can also be used as a light switch. By combining the DMD with a suitable light source and optics, the DMD reflects the incoming beam either into or out of the microscope objective pupil by using a simple beam steering technique. By combining the light

switch advantages of DMD unit with pulse width modulation application it is also possible to create gray scale operation, which can be used to obtain uniform illumination on CCD. By controlling the DMD pixels as an optical light switch any size and any shape pinholes, which are imaged through the optical system onto object where they are reflected and later imaged again onto CCD camera chip, can be created. On the CCD camera reflected intensities from the object are measured by the CCD pixels that are related with DMD's "on" pixels. The measured intensities reach its maximum when the object is confocally in focus with the DMD and the CCD. Intensity data are measured and stored while the object is moving through the focal plane of the optical system. Finally maximum's of the obtained intensity curves, which are also known as depth response curves, link to the corresponding motor position and the 3D profile of the specimen can be reconstructed.

The advantages of the DMD based optical scanner can be listed as follows; conventional scanning devices such as Nipkow disk or tilting mirrors that introduce vibration and mechanical noises to system are eliminated, important flexibilities are introduced by DMD application, critical parameters such as pinhole size and pinhole shape can easily be changed, local illumination, which supplies uniform illumination on detector, can be introduced. The main challenges are differences between the images produced by the real illumination pinhole and the DMD, respectively, is the contrast ratio. The ground level intensity of the DMD image is higher because of stray light from the mirror edges and the protective glass layer. At the same time, the maximum intensity is lower because of transmission loss through the glass and reflection loss of the mirror elements. However, although the contrast ratio is worse with a DMD, the depth response curves taken with a regular pinhole and with a DMD show perfect comparability.

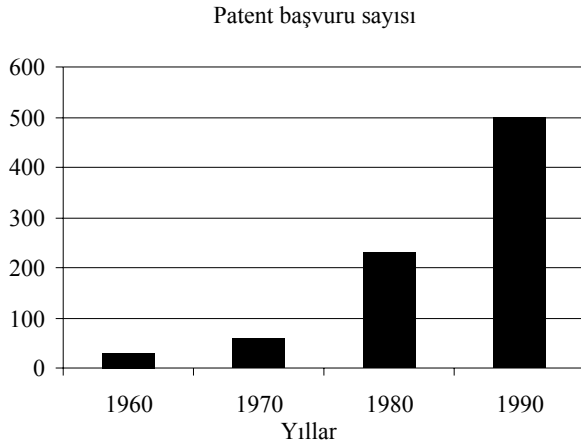
This new microscope offers unique flexibility for pinhole size and shape that existing system can not do. It is also showed that the measurement results of the developed system are comparable with the stylus instruments and DMD based optical systems are an alternative to tactile techniques.

Keywords: DMD, optical measurement, confocal microscopy.

¹ DMD is the trademark of Texas Instruments.

Giriş

Mikro-elektronik ve hassas mühendislik yüzeyleri başta olmak üzere temassız ölçme cihazlarına duyulan ihtiyaç uzun zamandır bilinen ve kabul edilmiş bir gerçektir. Bunun en açık örneği ise optik ölçme cihazları konusunda görülen patent başvurularındaki artıştır (Şekil 1) (Schewenke, 2002).



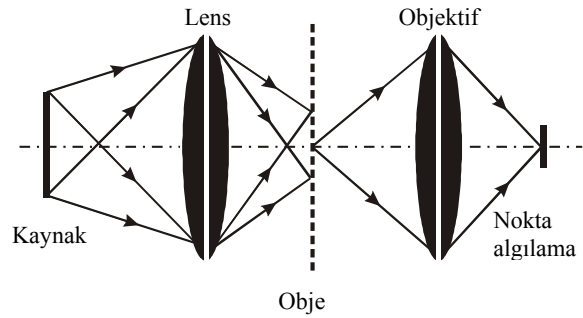
Şekil 1. Yıllara göre optik ölçme cihazları konusunda yapılan patent başvuruları

Optik ölçme teknikleri son on yıl içerisinde önemli bir ilerleme kaydetmiş ve ölçme hassasiyetleri temaslı ölçme cihazları kadar yüksek seviyelere ulaştırılmıştır. Optik ölçme teknikleri içinde en yaygın kabul görmüş olan teknik ise konfokal mikroskobudur. Özellikle son yıllarda bilgisayar destekli görüntü işleme tekniklerinin büyük bir ilerleme kaydetmesi konfokal ölçümlerin tercih sebebi olmasında büyük bir rol oynamıştır.

