

YAPILANDIRILMIŞ IŞIĞIN 3-BOYUTLU METROLOJİ UYGULAMALARI

C. Birlikseven¹, M. Çelik², D. Şendoğdu³, E. Sahin⁴, R. Hamid⁵

¹Tübitak – UME P.K. 54, 41470 Gebze / KOCAELİ - TÜRKİYE
Tel: 262 679 50 00 E-Mail:cengiz.birlikseven@ume.tubitak.gov.tr

²Tübitak – UME P.K. 54, 41470 Gebze / KOCAELİ - TÜRKİYE
Tel: 262 679 50 00 E-Mail:mehmet.celik@ume.tubitak.gov.tr

³Tübitak – UME P.K. 54, 41470 Gebze / KOCAELİ - TÜRKİYE
Tel: 262 679 50 00 E-Mail:damla.sendogdu@ume.tubitak.gov.tr

⁴Tübitak – UME P.K. 54, 41470 Gebze / KOCAELİ - TÜRKİYE
Tel: 262 679 50 00 E-Mail:ersoy.sahin@ume.tubitak.gov.tr

⁵Tübitak – UME P.K. 54, 41470 Gebze / KOCAELİ - TÜRKİYE
Tel: 262 679 50 00 E-Mail:ramiz.hamid@ume.tubitak.gov.tr

ÖZET

3 boyutlu optik metrolojide son yıllardaki yönelimlerden biri uzaysal faz ölçümü (spatial phase measurement) yöntemleriyle cisimlerin 3 boyutlu haritalarının çıkarılmasıdır. Bu çalışmada yapılandırılmış ışık kullanılarak 3 boyutlu objelerin haritalanmasına değinilecektir. Yapılandırılmış ışıkla haritalama son yıllarda popüler bir teknik olmuştur. Temel uğraşı bu metodun hassasiyetinin artırılmasına yöneliktir. Kameralar ve projektör kullanılarak uygulanan bu teknikte, 3 boyutlu cisim uzayına ışık paternleri uygulanarak fotoğrafları alınır. Alınan bu fotoğraflar gelişmiş görüntü işleme teknikleriyle işlenerek 3 boyutlu cisim haritalanmasına gidilir. Bu çalışmada yapılandırılmış ışığın kullanımı ve kullanılan görüntü işleme tekniklerinden bahsedilecektir.

anahtar sözcükler: yapılandırılmış ışık, 3 boyutlu modelleme, faz wrapping ve unwrapping, sinüsoidal faz öteleme metodu, metroloji

1.YAPILANDIRILMIŞ IŞIK

Gerçeğine çok yakın 3 boyutlu modellerin görüntü işleme yöntemleri ile oluşturulması hassasiyetin gerektiği durumlarda oldukça yavaştır ve de uğraş gerektirmektedir. Daha hızlı olan 3 boyutlu tarama sistemleri ise daha pahalıdır ve de uzmanlık gerektirmektedir. Bu çalışmada cisimlerin 3 boyutlu modellerinin daha yaygın ve nispeten daha ucuz malzeme ve teçhizat kullanılarak elde edilmesi yöntemlerinden bahsedilecektir. Bu doğrultuda yapılandırılmış ışıktan bahsetmekte fayda vardır. Yapılandırılmış ışık, uzaysal olarak filtrelenmiş ışık kaynağı kullanılarak 3 boyutlu modeli çıkarılacak cismin bir dizi resminin elde edilerek kullanılmasıdır. Yapılandırılmış ışık uygulamaları için bir adet dijital kamera, bir adet yapılandırılmış ışık kaynağı ve 3 boyutlu cismin gerçekçi olarak ölçeklendirilebilmesi için bir kalibrasyon düzeneğine ihtiyaç vardır.

