

Lazerli Ölçme Kameralarının Teknik Özellikleri ve SR4000 ve CamBoard nano Kamera Ölçü Sonuçlarının Değerlendirilmesi

(Technical Investigation of Range Imaging Camera and Evaluation of Measurements from SR4000 and CamBoard nano Camera)

Cihan ALTUNTAŞ

Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 42075 Selçuklu/Konya, caltuntas@selcuk.edu.tr

ÖZET

Bilgi teknolojisi ve robotik uygulamalarıyla birlikte 3B konum bilgisi ölçme her geçen gün daha da önem kazanmakta ve daha fazla alanda kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak ölçme aletlerinin teknik özellikleri de geliştirilmektedir. 3B konum ölçmede kullanılan en yeni teknolojilerden birisi lazerli ölçme kamerası (LÖK) (Range Imaging Camera) dir ve LÖK ile konum bilgisi ölçme ve veri işlemede yeni araştırma alanları ortaya çıkmıştır. LÖK'nin mevcut ölçme tekniklerine göre üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır. LÖK'nin ölçü hassasiyeti aletten ve çevreden kaynaklanan etkilere bağlı olarak değişmektedir. Kameranın ölçü hassasiyeti ve ölçü kısıtlamaları kullanım alanlarını da belirlemektedir. Bu çalışmada lazerli ölçme kameralarının teknik özellikleri tanıtılmış ve SwissRanger4000 ve CamBoard nano kameralarının ölçme hassasiyetlerine ilişkin araştırma sonuçları verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lazerli ölçme kamerası, 3B ölçme, Hassasiyet, SR4000, CamBoard nano

ABSTRACT

3D location measurement gains importance and being used more and more together with information technology and robotic applications. Technical properties of measurement tools are improved accordingly. One of the recent technologies used in 3D location measurement is range imaging (RIM) camera and new study fields have emerged in measurement and data processing together with RIM camera. RIM camera has advantages and disadvantages compared to current measurement techniques. Its measurement precision varies according to effects resulting from the device and environment. Measurement precision and restrictions of camera determine usage areas as well. In this study technical properties of RIM camera were explained and study results concerning measurement precisions of Swiss Ranger4000 and CamBoard nano cameras were given.

Keywords: Range imaging camera, 3D measurement, Precision, SR4000, CamBoard nano

1. GİRİŞ

Fotogrametri kelimesi ışık yardımıyla ölçme anlamındadır ve bugüne kadar farklı teknikler kullanılarak ölçüler gerçekleştirilmiştir. Yakın

mesafe fotogrametrisinde kullanılan en son teknoloji lazerli ölçme kamerası (LÖK) dir. LÖK ölçme alanının konum bilgilerini anlık olarak ölçmektedir. Bu sayede hareketli cisimlerin ölçüleri de yapılabilmektedir. Kameranın ölçme tekniğine bağlı olarak 3B nokta konum bilgisi ölçme ve veri işlemede de farklı yöntemler uygulanmaktadır. LÖK bugüne kadar robotik, güvenlik, endüstriyel, bilgisayar teknolojisi gibi alanlarda deformasyon ölçümü (Lichti ve ark., 2012a), el hareketlerinin tanımlanması (Lahamy ve Lichti, 2012), yol ve konum tanımlama (Cazorla ve ark., 2010; Oggier ve ark., 2005), hareketli obje tanımlama (Teizer, 2008) gibi pek çok amaç için kullanılmıştır.

Lazerli ölçme kameraları ilk kez 1999 yılında geliştirilmiş ve bu güne kadar teknik özellikleri ile ilgili pek çok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada LÖK'nin teknik özellikleri tanıtıldıktan sonra; ışıklanma süresi (IS) (integration time), yüzey yapısı ve ölçme mesafesinin SwissRanger4000 (SR4000) ve CamBoard nano kameralarının ölçü hassasiyetlerine etkisi araştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Beringe (2012) ve Oggier ve ark. (2004) SwissRanger 3D kamerasının çalışma prensipleri ayrıntılı olarak incelemiş ve pek çok çalışmada lazer tarama ve fotogrametrik yöntem yerine kullanılabilirliğini belirtmiştir. Jamtsho ve Lichti (2010) LÖK ölçüsünde saçılma distorsiyonunun etkisini modellemiş, Tournas ve Tsakiri (2010) mesafe ölçme kalibrasyonu yapmıştır. Centeno ve Jutzi (2010) farklı yüzey tipleri için farklı ölçme uzaklıklarında ölçüler gerçekleştirmiş ve bunların yansıma değerleri ve hassasiyetlerini karşılaştırmıştır. Ölçülerin konumsal doğruluğunun yeterli seviyede olduğu ve ışıklanma süresinin ortamın ışık durumuna göre ayarlanması gerektiği belirtilmiştir. Işıklanma süresi uygun seçilmediği durumlarda hatalı noktalar oluştuğu ve bu değerler çok büyük seçilmesinin noktaların kameraya ölçme düzleminde daha yakında, küçük seçilmesinin ise noktaların ölçülen yüzeyin arkasında

oluşmasına neden olduğu belirtilmiştir. Kahlmann vd. (2006) SwissRanger-SR2 kamerasının mesafe ölçme doğruluğunun 5-10mm olduğunu ve aletin iç ve dış sıcaklıklarının bu doğruluğu etkilediğini belirtmiştir. İç sıcaklıktan kaynaklanan hata alet çalışmaya başladıktan birkaç saniye sonra düzenli bir hata kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır. İç ve dış ortamdaki sıcaklık farkından kaynaklanan etkilerin modellenemediği belirtilmiştir. Ayrıca kamera jeodezik ölçü aleti (total station) üzerine monte edilerek merkez pikselin ölçülen mesafesi ile total station ile ölçülen mesafeler karşılaştırılmış ve aletin bağlı ölçme hassasiyetinin birkaç milimetre olduğu belirtilmiştir. Kahlmann (2007) SR-2 ve SR-3000 kameralarının ölçme prensiplerini verdikten sonra, ışıklandırma süresi, yüzeyin yansıtma özelliği ve kameranın ışın açıklığının ölçü hassasiyetine etkisini araştırmıştır. Kameranın ideal ölçme zamanı (warm-up) araştırılmış ve SR-2 için ortalama 8 dakika, SR-3000 için 4 dakika olarak ölçülmüştür. Rapp (2007) PMD[vision] 19k, SR3000 ve Effector O3D kameralarının ışın (time-of-flight özellikleri) ve görüntüleme sistemlerini ayrıntılı olarak incelemiş ve LÖK ile ölçü yapılırken karşılaşılabilecek durumlar dikkate alınarak bazı ölçme tavsiyeleri vermiştir. Diğer yandan 64x64 piksel boyutlu CMOS kamera Gokturk vd. (2004) tarafından tanıtılmış ve ölçüleri etkileyen nedenler incelenerek ölçü sonuçları verilmiştir.

Kameranın kalibrasyonunda farklı teknikler ve test düzenekleri kullanılmıştır. Lichti ve Qi (2012), Shahbazi vd. (2011), Lichti vd. (2010), Lichti (2008), ve Becerro (2008) kameranın self-kalibrasyonunu ışın demetleri yöntemi ile yapmıştır. Lichti vd. (2012b) SR3000 ve SR4000 kameraların self-kalibrasyonunu yapmış ve saçılma hatasının etkisini modellemiştir.

Piatti (2010) PMD CamCube3 ve SR4000 kameralarını test etmiş ve bu kameralarla yapılan ölçülerin modelleme çalışmalarında kullanılmasını araştırmıştır. Yapılan çalışmada SR4000 kamera için 1.5-4.0m aralığı etkili ölçme mesafesi olarak bulunmuştur. Jamtsho (2010) ise kameranın kalibrasyonunu yaptıktan sonra hata kaynaklarını araştırmış ve deformasyon ölçmek amacıyla kullanmıştır. SR3000 ve SR4000 kameraları kullanılarak 3mm lik deformasyonlar dahi 0.3mm standart sapma ile ölçülebilmıştır. Her iki çalışmada da kamera 3B modelleme amacıyla kullanılmış farklı bakış açılarından yapılan ölçüler iteratif en yakın nokta yöntemi ile (Besl ve McKay, 1992; Chen ve Medioni, 1992) birleştirilmiştir. Boehm ve Pattinson (2010) ise lazer tarayıcı ve kamera ölçülerini iteratif

yöntemle birleştirmiştir. Cui vd. (2010), ortalama 50cm boyutlu objeleri LÖK ile modellemiş ve lazer tarama yöntemi ile karşılaştırmıştır. Taranan obje sabit yada tarayıcı sabit olarak ölçüler yapılmış ve kameranın düşük çözünürlü olmasının etkisi farklı bakış açılarından yapılan ölçülerin birleştirilmesi ile giderilmiştir. Yine burada da ölçüler iteratif yöntemle birleştirilmiştir.