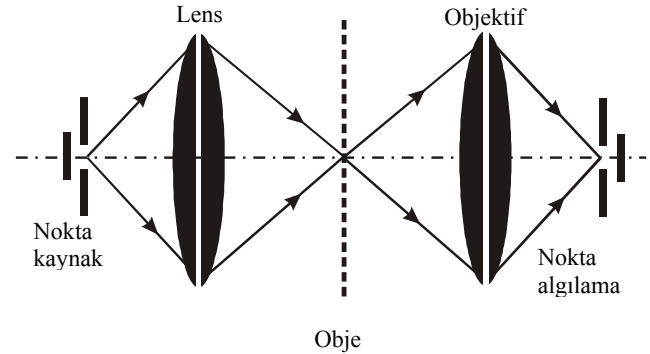
İlk defa Minsky tarafından 1960'ların başında geliştirilen konfokal mikroskop uygulamasının temelinde klasik mikroskoplardaki uygulamalardan, objenin ışık demeti ile aydınlatılması ve yine aydınlatılan bütün bölgenin detektör üzerine düşürülmesi (Şekil 2), farklı olarak nokta ışık kaynağı ve nokta algılama yapılmaktadır (Şekil 3) (Minsky, 1961).

Klasik mikroskop uygulamalarında en önemli detay, görüntü oluşturma işlemi öncelikli ve ağırlıklı olarak mikroskop objektifi tarafından gerçekleştirilmekte ve aynı zamanda objektif sistemin yatay çözünürlüğünü belirleyen bir

eleman olarak görev yapmaktadır. Bunun bir sonucu olarak elde edilen görüntüde eğer ölçülecek obje üzerinde mikroskop objektifinin derinlik çözünürlüğünden daha büyük bir bölge var ise bu bölge veya bölgeler net olarak görülemeyecektir. Konfokal mikroskop uygulamasında ise mikroskop objektifi ve kondensör lens eşit ağırlığa sahiptir. Bu eşit görev paylaşımı görüntü oluşturulması sırasında daha net bir imaj elde edilmesinin yanında daha yüksek kontrast oranı elde edilmesine de yardımcı olur (Wilson ve Sheppard, 1984).



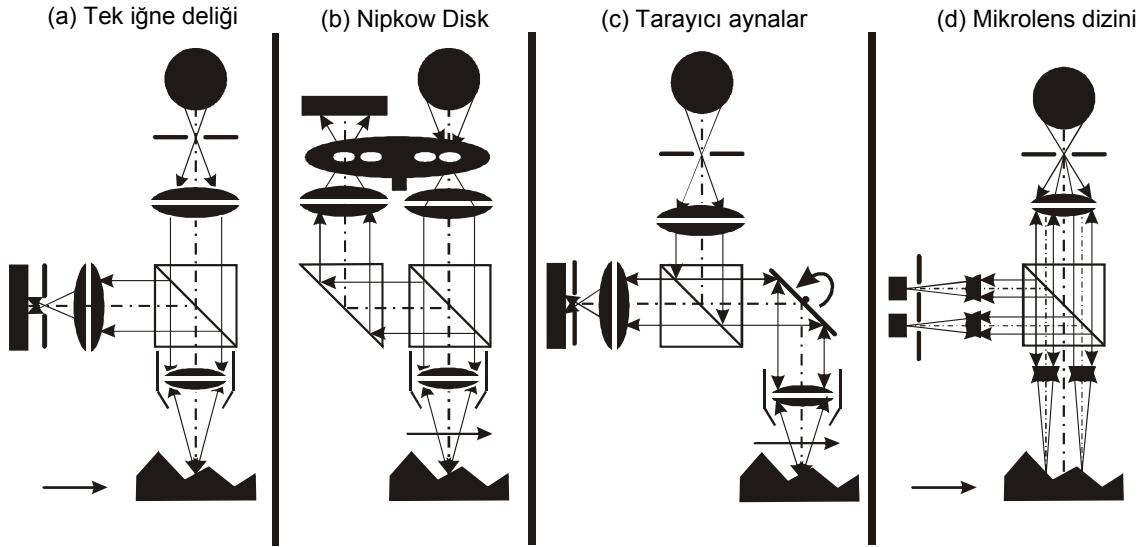
Şekil 2. Klasik mikroskop çalışma prensibi