Kontrollü ve hassas olarak hareket ettirilebilen lazer ışık demetlerinin, model olarak kullanılan cisim üzerinde noktasal olarak gezdirilmesi ve yansıyan ışık demetlerinin konum ve oryantasyon değerleri bilinen bir kameraya düşürülmesiyle 3 boyutlu model elde edilebilmektedir. Bu durumda 3 boyutlu modelin oluşturulabilmesi için n^2 tane görüntü kullanılmaktadır. Bu tür bir işlem noktasal değil de çizgisel ışık kaynağı kullanılarak yapıldığı takdirde n^2 tane görüntü yerine n tane görüntü kullanılarak da cismin 3 boyutlu modeli elde edilebilmektedir. n^2 tane görüntü yerine n tane görüntüyü işlemek daha kolaydır ve daha kısa bir sürede gerçekleşmektedir. Işık kodlanması olarak adlandırılan bir teknik kullanılarak görüntü sayısını daha da azaltmak ve n tane yerine $\log(n)$ tane görüntüyü kullanarak işlem zamanı optimizasyonu sağlamak mümkündür.

Bahsi edilen tekniklerde kamera ve projektörün (ışık kaynağı) dahili ve harici parametrelerinin kontrolü için kalibrasyon ihtiyacı doğmaktadır. Odak uzunluğu, mercekle bozulma (distorsiyon) faktörü ve görüntü merkezi gibi kamera ve

ışık kaynağına göre sabit olarak kalan parametreler dahili parametreler olarak; dönme ve ilerleme gibi kamera, ışık kaynağı ve cisim arasındaki bağıntıyı ifade eden transformasyonlar ise harici parametreler olarak adlandırılmaktadır.

Kodlanmış, bir başka deyişle yapılandırılmış ışık kullanılarak elde edilen görüntülerden 3 boyutlu modelin çıkarılması için, bazı kod çözücü ve faz wrapping işlem ve algoritmalarının kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada bir faz wrapping işlemi olan yapılandırılmış ışık sinüsoidal faz-öteleme metodu ve ardından elde edilen faz haritalarının faz unwrapping algoritmaları kullanılarak yükseklik haritalarına dönüştürülmesinden bahsedilecektir.

2.YAPILANDIRILMIŞ IŞIK SINÜSOİDAL FAZ-ÖTELEME METODU

Sinüsoidal faz öteleme metodu farklı büyüklüklerdeki cisimlerin metrolojik olarak 3 boyutlu modellerinin oluşturulmasında sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntemde; her pikselinde faz bilgisinin elde edildiği bir dizi fazı ötelenmiş sinüsoidal saçak yapısı kaydedilmektedir. Bu faz bilgisi görüntü alanı ve projeksiyon alanı arasındaki karşılıklı ilişkiyi göstermektedir. Bu ilişki elde edildikten sonra cismin 3 boyutlu koordinat bilgisi triangulation yöntemi kullanılarak elde edilmektedir. Farklı başka sinüsoidal faz öteleme metodları geliştirilmiş olmakla birlikte bu çalışmada standart üç basamaklı algoritma kullanılmıştır. Üç basamaklı algoritmada üç adet fazı birbirinden 120° ötelenmiş görüntü kullanılmaktadır. 120° faz farklı bu üç görüntünün şiddeti aşağıdaki eşitlik grubuyla verilmektedir:

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) - 2\pi/3] \quad (1)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y)] \quad (2)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + 2\pi/3] \quad (3)$$

$I'(x,y)$: ortalama şiddet, $I''(x,y)$: ışık şiddet modülasyonu ve $\phi(x,y)$: elde edilecek olan fazdır. Bu üç eşitlik çözülerek $\phi(x,y)$ için aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir:

$$\phi(x, y) = \arctan\left[\frac{\sqrt{3}(I_1 - I_3)}{2I_2 - I_1 - I_3}\right] \quad (4)$$

Eşitlik (4) değeri her piksel için 0 ile 2π arasında değişen mod 2π fazıdır. Faz unwrapping algoritmaları kullanılarak bu 2π süreksizlikleri ortadan kaldırılır ve 3 boyutlu sürekli bir faz haritası elde edilir. Bu faz haritaları yükseklik haritalarına triangulation temelli fazdan yüksekliğe dönüştürme algoritmaları veya daha gelişmiş faz işleme algoritmaları kullanılarak dönüştürülmektedirler [2].