Clemente vd. (2007) ve May vd. (2009) LÖK'nin hareketli ölçme uygulamalarında kullanılmasını araştırmıştır. Kameranın çalışma prensipleri ve hata kaynakları tanımladıktan sonra kameranın kalibrasyonu yapılmış ve hareketli ölçme gerçekleştirilmiştir. Hareketli ölçmelerde ölçüler arasındaki ilişkinin kurulmasında *Scale Invariant Feature Transform*, *Kanada-Lucas-Tomasi*, *Iterative Closest Point* yöntemleri karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda ardışık ölçüler arasındaki ilişkilerin kurulmasında görüntü eşleştirmesi yapan yöntemlerin nokta eşleştirmesi yapan yöntemlere göre daha yavaş olduğu görülmüştür. Benzer bir hareketli ölçme uygulaması Pirker vd. (2010) da verilmiştir.

Cazorla vd. (2010) da robotların görüş alanı tanımlamalarında LÖK'nin kullanımı ve robotik uygulamalarda fotogrametri yöntemine göre avantajları verilmiştir. Benzer şekilde, Frank vd., (2010) ve Sturm vd., (2010) hareketli robotların obje tanımlama ve izleme sistemleri için LÖK kullanmıştır.

Breuer vd. (2007) SR2 kamerası ile el hareketlerinin tespitini yapmıştır. Hussmann vd. (2008) ve Oggier vd. (2005) araç içini görüntüleyen kamera ile sürücünün el hareketlerini tanımlamış, araç dışını görüntüleyen kamera ile de aracın yoluna çıkan yayalar ve diğer engelleri tespit etmiştir. Ayrıca Oggier vd. (2005) nin çalışmasında LÖK ile interaktif ekran ve biyomedikal uygulamalar verilmiştir.

Teizer (2008) inşaat ve makine imalatı gibi alanlarda çalışanları iş kazalarından korumak için LÖK ile aktif uyarı sistemi oluşturulmasını araştırmıştır. Kameranın görüş alanındaki değişiklikler izlenerek olağan dışı hareketlerin tespiti ile aktif uyarı sistemi oluşturulabileceği gösterilmiştir.

3. LAZERLİ ÖLÇME KAMERASI (LÖK)

LÖK uçuş süresi (Time-of-Flight) tekniği ile ölçü yapmaktadır. Uçuş süresi yönteminde; doğrudan (direct time-of-flight), dolaylı (indirect time-of-flight) ve sahte gürültü (pseudo-noise) olmak üzere üç yöntem kullanılmaktadır (Beringe

2012; Jamtsho, 2010; Piatti, 2010; Lange, 2000). Bu ölçme tekniğinde her piksel için ayrı bir sinyal gönderilir ve gönderilen ve alınan sinyal farklarından piksellere karşılık gelen cisim noktalarının koordinatları (XYZ) ve yansıma (A) değerleri anlık olarak ölçülür. Ölçüler kamera kayıt hızında ve tekrarlı olarak yapılır. LÖK kızılötesi (infra-red) dalga boyu bölgesinde ışınlar kullanır ve bu ışınların insan sağlığı için olumsuz etkisi yoktur. Taşıyıcı dalga boyu frekansları değişik değerlerde olabilir. Güneş ışınları kameranın arka yüzeyinde yansımaya (background illumination), dolayısıyla mesafe ve yansıma değerlerinin yanlış ölçülmesine neden olmaktadır (Karel vd., 2012). Bunu önlemek için sadece kullanılan dalga boyundaki ışınları geçiren filtreler kullanılmaktadır ancak yinede daha büyük dalga boylu ışınlar filtreden geçebilmektedir. Bu nedenle kamera sadece bina içi alanlarda kullanılmalı doğrudan güneş ışığında kullanılmamalıdır (Jamtsho, 2010). Farklı marka ve modelde lazerli ölçme kameralarının teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. LÖK'nin ölçü sonucuna etki eden değerler Gokturk vd. (2004) de (1) bağıntısı ile verilmektedir.

$$R_R = \frac{c}{2f_m} \sqrt{\frac{A}{P_{laser} k_{opt} q_e r IT}} \quad (1)$$

Bu eşitlikte;

R_R : Ölçülen mesafe

c : Sabit değer

f_m : Modülasyon frekansı

A : Toplam hedef aydınlanması

P_{laser} : Lazer ışın kaynağının optik gücü

IT : Işıklanma süresi (Integration time)

r : Yüzey yansıtıcılığı

q_e : Kuantum etkisi (Quantum efficiency)

k_{opt} : Sabit değer (optik sistemin özelliklerine göre belirlenir).

Bu eşitlikten de görüldüğü gibi LÖK'nin ölçü sonucunu etkileyen en önemli değerlerden birisi ışıklandırma süresidir. Işıklanma süresi her modülasyon (görüntü oluşturma) periyodunda piksellerin ışık kaydetme (ışığa maruz kalma) süresini tanımlar. Ölçülerden yüksek hassasiyet elde edilebilmesi için ışıklandırma süresi ideal değerinde yada üzerinde olmalıdır. Işıklanma süresinin uygun değeri yüzeyin yapısına, yansıtma özelliğine, ölçme uzaklığına ve ışının geliş açısına göre değişmektedir. Bu değerlerin gereğinden büyük olması görüntüde karama oluşmasına (ışınlar cisme ulaşmadığı için ışınlar kamera ile cisim arasında kalmaktadır), küçük olması da hatalı nokta sayısının artmasına

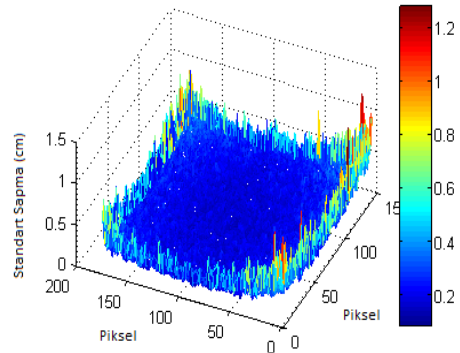
(ölçülen noktalar cismin arkasına geçmektedir) neden olmaktadır. Diğer yandan ışıklandırma süresinin fazla büyük olması kameranın iç sıcaklığını artırmaktadır. Hareketli ölçmelerde ışıklandırma süresinin düşük olması gerekir (Jamtsho, 2010).

Kameranın görüntü oluşturma sistemi normal bir kamerada fotoğraf oluşturma sistemine benzer (Kahlman, 2007). Her bir pikselin cisme olan uzaklıkları ölçüldükten sonra merkezi, kameranın optik eksenini üzerinde olan ve kameranın ön düzlemi ile çakışık dik koordinatlar hesaplanır (SR4000 Manual, 2012; Jamtsho, 2010). Koordinat sistemi sağ el koordinat sistemidir ve resim koordinat sistemine paraleldir. Kameranın arkasından bakınca +x eksenini sol taraf, +y eksenini yukarı doğru ve +z eksenini kameradan ölçülen cisme doğru olan dik eksenidir (Şekil 1).



Şekil 1. SR4000 kamera koordinat eksenleri

Sistemik ölçü hatalarından dolayı kameranın sabit konumunda aynı görüntü alanından kaydedilen ardışık ölçüler arasında farklılıklar oluşmaktadır (Şekil 2). Bu farkların etkisini en aza indirmek için aynı yerin birden fazla görüntüsü kaydedilerek ortalama görüntü dosyası oluşturulmaktadır.



Şekil 2. Her bir pikselin ölçülen derinlik mesafeleri (Z koordinatı) için standart sapma değerleri. (Mesafe=150 cm, IS=3.3 ms ve ölçü sayısı=30)

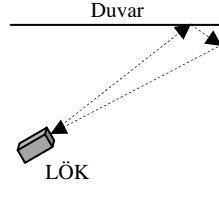
Tablo 1. Farklı marka ve model lazerli ölçme kameraları ve teknik özellikleri.