Şekil 3. Konfokal mikroskop çalışma prensibi

İcadından bugüne kadar konfokal mikroskopun çeşitli türleri uygulama amaçlarına bağlı olarak geliştirilmiştir. Konfokal mikroskop çeşitleri (Şekil 4) temel olarak 2 gruba ayrılırlar. Tek ışınli sistemler Şekil 4(a) ve Şekil 4(c)'de, çok ışınli sistemler Şekil 4(b) ve Şekil 4(d)'de gösterilmiştir.

Tek ışınli sistemlerde yatay tarama işlemi (x, y) mikroskopun hareketi veya objenin hareketi ile sağlanır. Bu tür sistemlerin en büyük avantajı



Şekil 4. Konfokal mikroskop çeşitleri

nokta ışık kaynağı ile nokta detektör tam olarak optik eksen üzerinde yer alırlar ve yüksek dereceden lens hatalarının düzeltilmesine gerek olmadan sadece koma, yatay renk düzeltmeleri ile yüksek performans elde edilebilir. Böylece basit ve ucuz bir sistem gerçekleştirilebilir, uygulamasının en iyi örneklerinden birisi CD çalarlardır. Teknik uygulamalarda profilmeter olarak adlandırılan bu sistemlerin en büyük dezavantajları toplam ölçme zamanlarının uzunluğudur. Çok ışınli sistemlerde çoklu algılama eş zamanlı olarak CCD veya benzeri bir detektör ile sağlanır. Çok ışınli sistemlerin ilk uygulaması Petran ve Hadravsky tarafından Nipkow diski kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Petran vd., 1968). Diskin bir yarısı nokta ışık kaynakları olarak kullanılırken diğer yarısı da algılama nokta detektörünün yerine kullanılmıştır. Çok ışınli tarama, ölçüm zamanı bakımından büyük avantajlar sağlarken, gerek optik gerekse mekanik toleranslar konusunda ciddi problemleri de beraberinde getirmiştir. Konfokal mikroskop alanında en son ve en önemli çalışmalar Kino, Corle ve Xiao tarafından gerçekleştirilmiştir (Xiao ve Kino, 1984; Corle, 1990; Xiao, 1990). Daha önceki çalışmalardan farklı olarak Nipkow diskinin iki farklı tarafını kullanmak yerine aynı delik hem ışık nokta kaynağı hem de algılama nokta detektörü olarak kullanılmıştır. Geliştirilen sistemin en büyük dezavantajı ışın bölücünün Nipkow diskinden önce ışık kaynağının di-

rekt önüne konulmuş olmasıdır. Bu yüzden istenmeyen yansımalarından korunmak için hem ışın ayırıcının hem de Nipkow diskinin özel tasarımı gerekmektedir.

Bu sistemin modern uygulamalarında test parçası diskin bir turu sırasında tam 12 defa taranır. Genelde bu sistemlerde disk tarama frekansı yaklaşık 4 Hz ve resim yakalama zamanı 20 msn seviyelerindedir. Disk ise her birinin çapı 20 μm olan ve araları birbirinden 120 μm mesafede olan deliklerden oluşur.

Endüstriyel gelişmelere paralel olarak ölçme cihazlarında ihtiyaç duyulan ölçütler de artmış, gerek imalat hattında gerek araştırma laboratuvarı seviyesinde hassasiyeti ve doğruluğu daha yüksek ölçme cihazlarına gereksinim duyulmaya başlanmıştır. Mevcut sistemlerin geliştirilmeye açık alanları olarak aşağıdaki başlıklar sıralanabilir.

- Daha kısa resim yakalama zamanı
- Arttırılmış derinlik çözünürlüğü
- Arttırılmış yatay çözünürlüğü
- Kullanım alanındaki esneklik

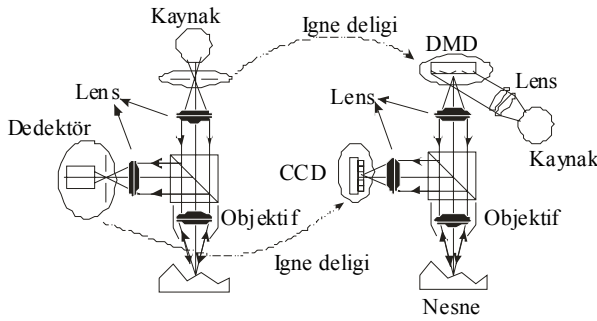
Dijital Mikroayna Dizinli konfokal mikroskop

Geliştirilen yeni konfokal sistemin dizayn fikri Şekil 5'te gösterilmektedir. Klasik konfokal

mikroskoplarla karşılaştırıldığı zaman temel değişiklikler sırasıyla şöyle sıralanabilir.