Günümüzde faz ölçüm tekniklerinin gelişmesiyle birlikte hassas, temassız 3 boyutlu algılama ve modelleme teknikleri giderek önem kazanmaktadır. Faz Ölçüm Profilometresi (PMP) ve Fourier-transform profilometresi (FTP) gibi uygulamalarda da bu faz ölçüm teknikleri kullanılmaktadır [3]. FTP metodu bir tek saçak görüntüsüne ihtiyaç duymaktadır ve dolayısı ile daha rahat işlenebilmektedir. Aynı zamanda gürültü ve arka plan güç değişimlerinin frekans düzleminde bant-sınırlı filtrelenmesi de bir avantaja dönüşmektedir. Buna rağmen daha kompleks modeller ve hassasiyetin gerektiği durumlarda ise PMP yöntemi daha etkin bir yöntem olabilmektedir. Gerek PMP, gerekse de FTP yöntemlerinde bir cismin faz verisinden yükseklik bilgisinin elde edilmesi için faz unwrapping teknik ve algoritmalarına başvurulmaktadır. Bu tekniklerle elde edilen wrapped faz $-\pi$ ile $+\pi$ arasında periyodik olarak değişmektedir ve sürekli doğal fazın elde edilmesi için un-wrap edilmelidir. Teorik olarak faz unwrapping komşu piksellerdeki wrapped fazların karşılaştırılması, 2π ve katları fazların; komşu piksellerdeki fazların $-\pi$ ile $+\pi$ aralığında kalmasını sağlamak üzere çıkarılması veya toplanması ile gerçekleşmektedir. Fakat özellikle kompleks cisim modelleme ve ölçümlerinde, ölçülen yüzeydeki düzensizlikler saçaklarda lokal kirlenmelere ve de süreksizliklere yol açabilmektedir. Bu düzensizlikler aynı zamanda şiddet fazlalığına ve de saçak dağılımında seyrelmeye sebep olmaktadır. Böyle durumlarda doğal ve doğru fazın bulunması güçleşebilmekte kimi zaman ise imkansızlaşmaktadır [4].

Literatürde pek çok gelişmiş faz unwrapping algoritması bulunmaktadır. Bu algoritmalar yol bağımlı algoritmalar ve minimum norm algoritmaları olmak üzere 2 temel başlık altında toplanmıştır. Goldstein branch cut, mask cut, Flynn minimum süreksizlik yaklaşım algoritmaları yol bağımlı algoritmalarla örnek olarak verilebilir. Minimum norm algoritmalarına örnek olarak ise minimum L^p -Norm formülasyonu, ağırlıklı ortalamalı ve ortalamasız en küçük kareler faz

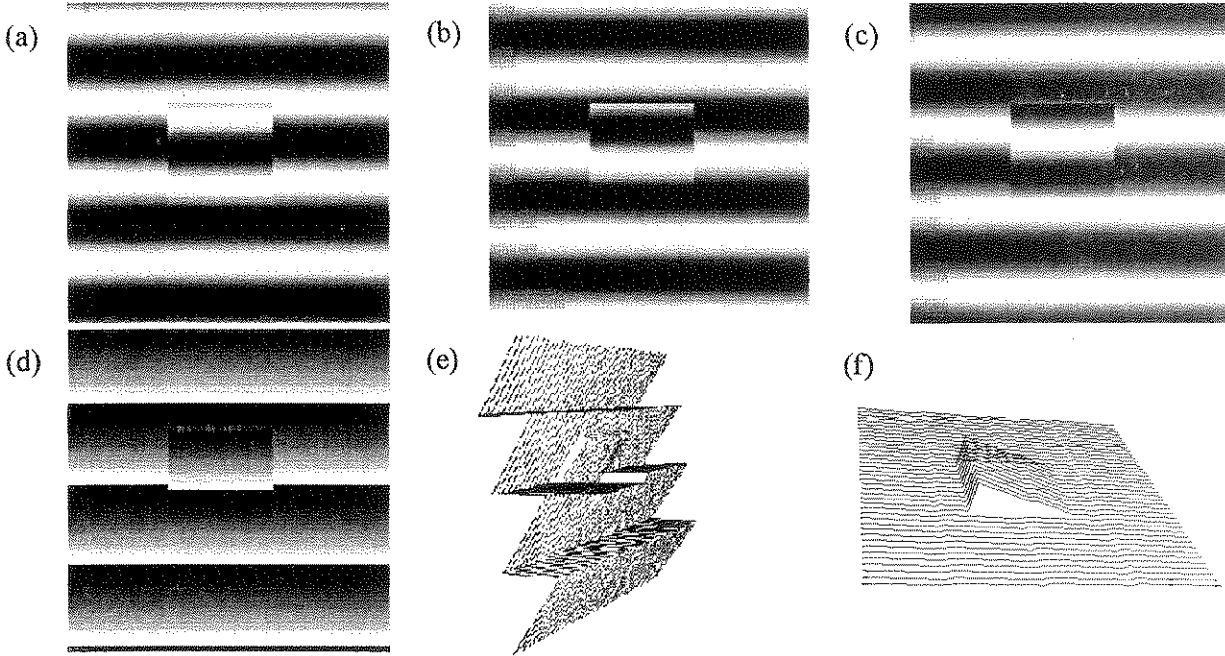
unwrapping algoritmaları verilebilir [5].