Üretici firma	Model	Görüş açısı (H°xV°)	Piksel sayısı (HXV)	Ölçme mesafesi (m)	Odak uz. (mm)	Ölçü doğruluğu	Dalga boyu (nm)	Frekans (MHz)	Çalışma sıcaklığı (°C)	Ölçme hızı (fps)	Ağırlık(gr)/ Boyutlar (mm)	Bağlantı	Kaynak adres
Fotonic	P70	57.5x45	640x480	0.8-3.5	-	24mm@0.8-2m 70mm@2-3.5m	-	-	5 to 40	30	1200/ 80x16x85.5	Ethernet	URL-1
	E70	70x53	160x120	0.1-7.0	-	30mm@3-7m/ 20mm@3-7m	850	15	-20 to 50	52	1000/ 80x80x80	Ethernet	URL-2
	E40	45x34	160x120	0.4-10.0	-	40mm@7-10m 40mm@7-10m	850	15	-20 to 50	52	800/ 80x80x86.3	Ethernet	URL-2
ifm	Effector O3D201	30x40	64x48	0.5-6.0	-	-	850	Up to 20Hz	-10 to 50	-	1185/ 137x75x95	Ethernet	URL-3
Mesa Imaging	SR4000	43x34	176x144	0.1-5.0	10.0	10mm/ 1σ, max 7mm	850	Up to 30	10 to 50	50	470/ 65x65x68	USB, Ethernet	URL-4
Optex	ZC-1070U	70x55	176x132	0.5-4.0	-	X,Y:5%(typ), Z:2%(typ)*2σ, 2%(typ)*2	850	20	0 to 50	60	600/ 160x72x50	USB	URL-5
Optrima nv	OptriCam DS10k-A	62.6 Diag.	120x90	1.0-10.0	3.7	<3cm@3.5m	870	-	-10 to 40	50	774x86x76	USB	URL-6
	OptriCam DS19k-A	73 Diag.	160x120	1.0-10.0	4	<3cm@3.5m	870	-	0 to 40	50	774x86x76	USB	URL-6
Panasonic	D-Imager EKL3106	60x44	160x120	1.2-5.0	-	3cm@2m	850	3 modes	-10 to 50	30	550/ 54x170x50.5	USB	URL-7
	D-Imager EKL3105	60x44	160x120	1.2-5.0	-	2cm@2m	850	3 modes	-10 to 50	30	550/ 54x170x50.5	USB	URL-7
PMD tech.	CamCube3	40x40	200x200	0.3-7.0	12.8	3mm@4m/1σ, max 3mm@4m	870	-	0 to 50	40	1438/ 60x60x60	USB	URL-8
	PhotonCS 19k-S3	90x68	160x120	0-2.0	-	5mm@1.5m	850	Up to 80	-40 to 85	90	/37x30x25	USB	URL-9
	CamBoard nano	90x68	160x120	0.05-0.5	-	<1cm	850	30	-	90	34/ 37x30x25	USB	URL-9 URL-12
Prime Sense	Carmine 1.08	57.5x45	640x480	0.8-3.5	-	2σ, @2m; X,Y axis: 3.4mm, Z axis:1.2cm/	-	-	5 to 40	30	/180x25x35	USB	URL-10
	Carmine 1.09	56.5x45	640x480	0.35-1.4	-	X,Y axis:2.6mm, Z axis:0.7mm @1.5m	-	-	10 to 40	30	/180x25x35	USB	URL-10
SoftKinetic	DS 325	74x58	320x240	0.15-1.0	-	1.4cm@1m	-	-	10 to 40	60	/105x30x23	USB	URL-11

a. Sistematik Ölçü Hataları ve Bozucu Etkiler

LÖK ölçülerini etkileyen sistematik hatalar ortamdan bağımsız ve ortama bağlı hatalar olmak üzere ikiye ayrılır. Ortamdan bağımsız sistematik hatalar; radial distorsiyon ve mesafe ölçme hatalarıdır. Mesafe ölçme hatası ofset, ölçek, sinyal ve saat hatalarından oluşmaktadır. Ortama bağlı hatalar, ortamdan ortama değişen yansıma, aydınlanma ve sinyal yansıma (multipath) hatalarıdır (Jamtsho, 2010).

Sinyal yansıma hatası ışığın farklı yüzeylerden yansıyarak kameraya dönmesidir ve pikselin karşılık geldiği nokta olması gereken mesafeden farklı bir noktada görüntülenir (Şekil 3). Bu hata özellikle iki yüzeyin kesiştiği alanlarda oluşmaktadır.



Şekil 3. LÖK ölçüsünde sinyal yansıma hatası

Diğer yandan kameranın gönderdiği ışının ölçme mesafesinden daha uzak noktadan dönmesi durumunda mesafe ölçülmemekte ancak yanlış konumda gösterilmektedir (back-folding) (SR4000 Manual, 2012). Örneğin maksimum ölçme mesafesi 5m olan kamera ile yapılan ölçüde ışının 7 m mesafeden dönmesi durumunda nokta kameradan 2 m uzakta algılanmaktadır. Bu hataya özellikle kameranın ölçme mesafesinden daha uzak noktada bulunan parlak yüzeyler neden olmaktadır. Bunu önlemek için kameralarda filtreler kullanılmaktadır ancak en iyi çözüm kameranın görüş alanında ölçme mesafesinden daha uzak noktalar içermeyen duvar gibi yüzeyler olmasıdır.

b. SR4000 Kamera

SR4000 kamerada ışıklandırma süresi 0-255 arasında ardışık değerler alır. Bu değer 0.3-25.8 ms (milisaniye) arasındaki değerlere karşılık gelir ve (2) bağıntısı ile hesaplanır (SR4000 Manual, 2012).

$$IT = 0.300ms + (IT_{0-255})0.100ms \quad (2)$$

Kameranın ölçme hızı yani saniyede kaydedeceği görüntü sayısı (FR) ise (3) bağıntısı ile hesaplanır.

$$FR = \frac{1}{4(IT + RO)} \quad (3)$$

Burada; RO kameranın görüntü okuma kaydetme zamanıdır ve yaklaşık 4.6 ms dir. IT ise ışıklandırma süresidir (SR4000 Manual, 2012). Bu formüllerden görülmektedir ki ışıklandırma süresi arttıkça kaydedilen görüntü sayısı FR azalmaktadır. SR4000 kamerasının en küçük (0.3ms) ve en büyük (25.8ms) ışıklandırma süreleri için görüntü kaydetme hızları sırasıyla 51.8 fps ve 8.2 fps (saniyede kaydedilen görüntü sayısı) dir.

SR4000 kamera ölçüleri ASCII formatında kaydedilmekte ve bu değerlerden kullanıcı kodları ile görüntü oluşturulmaktadır (Şekil 4). Her ölçü dosyasında kameranın piksel yapısı düzeninde (144x176 piksel) beş farklı değer kaydedilmektedir. Bunlar sırasıyla Z,X,Y koordinatları, yansıma şiddeti (amplitude) ve güven ölçütü (confidence map) değerleridir. Z koordinatları dosyada kalibre edilmiş mesafe değerleri olarak verilmektedir. SR4000 kameranın koordinat değerlerinde distorsiyonun etkisi fabrika ayarları ile giderilmiştir.



Şekil 4. SR4000 kamera ölçüsü. Nokta bulutu (solda), yansıma (ortada) ve mesafe (sağda) görüntüleri (birimler metredir)

c. CamBoard nano Kamera

CamBoard nano kamera kızılötesi (infrared) dalga boyu bölgesinde ışınlar kullanarak faz farkı yöntemi ile ölçü yapar. Ölçme mesafesi maksimum 55 cm dir. Özellikle el hareketlerinin tespiti için geliştirilmiştir. Boyutları 37x30x25mm, ağırlığı 34 gr.dır (Şekil 5, Şekil 6). Piksellere karşılık gelen noktaların mesafeleri ışının kameradan çıkıp tekrar kameraya döndüğü zamana kadar ki kat ettiği mesafenin ikiye bölünmesi ile hesaplanır. Ölçülen objenin ayna, cam, parlak metal yüzey ve çok hızlı hareket eden cisim olması durumunda nano kameranın ölçü doğruluğu önemli ölçüde kaybolmaktadır. Kameranın görüş açısı oldukça geniştir. Kısa ölçme mesafesinden dolayı ölçülecek cisme yakın konumlandırıldığında istenilen alanın tamamını görüntüleyebilir (Şekil 7). Kameranın her ölçü (frame) kaydında piksellere karşılık gelen dört değer ölçülmektedir (URL-12).