- Klasik nokta ışık kaynağı yerine Dijital Mikroayna Dizini (DMD™)
- Nokta algılama detektörü yerine seçici CCD kamera

Sistemin geri kalan parçaları lensler, mikroskop objektifi ve ışın bölücü her iki sistemin değişmeyen parçalarıdır. Üç boyutlu görüntüleme için gerekli olan hassas düşey tarama, mikroskop objektifine takılacak olan bir piezo tarayıcı ile gerçekleştirilebilir. Geliştirilen sistemin anahtar elemanı Dijital Mikroayna Dizini (DMD™).



Şekil 5. Mikroayna dizinli konfokal mikroskop fikrinin geliştirilmesi

Dijital Mikroayna Dizini ve özellikleri

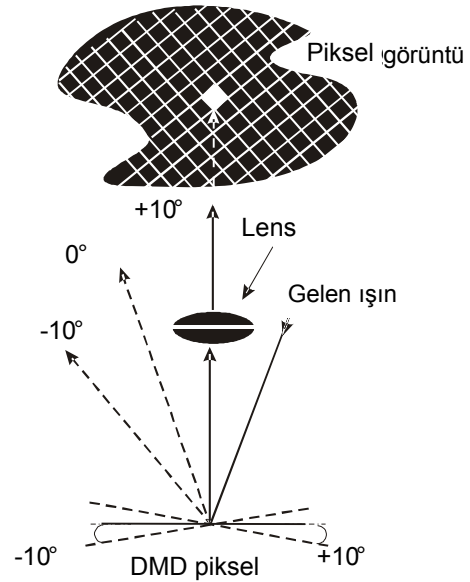
1987 yılında Texas Instruments tarafından icat edilen ve bunu takip eden on yıl boyunca sürekli olarak geliştirilen bu cihaz günümüzün bir Mikro-Elektro-Mekanik-Sistem (MEMS) harikası olarak kabul edilmektedir (Dunn ve Hofling, 2007). Elektrostatik kuvvetlerin yardımı ile her bir ayna kendi çapraz eksenini etrafında $\pm 10^\circ$ dönme kapasitesine sahiptir. Dijital mikro-ayna dizinin temel özellikleri Tablo 1’de özetlenmiştir. Asıl tasarım amaçları olarak dijital mikro dizinli aynalar projeksiyon makineleri için geliştirilmişlerdir. Darbe aralığı modülasyonu kullanılarak beyaz ile siyah arasındaki tonların kolayca yaratılabiliyor olması bu teknoloji harikası cihazı çizgi projeksiyon cihazlarında olduğu gibi hassas optik ölçme cihazları için de ideal bir parça haline getirmiştir.

Tablo 1. Dijital mikro ayna dizininin temel özellikleri

| | |
|------------------------|--|
| Üretici | Texas Instruments |
| Ayna ölçüleri | 16 μm x 16 μm |
| Aynalar arası mesafe | 1 μm |
| Doldurma faktörü | %89 |
| Malzeme | Alüminyum alaşımı |
| Mekanik anahtar zamanı | 15 μsn |
| Mevcut rezölüsyonlar | 800 x 600 1024 x 768 1280 x 1024 |

Dijital Mikroayna Dizininin ışık anahtarı olarak kullanılması

Dijital mikro ayna dizininin ışık anahtarı olarak çalışma prensibi Şekil 6’da gösterilmiştir (Hornbeck, 1997).