Bu çalışmada, kuramsal olarak oluşturulmuş model üzerine 120 derecelik faz ötelemeleriyle kuramsal saçak desenleri uygulanmış ve oluşturulmuş 3 adet görüntüden (Şekil 1. a,b,c) wrapped faz yapısı (Şekil 1. d) elde edilmiştir. 3 boyutlu wrapped faz görüntüsü ise Şekil 1. (e) de verilmiştir. Elde edilen bu faz haritasından yükseklik bilgisine geçiş basit bir faz unwrapping algoritması ile sağlanmıştır (Şekil 1. f). Modelin ölçeği yazılıma dahil edilen ölçek faktörü kullanılarak değiştirilebilmektedir.

3.SONUÇ

3 boyutlu görüntü elde etme ve sinyal işleme yöntemleri; bilgisayar grafikleri, sanal gerçeklik, tıp ve dişçilik, makine görüş, üretim hatları kontrolü, prototipleme ve metroloji gibi pek çok farklı alanda kullanılmakta ve giderek yaygınlaşmaktadır. Yapılandırılmış ışık; çok büyük sayıda verinin oldukça çabuk olarak işlenebilmesi ve gerekli olan teçhizatın oldukça ucuz ve ulaşılabilir olmasından dolayı 3 boyutlu modellemede, yüzey ve yükseklik haritalarının çıkarılmasında sıkça kullanılmaktadır. Günümüzde yapılandırılmış ışığın metrolojik amaçlı kullanılabilmesi için farklı sinyal işleme teknik ve algoritmaları kullanılmaktadır. Pek çok optik metroloji laboratuvarı maksimum doğruluk ve derinlik bilgisinin elde edilebilmesi amacı ile yapılandırılmış ışığın optimizasyonu için çalışmaktadır. Bu amaçla yapılandırılmış farklı ışık paternleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Kalibrasyondan gelebilecek belirsizlik ve hataların minimuma indirilebilmesi için yeni kalibrasyon teknikleri üzerinde çalışılmaktadır. Dijital görüntüleme, dijital projeksiyon cihazları, hızlı ve yüksek kapasiteli kişisel bilgisayar teknolojilerindeki son gelişmeler, 3 boyutlu cisim modellerinin gerçek zamanlı olarak oluşturulabilmesine olanak sağlamaktadır. Kullanılan gelişmiş görüntü işleme teknik ve algoritmaları sayesinde elde edilen model metrolojik olarak da değer taşımaktadır.

Bilindiği gibi referans master blok ölçümleri frekansı stabilize edilmiş lazerlerin ve Köster interferometrelerinin kullanımıyla yüksek hassasiyetle (< 100 nm) ölçülebilmektedir. Bu hassas ölçümler faz öteleme teknikleri ile yapılmakta ve benzer yöntem ve algoritmalar ile analiz edilmektedir. Bu çalışma altyapısının ve sonuçlarının TÜBİTAK UME'de Köster interferometresi ile referans master blok ölçümlerinde kullanılması planlanmaktadır.



Şekil 1. 120° lik ötelenmiş saçak yapılı görüntüler (a,b,c), faz wrapped görüntü (d), 3 boyutlu faz wrapped görüntü (e), faz unwrapped 3 boyutlu model