Bunlar;

- Mesafe (Range): Piksellerin cisme olan mesafeleri
- Sinyal şiddeti (Amplitude): Ölçülen noktadan yansıyan sinyalin şiddeti
- Güven derecesi (Flag): Piksellerin ölçü değerleri için güven ölçütleri
- XYZ koordinatları: Ölçülen mesafe değerlerinden hesaplanan koordinatlar

CamBoard nano kamerada ışıklenme süresi 12-2000µs (mikrosaniye) arasında değerler alır. Işıklenme süresinin uygun değeri görüntünün netlik durumuna göre ayarlanmalıdır. Genel olarak mesafe arttıkça ışıklenme süresi de artmaktadır.

CamBoard nano kamera yalnızca 30MHz frekansı ile kullanıldığı için birden fazla kamera aynı anda kullanıldığında karışıklığa neden olmaktadır (URL-12). Bu nedenle çoklu kamera kullanımında kameralar ardışık olarak kullanılmalıdır. Kamera USB kablo ile bilgisayara bağlanmakta ve bağlandıktan sonra çalışır duruma gelmektedir. Kullanıcı kontrol programı (LightVis) ile kamera görüntüsü ayarlanabilmektedir (Şekil 8).

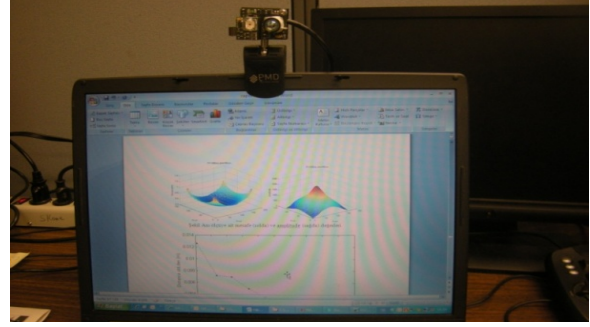
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Bu çalışmada ışıklenme süresi, ölçme mesafesi, ölçme alanının yansıtıcılığı ve ölçü sayısının LÖK'nin ölçü hassasiyetine etkisini araştırmak için farklı konfigürasyonlarla ölçüler yapılmıştır. Ölçü dosyalarından görüntü oluşturulması ve test sonuçlarının hesaplanması Matlab® programında hazırlanan kodlarla yapılmıştır. Ortalama görüntü dosyası oluşturulduktan sonra her pikselin (noktanın) koordinat bileşenleri için (4) bağıntısı (Piatti, 2010) ile standart sapma değerleri hesaplanmıştır.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_m - x_i)^2} \quad (4)$$

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

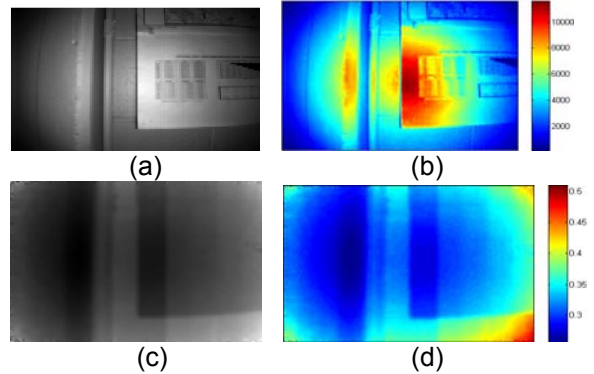
Burada n ölçü (frame) sayısı, x_i i inci ölçü ve σ herhangi bir ölçüye ait deneysel standart sapmadır.



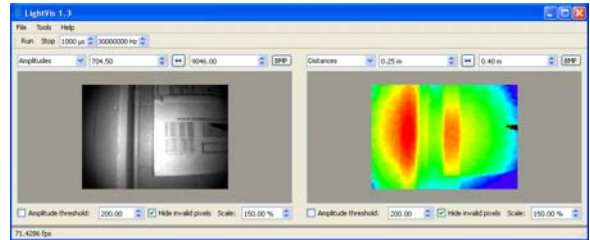
Şekil 5. PMD CamBoard nano kamera



Şekil 6. SR4000 ve PMD CamBoard nano kamera



Şekil 7. CamBoard nano kamera görüntüleri. (a), (b) yansıtıcılık (amplitude) değerlerinin gri ve renklendirilmiş görüntüsü, (c), (d) derinlik ölçülerinin gri ve renklendirilmiş görüntüleri (Işıklenme süresi =1000 mikrosaniye, maksimum yansıtıcılık = 16001, minimum yansıtıcılık =189.6667, maksimum mesafe = 0.49 m, merkez piksel mesafesi =0.26 m)



Şekil 8. CamBoard nano kamera kullanıcı programı LightVis 1.3 ekran görüntüsü

a. SR4000 Kamera

(1) Işıklanma süresi ve ölçü hassasiyeti ilişkisi

Işıklanma süresinin ölçüler üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla iki ayrı uygulama yapılmıştır. İlk uygulama duvar üzerinde ikincisi spektralon hedef levhası ile yapılmıştır.

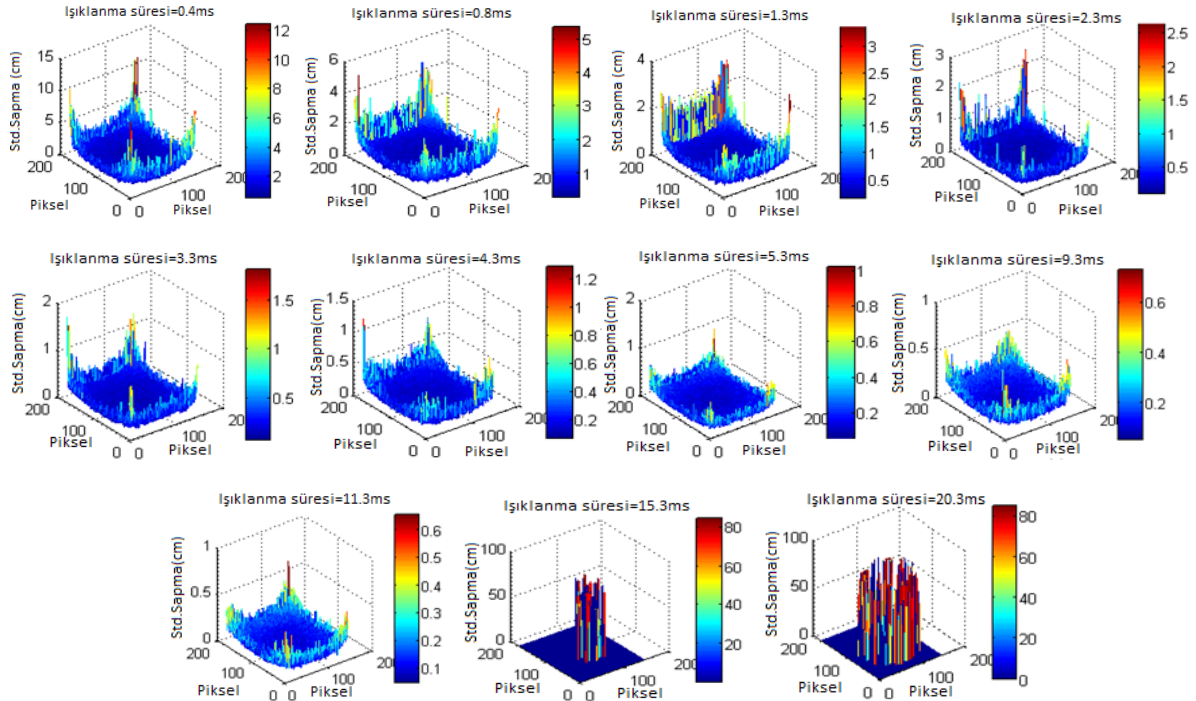
Birinci uygulamada kamera beyaz duvardan yaklaşık 167 cm uzakta bir noktaya kurulmuş ve farklı ışıklandırma süreleri ile ölçüler yapılmıştır. Işıklanma süresinin her farklı değeri için 30 ölçü kaydedilmiştir. Modülasyon frekansı, SwissRanger tarafından önseçimli olarak 30 MHz değeri ile verilmektedir ve diğer ölçülerde de aynı değer kullanılmıştır.