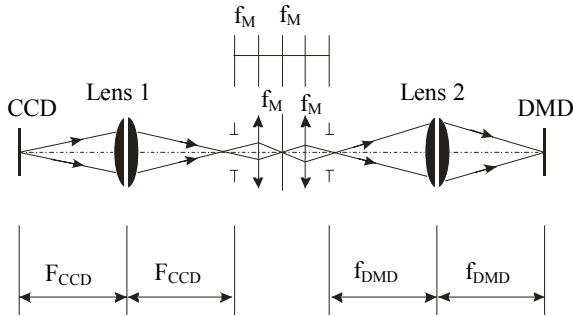


Şekil 6. DMD'nin optik anahtar olarak kullanılması

Aynalar uygulanan voltajın değerine bağlı olarak ışığı iki farklı yöne gönderebilirler. Uygun bir ışık kaynağı ve optikler ile birleştirildiği zaman, aynalar ışığı ya optik sistemin içerisine ya da optik sistem dışında hazırlanmış ışık kapağına doğru yönlendirebilir. Bu açıp kapama işlemi (optik anahtar) 2 μsn gibi çok kısa bir zaman dilimi içinde gerçekleştirilebilmektedir.

Optik sistemin oluşturulması

Geliştirilen sistemin kullanım amacına bağlı olarak, sistemin elemanları arasında farklı eşleştirmeler yapmak mümkündür. Geliştirilen sistemde DMDTM anahtar parça olarak ele alındığından yapılan eşleştirmede DMD'nin tüm alanının kullanılması esas tasarım parametresi olarak ele alınmıştır. Şekil 7, geliştirilen sistem için hazırlanmış optik tasarımı göstermektedir. Temel olarak Köhler aydınlatma prensibine dayanan ve görüntüleme amaçlı 4f sistemine uyulmaya çalışılan sistemde öncelikli amaç lens tasarımı ve geliştirilmesinden çok uygun katalog lensleri kullanarak DMD esaslı sistemin çalışırılığını göstermektir.



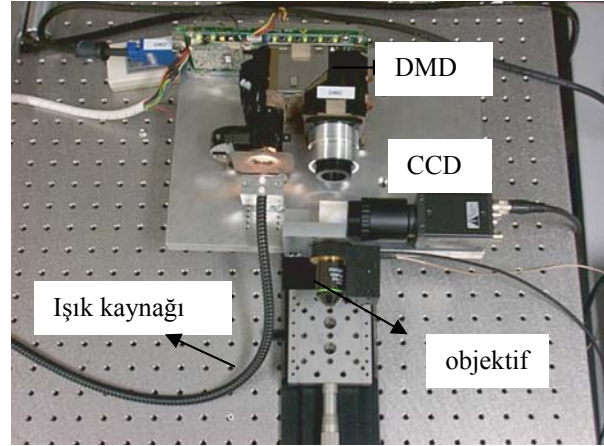
Şekil 7. Geliştirilen sistemin optik şeması

Deney düzeneğinin gerçekleştirilmesi ve ölçüm sonuçları

Konfokal sistemlerinin en büyük özelliği gerek aydınlatma kısmında gerekse algılama kısmında yer alan nokta kaynak ve nokta algılama özelliğidir. Klasik uygulamalarda daha önce de bahsedildiği gibi bu özellik Nipkow diski kullanılarak sağlanmaktadır. Bu küçük deliklerin şekillerinde ve/veya büyüklüklerinde yapılacak herhangi bir değişikliğin direkt ölçüm sonuçlarına yansıtacağı bilinen bir gerçektir. Bu yüzden ilk gerçekleştirilen deney gerçek bir nokta aydınlatma ve nokta algılama sistemi ile DMDTM kullanılan bir sistemin karşılaştırılması olmuştur. Karşılaştırmalar 10 μm bir klasik iğne deliği ile 1 DMD pikseli (16 μm x 16 μm) ve 100 μm klasik iğne deliği ile 5x5 DMD pikseli arasında yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçların ışığında DMD'nin klasik iğne deliklerinin yerini almasında teknik ve pratik açıdan herhangi bir problem olmadığı sonucuna varılmıştır. 10 μm iğne

deliğine karşılık 1 DMD pikseli karşılaştırması sırasında gözlenen temel ışık seviyesindeki fark ise, DMD üzerindeki farklı kaplama ve katmanların bir etkisi olarak görülmekte ve maksimum kayıp %10'nunu aşmamaktadır (Hornbeck, 1997).