Standart sapma değerleri X,Y koordinat bileşenleri için çok küçük ve önemsiz değerdedir. En büyük etki Z koordinat bileşeninde olmaktadır. Bu çalışmadaki örneklerde Z koordinat bileşenine ait değerler hesaplanmıştır (Şekil 9).

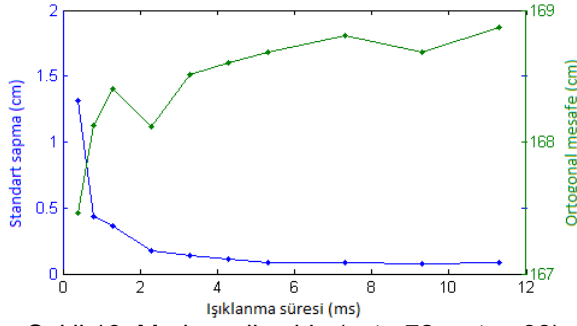
Işıklanma süresi arttıkça ölçü hassasiyeti ve ölçülen mesafe değeri artmaktadır (Şekil 10).

Aynı şekilde ışın yansıtma şiddeti (amplitude) de artmaktadır (Şekil 11). Koordinat bileşenleri üzerindeki etkisi incelendiğinde ise XY koordinat bileşenleri üzerindeki etkinin Z koordinatına göre oldukça küçük ve önemsiz değerde olduğu görülmektedir (Şekil 12).

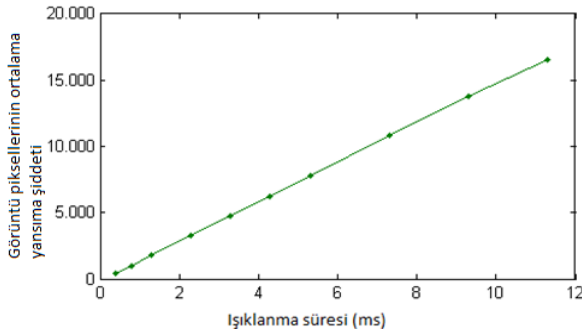
Yüzeyin yansıtma özelliğine göre ışıklandırma süresinin ölçülere etkisini belirlemek için ikinci uygulama spektralon hedef ile yapılmıştır. Spektralon hedefler; olabildiğince düşük (siyah) ve olabildiğince yüksek (beyaz) yansıtma değerlerine sahip malzemelerden yapılmışlardır. Beyaz spektralon %99, siyah spektralon ise %10 yansıtma özelliğine sahiptir. Kamera 150 cm mesafeye kurularak siyah ve beyaz spektralon hedefler farklı ışıklandırma süreleri ile ölçülmüştür (Şekil 13). Her ışıklandırma süresi için 20 ölçü kaydedilmiş ve merkez piksel için standart sapma değerleri hesaplanmıştır (Şekil 14). Ayrıca her iki yüzeyin farklı ışıklandırma süreleri ile ölçülen yansıtma şiddeti değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 15). Bu ölçme mesafesinde beyaz spektralon ile ışıklandırma süresinin 11.3 ms ve daha büyük değerleri için görüntü kaydedilememiştir.



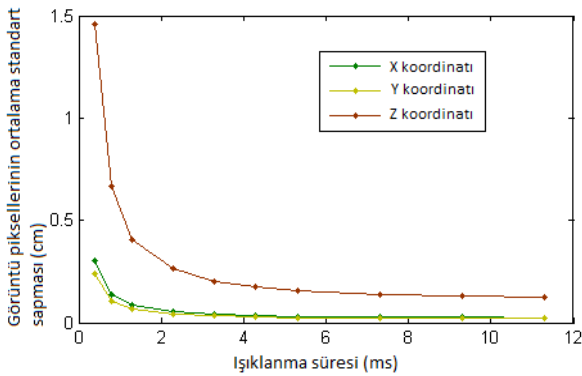
Şekil 9. Beyaz duvarda, farklı ışıklandırma süreleri ile yapılan ölçüler için görüntü piksellerinin Z koordinat değerlerinin standart sapması. (Işıklanma süresi 15.3 ms ve 20.3 ms değerleri için görüntü elde edilememiştir. Ölçme mesafesi 167 cm'dir.)



Şekil 10. Merkez pikselde (sıra 72, sütun 88) ışıklandırma süresi ve ölçü mesafesinin standart sapması arasındaki ilişki



Şekil 11. Işıklandırma süresi ve görüntü piksellerinin ortalama yansıtma şiddeti arasındaki ilişki



Şekil 12. Işıklandırma süresi ve görüntü piksellerinin XYZ koordinatlarının ortalama standart sapma değerleri grafiği

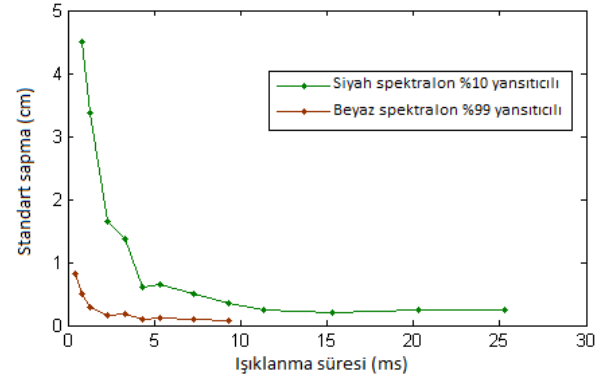
Yüzeyin yansıtma özelliğine göre ışıklandırma süresinin ölçülere etkisini belirlemek için ikinci uygulama spektral hedef ile yapılmıştır. Spektral hedefler; olabildiğince düşük (siyah) ve olabildiğince yüksek (beyaz) yansıtma değerlerine sahip malzemelerden yapılmışlardır. Beyaz spektral %99, siyah spektral ise %10 yansıtma özelliğine sahiptir. Kamera 150 cm mesafeye kurularak siyah ve beyaz spektral hedefler farklı ışıklandırma süreleri ile ölçülmüştür (Şekil 13). Her ışıklandırma süresi için 20 ölçü kaydedilmiş ve merkez piksel için standart sapma

değerleri hesaplanmıştır (Şekil 14). Ayrıca her iki yüzeyin farklı ışıklandırma süreleri ile ölçülen yansıtma şiddeti değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 15). Bu ölçme mesafesinde beyaz spektral ile ışıklandırma süresinin 11.3 ms ve daha büyük değerleri için görüntü kaydedilememiştir.

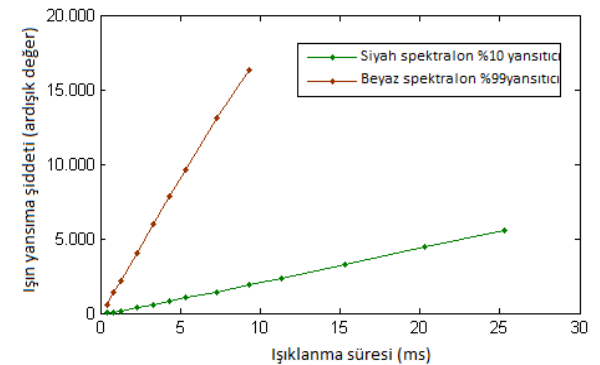
Işıklandırma süresinin çok küçük seçilmesi ölçünün standart sapmasında artışa neden olmakta dolayısıyla ölçü hassasiyeti azalmaktadır (Şekil 14). Yansıtma oranları farklı yüzeylerde aynı hassasiyette ölçü yapabilmek için yansıtma oranı düşük olan yüzey için ışıklandırma süresi büyük seçilmelidir. Diğer yandan ışıklandırma süresi arttıkça kameranın kaydettiği yansıtma şiddeti de artmaktadır (Şekil 15).