Bu temel ve önemli bilginin teyidinden sonra bir sonraki aşama olan ölçümlerin yapılacağı düzeneğin son halini alabilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Ölçümler için gerçekleştirilen deney düzeneği

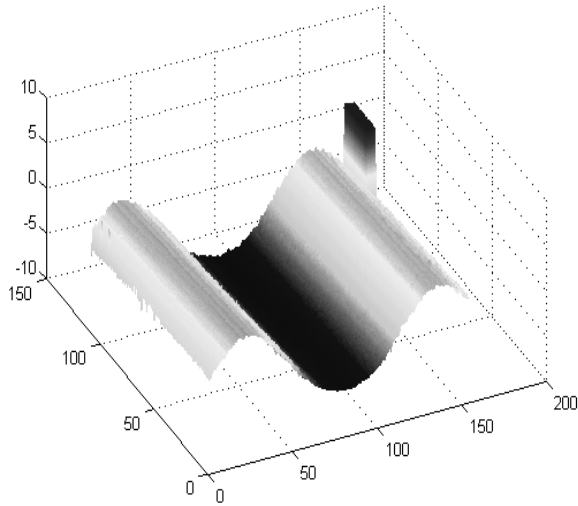
Kurulan deney düzeneğinde ışık kaynağı olarak Schott 2500 KL beyaz ışık kaynağı seçilmiş ve kaynaktan DMD ünitesinin girişine kadar 3 mm çapında bir fiber yardımı ile taşınmıştır. DMD ünitesinin girişinden itibaren yönlendirici aynaların yardımı ile ışık demetinin dijital aynaların üstüne gerekli olan 20° açı ile düşmesi sağlanmıştır. Böylece ayna -10° pozisyonunda iken ışık demeti optik eksen boyunca iletilecek ve lens 1'den ve ışın ayırıcıdan geçtikten sonra mikroskop objektifinden geçip obje üstüne odaklanacaktır. Obje üzerinden geri yansdıktan sonra tekrar önce mikroskop objektifi ardından ışın bölücüden geçip ikinci bir lens yardımı ile CCD üzerine odaklanacaktır. Konfokal üç boyutlu görüntü elde edilmesi temel olarak 2 farklı taramanın, yatay tarama DMD ünitesi ile (x, y yönünde) ve derinlik taraması mikroskop objektifine bağlanan piezo tarayıcı yardımı ile (z yönünde) gerçekleştirilir. Yapılan ilk ölçümde 20 defa büyütme ve 0.40 NA değerli mikroskop objektifi ile tam genişlik yarım yükseklik (full

width half maximum FWHM) değeri olarak 6.2 μm ve 50 defa büyütme ve 0.95 NA değerine sahip mikroskop objektifi ile FWHM değeri olarak 1.5 μm ölçülmüştür. Elde edilen deneysel değerler ile teorik değerler arasında küçük bir fark tespit edilmekle birlikte bu farkın küçük olması ve deney düzeneğinde kullanılan lenslerin özel olarak imal edilmiş lensler olmayıp direkt katalog lensleri olmaları nedeniyle bazı lens sapmalarının bu farka neden olacağı tartışma gerektirmeyecek bir konudur.

Geliştirilen sistem, çeşitli laboratuvar standartları (Sinüs standardı, Derinlik standardı, Yüzey pürüzlülüğü standardı) ile detaylı olarak test edilmiştir.

Sinüs standardı

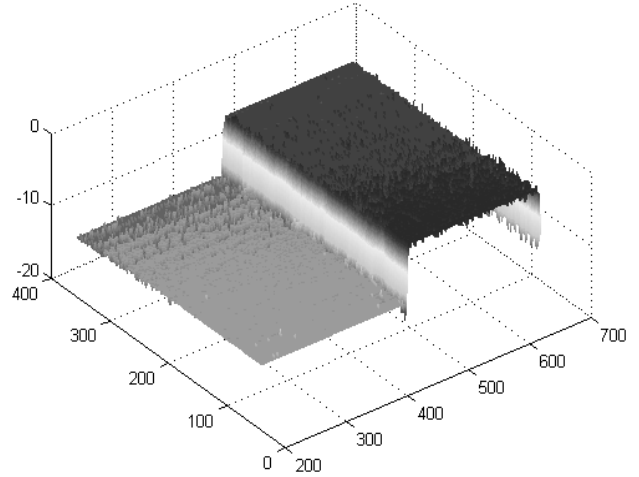
Tepeden tepeye 100 μm periyoda sahip olan bu laboratuvar standardı geliştirilen mikroskopun x ve y yönlerindeki kalibrasyonunu yapmak için kullanılmış ve birbirini takip eden ölçümlerde sinüs standardı 90° çevrilerek ölçme sisteminin x ve y yönlerindeki büyütme katsayısı 1 (bir) olarak bulunmuştur (Şekil 9).