Şekil 13. Siyah ve beyaz spektral hedefler ile ölçü



Şekil 14. Spektral hedef kullanılarak ışıklandırma süresi ve ölçü hassasiyeti ilişkisi. (Merkez piksel, ölçme mesafesi=150 cm)



Şekil 15. Işıklandırma süresi ve yansıtma şiddeti grafiği (Mesafe=150 cm, IS=3.3 ms)

(2) Ölçme mesafesi ve ölçü hassasiyeti ilişkisi

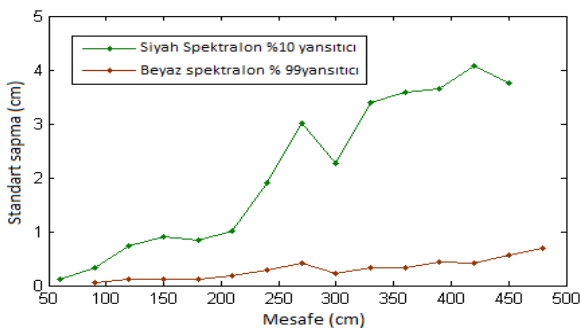
Ölçme mesafesine bağlı olarak kameranın ölçü hassasiyetini değerlendirmek için spektralon hedef ve kamera arasındaki mesafe her seferinde 30cm artırılarak 60 cm den 480 cm'ye kadar olan istasyonlardan ölçüler yapılmıştır. 3.3 ms ışıklenme süresi ile her istasyonda 30 görüntü kaydedilmiş ve (4) bağıntısı ile merkez piksel mesafesinin (Z koordinatı) standart sapması hesaplanmıştır (Şekil 16).

Beyaz spektralon ile yapılan ölçüde 3.3 ms ışıklenme süresi ile 60cm mesafeden ölçü elde edilememiştir. Bu mesafeden ölçü yapılabilmesi için ışıklenme süresi daha küçük olmalıdır. Diğer taraftan, siyah spektralon ile yapılan ölçüde ise 450cm den sonra 3.3 ms ışıklenme süresi ile ölçü yapılamamıştır.

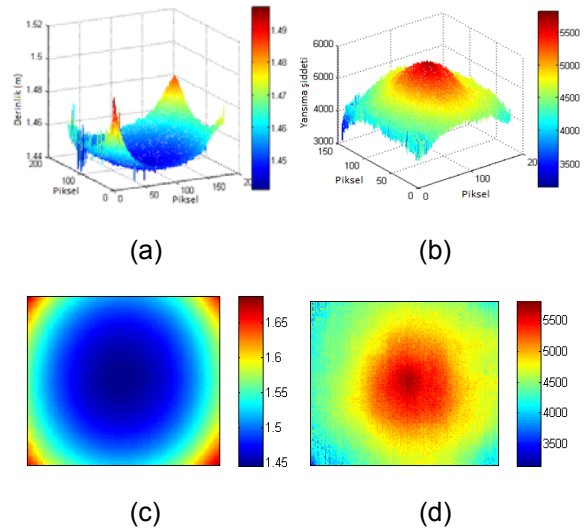
SR4000 kameranın en büyük ölçme mesafesi 5 m dir. Yapılan çalışmada bu değerden daha büyük mesafede görüntü elde edilememiştir. Ölçme mesafesi arttıkça ölçü hassasiyeti (precision) azalmaktadır. Aynı ışıklenme süresi ile yapılan ölçüm sonuçlarına göre yansıtıcı özelliği düşük olan yüzeyin ölçü hassasiyeti de düşük olmaktadır (Şekil 16). Yansıtma oranı düşük yüzeylerde ölçü hassasiyetini artırmak için ışıklenme süresi büyük seçilmelidir.

(3) Ölçü hassasiyeti ve yansıtma değerlerinin görüntü üzerinde dağılımı

Görüntü üzerinde yansıtma şiddeti ve mesafenin standart sapma değerleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi için düz duvar 150 cm mesafeden ölçülmüştür. Görüntünün ortasından kenarlara doğru uzaklaştıkça ışının yüzey normali ile yaptığı açı artmakta ve buna bağlı olarak yansıtma şiddeti azalmaktadır. Yansıtma şiddeti azaldıkça ölçü hassasiyetinin de azaldığı görülmüştür (Şekil 17, Şekil 18).

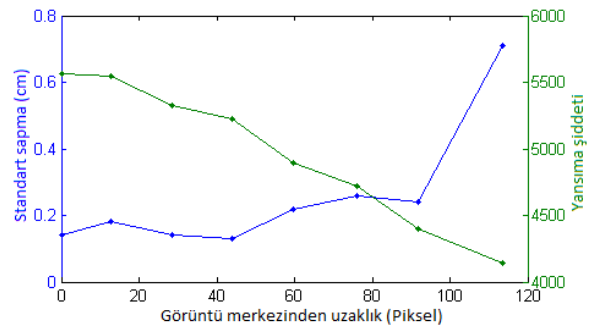


Şekil 16. Spektralon hedef ile yapılan ölçüde ölçü mesafesi ve ölçü hassasiyeti ilişkisi. (Merkez piksel, IS=3.3 ms)



Şekil 17. Düz duvarda 150 cm mesafeden 3.3 ms IS ile kaydedilen 30 ölçünün ortalaması ile elde edilen sonuçlar.

- (a) Derinlik (Z koordinatı) değerleri,
 (b) yansıtma şiddeti,
 (c) görüntü düzleminde derinlik,
 (d) yansıtma şiddeti görüntüsü



Şekil 18. Görüntü üzerinde yansıtma ve ölçü hassasiyeti ilişkisi

(4) Aynı görüntüde farklı yansıtma değerlerine karşılık ölçü hassasiyeti ilişkisi

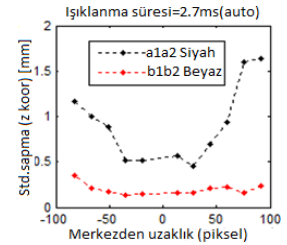
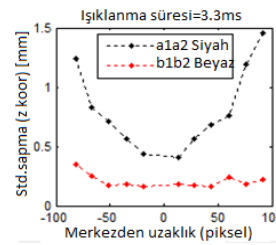
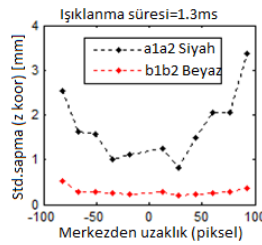
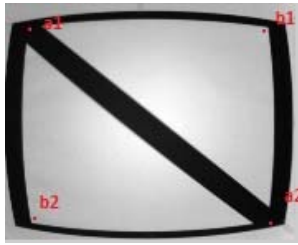
Aynı ölçü değerleri ile ölçü yapıldığında yansıtma değeri yüksek ve düşük alanlarda ölçülerin standart sapmaları ve görüntü üzerindeki dağılımları incelenmiştir. Yansıtma değerleri farklı yüzeylerden elde edilen standart sapma değerlerinin görüntü merkezinden aynı uzaklıkta noktalara göre dağılımını incelemek için özel bir test şekli oluşturulmuştur (Şekil 19). Oluşturulan şekil duvar üzerine yerleştirilerek 1m mesafeden SR4000 kamera ile ölçülmüştür. Işıklenme süresinin 1.3ms ve 3.3ms değerleri için ölçü yapılmıştır. Ayrıca SR4000 uygulama programı tarafından otomatik olarak hesaplanan ışıklenme süresi ile de ölçü yapılmıştır. Işıklenme

süresi için otomatik seçeneği işaretlendiğinde SR-3D-Viewer programı ışıklandırma süresini 2.7ms olarak hesaplamıştır. Işıklanma süresinin her değeri için 30 ölçü kaydedilmiş ve ortalama görüntü dosyası oluşturulmuştur. Daha sonra görüntü üzerinde siyah ve beyaz yüzeylere karşılık gelecek şekilde iki hat (a1a2 ve b1b2) oluşturulmuş ve bu hatlar üzerinde merkezden eşit uzaklıkta noktalar için ortogonal (Z koordinatı) mesafenin standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan standart sapma değerleri aynı grafik üzerinde gösterilerek aralarındaki ilişki araştırılmıştır (Şekil 19). Şekilden görüleceği gibi görüntü merkezinden aynı uzaklıktaki noktalarda yansıma değeri yüksek (beyaz) olan yüzeylerin standart sapma değerleri yansıma değeri düşük (siyah) olan yüzeylere göre daha küçüktür.

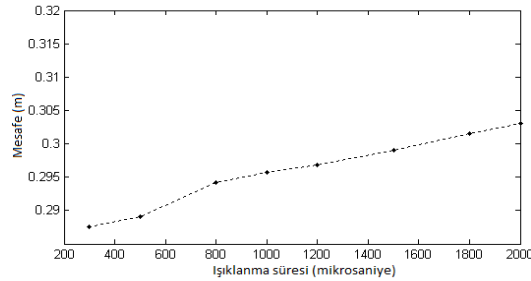
b. CamBoard nano Kamera

CamBoard nano kameranın ölçme hassasiyetini değerlendirmek için kamera beyaz duvardan 30cm uzağa yerleştirilmiş ve farklı ışıklandırma süreleri ile ölçümler yapılmıştır. Bu ölçülerden ışıklandırma süresi ve ölçü hassasiyeti arasındaki ilişki araştırılmıştır. Işıklanma süresi arttıkça ölçülen mesafenin bir miktar arttığı görülmüştür (Şekil 20). Buna karşılık ölçü hassasiyetinin azaldığı görülmüştür. (Şekil 21).