Şekil 9. Sinüs standardı ölçümü

Derinlik standardı

Geliştirilmiş mikroskopun düşey çözünürlüğünü ve derinlik ölçme performansını test etme amacı ile, iki paralel yüzeyi arasındaki mesafe 2 μm olan laboratuvar standardı kullanılmış ve ölçüm sonucu Şekil 10'da verildiği gibi 2 μm olarak teyid edilmiştir.



Şekil 10. Derinlik standardı ölçüm sonucu

Yüzey pürüzlülüğü standardı

Geliştirilen sistemin klasik sistemlerden farklı olduğunu göstermek için birçok optik ölçme sisteminin zorlandığı veya ölçemediği yüzey pürüzlülüğü standardı ölçümü gerçekleştirilmiştir. Daha önce temaslı ölçme yöntemi ile kalibre edilmiş laboratuvar standardı, bir kez de bu proje kapsamında geliştirilen mikroskop ile ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Mekanik ölçümlerle optik ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

| | Sa | | Sq | |
|---------|---------|--------|---------|--------|
| | En kötü | En iyi | En kötü | En iyi |
| Optik | 0.197 | 0.118 | 0.232 | 0.139 |
| Mekanik | 0.193 | 0.118 | 0.225 | 0.140 |

Sonuçlar

Bu çalışmada Dijital Mikroayna Dizini (DMDTM) kullanılarak yeni bir tip konfokal mikroskop tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sistemde DMD ünitesi ışık nokta kaynağı ve CCD ise algılama nokta kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu çalışma ile ilk defa klasik fiziksel iğne deliklerinin yerine hayali iğne delikleri yaratılmış ve kullanılmıştır. Yapılan ölçümlerde geliştirilen sistemin mevcut durumu ile kapasitesi hakkında detaylı deneysel ve teorik bilgi edinilmiş, laboratuvar şartlarında gerçekleştirilen deney düzeneği ile elde edilen ölçüm sonuçları geliştirilen sistemin birçok endüstriyel optik ölçme sisteminden daha iyi ölçüm yaptığını göstermiştir.

tir. Bütün bunlara ek olarak DMD™ kullanımı ile birlikte klasik konfokal sistemlerden farklı olarak aşağıdaki avantajlar elde edilmiştir.

- DMD ile istenilen şekil ve istenilen büyüklüklerde iğne deliği yaratılabilir
- DMD'nin açılıp kapanma sürelerine bağlı olarak detektör üzerinde uniform ışık şiddeti sağlanabilir.

Kaynaklar

Corle, T.R., (1989). Studies in confocal scanning optical microscopy. *Doktora tezi*, Stanford University, Stanford, ABD.

Dunn, C. ve Hofling, R., (2007). Properties of the DMD digital micromirror device for new emerging applications in optical engineering, *Invited Papers Proceedings SPIE on Optical Measurement Systems for Industrial Inspection*, **6616**.

Hornbeck, L., (1997). Digital light processing™ for high-brightness, high-resolution applications, *Proceedings (Invited Paper)*, Electronic Imaging,

EI 97, Projection Displays III, San Jose, California, ABD.

Minsky, M., (1961). Microscopy apertures, *U.S Patent 3.013.467*, 1961.

Petran, M., Hardravy, M. ve Edger, D., (1968). Tandem-scanning reflected light microscope, *Journal of Optical Society America*, **58**, 661-664.

Schewenke, H., (2002). Optical methods for dimensional metrology in production engineering, *CIRP ANNALS Manufacturing Technology*, **51/2**, 685-699.

Wilson, T. ve Sheppard, C., (1984). *Theory and practice of confocal scanning microscope*, Academic Press, London.

Xiao, G. ve Kino, G., (1987). A real time confocal scanning microscope, *Proceedings SPIE, Scanning Imaging Technology*, **609**, 107-113.

Xiao, G.G., (1990). Confocal optical imaging systems and their applications in microscopy and range sensing, *Doktora Tezi*, Stanford University, Stanford, ABD.