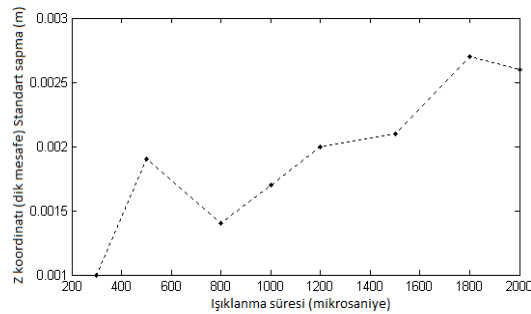
Diğer yandan görüntünün merkezinden uzaklaştıkça yansıma şiddeti ve buna bağlı olarak ölçü hassasiyetinin azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 22, Şekil 23).



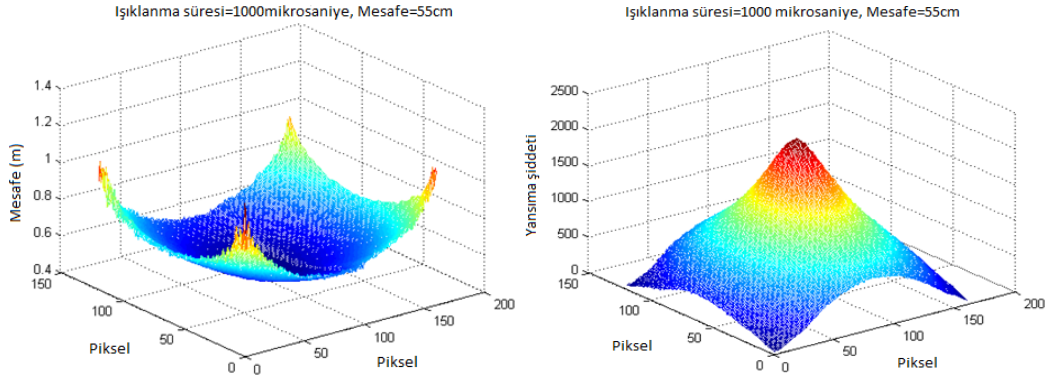
Şekil 19. SR4000 kamerada görüntü merkezinden aynı uzaklıkta farklı yansıma değerli yüzeylerin standart sapma değerleri arasındaki ilişki. (Ölçme mesafesi=100cm)



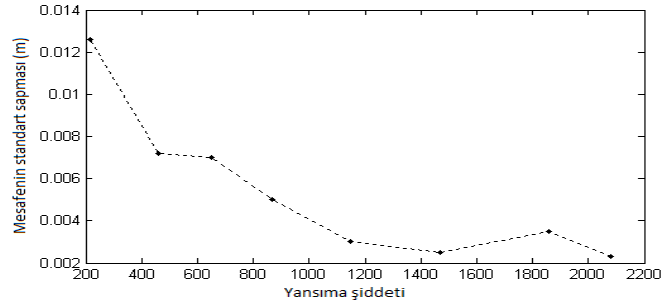
Şekil 20. CamBoard nano kamerada ışıklandırma süresi ve ölçülen mesafe ilişkisi (Ölçü mesafesi=30 cm)



Şekil 21. CamBoard nano kamerada ışıklandırma süresi ve ölçü hassasiyeti ilişkisi (Ölçü mesafesi=30 cm)



Şekil 22.CamBoard nano kamerada aynı ölçüye ait derinlik (dik mesafe) (solda) ve yansıtma şiddeti (sağda) değerleri (IS=1000 µs, mesafe=55 cm)



Şekil 23. Aynı görüntü alanı içinde resmin ortasından kenarlara doğru yansıtma şiddeti ve buna bağlı olarak da hassasiyet azalmaktadır (IS=1000 µs, mesafe=55 cm)

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada lazerli ölçme kameraları tanıtılmış ve SR4000 ve CamBoard nano kameralarının ölçme hassasiyetlerine ilişkin sonuçlar verilmiştir. LÖK video kayıt hızında ölçü yapmakta, dolayısıyla ölçü esnasında çok sayıda veri kaydedilmektedir. Ölçülerden elde edilen verilerin depolanması ve işlenmesi yeterli bilgisayar kapasitesi gerektirir. Statik ölçmelerde gereğinden fazla görüntü kaydı ortalama ölçü dosyasının hassasiyetini çok fazla etkilememektedir. Bu nedenle fazla görüntü kaydından kaçınılmalıdır. Işıklanma süresi, ölçme yüzeyinin yansıtıcılığı ve ölçme mesafesi kameranın ölçü hassasiyetini doğrudan etkilemektedir. Bu değerlerin ölçülere etkisi en fazla Z koordinat bileşeninde (ortogonal distance) olmaktadır. XY koordinat bileşenlerine etkisi önemsiz derecede çok düşüktür. Işıklanma süresinin ideal değeri yüzeyin yansıtma özelliğine göre değişmektedir. Ölçme anında elde edilen görüntünün netlik durumuna göre uygun ışıklandırma süresi seçilmelidir. Genel olarak yansıtma özelliği düşük olan yüzeylerde bu değer daha yüksek seçilmelidir. Uygun kamera ayarları

ile yüksek hassasiyette ölçüler yapılabilir. Maksimum ölçme mesafesi (5m) ve piksellerin cisim üzerinde karşılık geldikleri mesafeler (SR4000 kamerada 0.24 derece piksel ışın açıklığı maksimum ölçme mesafesinde 2cm dir) dikkate alındığında SR4000 kamera 3B konum bilgisi ölçmek amacıyla pek çok uygulamada kullanılabilir özelliktedir. CamBoard nano kameranın ölçme mesafesi çok kısıdır. Cisim yada ölçü alanına yakın kurularak derinlik belirleme yada hareket tanımlamak amacıyla kullanılır.

Diğer konum ölçme ve 3B modelleme yöntemleri ile karşılaştırıldığında lazerli ölçme kameralarının şu özellikleri öne çıkmaktadır:

Kısıtlayıcı özellikleri:

- Kısa ölçme mesafesi,
- Ölçülerin renk bilgisi içermemesi nedeniyle detay seçiminde zorluk,
- Ortama göre değişken kamera ayarları,
- Doğrudan güneş ışığında kullanılamamasıdır.

Üstün özellikleri:

- Video çekim hızında ölçme,

- Görüntü alanının koordinat ve yansıma değerlerinin anlık ölçümü,
- Mobil ölçü yapabilme,
- Düşük maliyet,
- Diğer sistemlerle entegre ölçü yapabilme,
- Cisim yüzeyinin yeterli sıklıkta nokta ile ölçülebilmesi

olarak sıralanabilir.

BİLDİRİM VE KABUL

Bu çalışma TÜBİTAK BİDEB 2219 Doktora Sonrası Yurt Dışı Araştırma Burs Programı kapsamında The University of Calgary'de yapılmıştır.

KAYNAKLAR

- Becerro, F.G., (2008), **External-Self-Calibration of a 3D time-of-flight camera in real environments**, Master sciences thesis Erasmus Mundus in Vision and Robotics (VIBOT), 51 pages.
- Beringe, A.V., (2012), **Performance Evaluation of a Range Camera SR4000**, Diplomarbeit, Ausgeführt am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien, 87 pages.
- Besl P.J., McKay, N.D., (1992), **A Method for Registration of 3-D Shapes**, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(2): 239-256.
- Boehm, J., Pattinson, T., (2010), **Accuracy of Exterior Orientation for a Range Camera**, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38(5), Newcastle upon Tyne, UK.
- Breuer, P., Eckes, C., Müller, S., (2007), **Hand Gesture Recognition with a Novel IR Time-of-Flight Range Camera—A Pilot Study**, A. Gagalowicz and W. Philips (Eds.): MIRAGE 2007, LNCS 4418: 247–260.
- Cazorla, M., Viejo, D., Pomares, C., (2010), **Study of the SR4000 Camera**, XI Workshop de Agentes Físicos, Valencia, September.
- Centeno, J.A.S., Jutzi, B., (2010), **Evaluation of a range imaging sensor concerning resolution and illumination**, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38(1) (on CD).
- Clemente, L., Davison, A., Reid, I., Neira J., Tardos, J.D., (2007), **Mapping Large Loops with a Single Hand-Held Camera**, Proc. Robotics, Science and Systems Conference, Atlanta, June, 8 pages.
- Chen, Y., Medioni, G., (1992), **Object Modelling by Registration of Multiple Range Images**, Image and Vision Computing, 10(3): 145–155.
- Cui, Y., Schuon, S., Chan, D., Thrun, S., Theobalt, C., (2010), **3D Shape Scanning with a Time-of-flight Camera**, IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Francisco, CA, 13-18 June: 1173-1180.
- Frank, B. Schmedding, R., Stachniss, C., Teschner, M., Burgard, W., (2010), **Learning the Elasticity Parameters of Deformable Objects with a Manipulation Robot**, In Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Taipei, Taiwan, 2010. paper (7 pg, pdf).
- Gokturk, S.B., Yalcin, H., Bamji, C., (2004), **A Time-Of-Flight Depth Sensor – System Description, Issues and Solutions**, Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW'04), 27-02 June, DOI: 10.1109/CVPR.2004.459, Vol.3, page 35.
- Hussmann, S., Ringbeck, T., Hagebecker, B., (2008), **A Performance Review of 3D TOF Vision Systems in Comparison to Stereo Vision Systems**, Stereo Vision, Ed.by Dr.Asim Bhatti, p.372, November, I-Tech, Vienna, Austria.
- Jamtsho, S., (2010), **Geometric Modelling of 3D Range Cameras and Their Application for Structural Deformation Measurement**, Master Sciences Thesis, Department of Geomatics Engineering, Calgary, Alberta, December, 161 pages.
- Jamtsho, S., Lichti, D.D., (2010), **Modelling Scattering Distortion in 3D Range Camera**, International Archives of Photogrammetry,

- Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38(5), Newcastle upon Tyne, UK.: 299-304.
- Kahlmann, T., (2007), **Range Imaging Metrology: Investigation**, Calibration and Development, PhD Thesis, ETH Zurich, 143 pages.
- Kahlmann, T., Remondino, F., Ingensand, H., (2006), **Calibration for Increased Accuracy of the Range Imaging Camera Swissranger**, ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'. IAPRS 36(5), Dresden 25-27 September 2006.
- Karel, W., Ghuffar, S., Pfeifer, N., (2012), **Modelling and Compensating Internal Light Scattering in Time of Flight Range Cameras**, The Photogrammetric Record, 27(138): 155–174.
- Lahamy, H., Lichti, D.D., (2012), **Towards Real-Time and Rotation-Invariant American Sign Language Alphabet Recognition Using a Range Camera**, Sensors, 12 (11): 14416-14441.
- Lange, R., (2000), **3D Time-of-Flight Distance Measurement with Custom Solid-State Image Sensors in CMOS/CCD-Technology**, PhD thesis, University of Siegen, 2000.
- Lichti, D.D., Jamtsho, S., El-Halawany, S.I., Lahamy, H., Chow, J., Chan, T.O., El-Badry, M., (2012a), **Structural Deflection Measurement with a Range Camera**, ASCE Journal of Surveying Engineering. 138(2): 66-76.
- Lichti, D.D., Qi, X., Ahmed, T., (2012b), **Range Camera Self-Calibration with Scattering Compensation**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 74(2012): 101-109.
- Lichti, D.D., Qi, X., (2012), **Range Camera Self-Calibration with Independent Object Space Scale Observations**, Journal of Spatial Sciences, 57(2): 247-257.
- Lichti, D.D., Kim, C., Jamtsho, S., (2010), **An integrated bundle adjustment approach to range camera geometric self-calibration**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65(2010): 360-368.
- Lichti, D.D., (2008), **Self-Calibration of a 3D Range Camera**, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS), 37(B5): 927-932.
- May, S., Doerschel, D., Holz, D., Fuchs, S., Malis, E., Nüchter, A., Hertzberg, J., (2009), **Three-Dimensional mapping with Time-of-Flight Cameras**, Journal of Field Robotics 26(11–12): 934–965.
- Oggier, T., Lehmann, M., Kaufmann, R., Schweizer, M., Richter, M., Metzler, P., Lang, G., Lustenberger, F., Blanc, N., (2004), **An All-Solid-State Optical Range Camera for 3D Real-Time Imaging with Sub-Centimeter Depth Resolution (SwissRanger)**, Proc. SPIE 5249, 534 (2004); doi:10.1117/12.513307.
- Oggier, T., Büttgen, B., Lustenberger, F., (2005), **Swissranger SR3000 and First Experiences Based on Miniaturized 3d-tof Cameras**, ETH 1st RIM Days.
- Piatti, D. (2010), **Time-of-Flight Cameras: Tests, Calibration And Multi Frame Registration For Automatic 3D Object Reconstruction**, PhD Thesis, Politecnico di Torino Doctoral school of Environment and Territory.
- Pirker, K., Rütger, M., Bischof, H., (2010), **An Omnidirectional Time-of-Flight Camera and its Application to Indoor SLAM**, 11th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision Singapore, 7-10th December, pp. 988-993.
- Rapp, H., (2007), **Experimental and Theoretical Investigation of Correlating TOF-Camera Systems**, Diploma Thesis in Physics, Institut für Wissenschaftliches Rechnen (IWR), 71 pages.
- Shahbazi, M., Homayouni, S., Saadatseresht, M., Sattari, M., (2011), **Range Camera Self-Calibration Based on Integrated Bundle Adjustment via Joint Setup with a 2D Digital Camera**, Sensors, 11, doi:10.3390/s110908721: 8721-8740.
- Sturm, J., Konolige, K., Stachniss, C., Burgard, W., (2010), **3D Pose Estimation, Tracking and Model Learning of Articulated Objects**

- from Dense Depth Video using Projected Texture Stereo**, Proc. of the Workshop RGB-D: Advanced Reasoning with Depth Cameras at Robotics: Science and Systems (RSS), Zaragoza, Spain.
- SR4000 Manual, (2012), **SR4000 User manual**, Version 2. MesalMaging.
- Teizer, J., (2008), **3D Range Imaging Camera Sensing for Active Safety in Construction**, ITcon, vol. 13(2008): 103-117.
- Tournas, E., Tsakiri, M., (2010), **Distance Error Estimation for Range Imaging Sensors**, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38(5), Newcastle upon Tyne, UK.
- URL-1: Fotonic,
http://www.fotonic.com/assets/documents/fotonic_P70_20130321.pdf,
(Erişim Tarihi: 25 Nisan 2013)
- URL-2: Fotonic,
http://www.fotonic.com/assets/documents/Fotonic_E-series_20130404.pdf, (25 Nisan 2013)
- URL-3: ifm electronic gmbh,
<http://www.ifm.com/products/aus/ds/O3D201.htm> (25 Nisan 2013)
- URL-4: MesalMaging, <http://www.mesalMaging.ch/prodview4k.php>, (25 Nisan 2013)
- URL-5: Optex,
<http://www.optex.co.jp/e/product/3d.html>,
(25 Nisan 2013)
- URL-6: Softkinetic-optrima,
<http://72dpi02.cblue.be/SKO/index.php?id=87&sid=102>, (25 Nisan 2013)
- URL-7: Panasonic,
<http://www2.panasonic.biz/es/densetsu/device/3DImageSensor/en/product.html>,
(25 Nisan 2013)
- URL-8: Pmd Technologies,
http://www.pmdtec.com/fileadmin/pmdtec/downloads/documentation/datenblatt_camcube3.pdf (2 December, 2011), (15 Şubat 2013)
- URL-9: Pmd Technologies,
http://www.pmdtec.com/solutions/camera_developer.php, (25 Nisan 2013)
- URL-10: PrimeSense,
http://www.primesense.com/wp-content/uploads/2013/02/PrimeSense_3DsensorsWeb.pdf, (25 Nisan 2013)
- URL-11: SoftKinetic,
http://www.softkinetic.com/Portals/0/Download/WEB_20120907_SK_DS325_Datasheet_V2.1.pdf, (25 Nisan 2013)
- URL-12: pmd (sponsoring) education program,
<https://www.cayim.com/faq>, (25 Nisan 2013)