

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİJİTAL KAMERA VE LAZER İŞARETLEYİCİ KULLANILARAK
GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMİYLE YER DEĞİŞTİRMENİN ÖLÇÜLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cem MORTAŞ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı


Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tolga GİRİCİ

TEMMUZ 2018

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.


.....
Doç. Dr. Tolga GİRİCİ
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 131211010 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Cem MORTAŞ**'ın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“DİJİTAL KAMERA VE LAZER İŞARETLEYİCİ KULLANILARAK GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMİYLE YER DEĞİŞTİRMENİN ÖLÇÜLMESİ”** başlıklı tezi **25 Temmuz 2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Tolga GİRİCİ**



TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Eş Danışman : **Prof. Dr. Osman EROĞUL**



TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç.Dr.Ayşe Melda YÜKSEL TURGUT**



TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Doç. Dr. İmam Şamil YETİK



TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Doç.Dr. Hakkı Alparslan ILGIN



Ankara Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Cem Mortaş
Cem Mortaş
İMZA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DİJİTAL KAMERA VE LAZER İŞARETLEYİCİ KULLANILARAK GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMİYLE YER DEĞİŞTİRMENİN ÖLÇÜLMESİ

Cem Mortaş

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Tolga Girici

Tarih: Temmuz 2018

Görüntü işleme sistemleri günümüzde inşaat, biyomedikal, trafik, test, ölçüm vb. birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle inşaat mühendisliğinde karşılaşılan ve temel problemlerden birisi olan yapıların yer değişiminin ölçümü alanında kullanılması umut vaat eden sonuçlar içermektedir. Bu tez çalışmasının amacı, lazer işaretçi, dijital kamera ve temel görüntü işleme tekniklerinin kullanılmasıyla geliştirilen yazılımla birlikte yatay ve düşey ekseninde hareket eden bir cismin hareket profilini ve buna bağlı olarak toplam yer değiştirmesini bulmaktır. Çalışmanın yan amaçlarından biriside yapı bilimi alanında geleneksel yöntemlerle yapılan temassız yer değiştirme ölçümlerine alternatif bir yer değişimi hesaplama tekniği olarak kullanılmasıdır. Yer değişiminin belirlenmesi için bir adet yüksek çözünürlüklü dijital kamera, esas yer değişimini sağlayan özel üretilmiş sarsma tablası ve izdüşümünün kamera tarafından takip edilebilmesi için lazer işaretçi kullanılmıştır. Referans hareket profili olarak sarsma tablası tarafından uygulanan statik ve dinamik yer değişimi hareket profilleri, görüntü işleme yazılımının sonucunda bulunmaya çalışılmıştır. Bir yandan uygulanan hareket profilleri esnasında sarsma tablası pozisyonları kayıt edilirken, bir yandan da dijital kameranın video kayıtları alınmıştır. Video kayıtları sonradan işleme yöntemiyle

hareket profillerine çevrilip, uygulanan hareketler için kayıt edilen sarsma tablası pozisyon verileriyle karşılaştırılmıştır. Dinamik hareketlerin benzerliği için sarsma tablası ve görüntü işleme sonucunda oluşan iki hareket profilinin öz ilintisi hesaplanmıştır. Statik hareketlerin benzerliği için ise sarsma tablasının hareketlerine göre görüntü işleme yazılımının yaptığı yüzde bağıl hata oranı hesaplanmıştır. Ayrıca sistemin başarısı kurulan çeşitli test düzenekleri ile denenmiş, referans test düzeneğine göre sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, geliştirilen sistemin sahada çalışan araştırmacılar için daha kullanışlı bir sistem olarak alternatif olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Görüntü işleme, Yer değişim ölçümü, Normalize çapraz ilinti, Yapısal sağlık analizi, Görüntü segmentasyonu, Parlaklık ağırlık merkezi, Fourier dönüşümü, Yüzde bağıl hata.



ABSTRACT

Master of Science

DISPLACEMENT MEASUREMENT BASED ON IMAGE PROCESSING METHOD BY USING LASER AND DIGITAL CAMERA

Cem Mortas

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Science Programme

Supervisor: Assoc. Prof. Tolga Girici

Date: July 2018

Image processing systems are currently used in construction, biomedical, traffic, test, measurement and so on many areas are used. Especially in the field of displacement measurement, which is one of the basic problems encountered in civil engineering, gives promising results. The purpose of this thesis is to find the movement profile of an object moving horizontally and vertically along with the software developed by using laser pointer, digital camera and basic image processing techniques and accordingly to find the total displacement. One of the other aims of the study is to use an alternative displacement calculation technique in the field of building science as an alternative to non-contact displacement measurements made by conventional methods. One high-resolution digital camera to determine the displacement, a specially designed shake table for the actual displacement, and a laser pointer to track the projection by the camera. The static and dynamic displacement motion profiles applied by the shake table as the reference motion profile were tried to be found as the result of image processing software. On the one hand, video recordings of the digital camera were taken while the positions of the shake table were recorded during the applied motion profiles. The video recordings were converted to motion profiles by post processing and compared with the shake table position data recorded for the applied movements.

For the similarity of dynamic movements, the correlation of the two motion profiles, which occur in the shake table and the image processing result, was calculated. For the similarity of the static movements, the relative error rate of the image processing software was calculated according to the movement of the shake table. Moreover, the success of system was tested with various test setups that were established and the results were compared to the reference test assembly. Thus, it is considered that the developed system will be an alternative as a more useful system for researchers working in the field.

Keywords: Image processing, Displacement measurement, Normalized cross correlation, Structural health monitoring, Image segmentation, Brightness center of gravity, Fourier Transform, Percent of relative error.

TEŐEKKÖR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Osman Eroğul'a ve Doç. Dr. Tolga Girici'ye, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım başta Doç. Dr. M. Fatih Demirci olmak üzere TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi öğretim üyelerine, kısmi olarak burslu kabul onurlandıran değerli TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü yönetim kurulu üyelerine, başta Sarp Dinçer ve Derya Dinçer olmak üzere tüm Teknik Destek Grubu firması çalışanlarına, destekleriyle her zaman yanımda olan eşim Hande Mortaş'a, aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xiv
RESİM LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. GÜNÜMÜZDE KULLANILAN YER DEĞİŞİMİ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ 5	
2.1 Temaslı Yer Değişimi Ölçüm Sistemleri	7
2.1.1 İvmeölçer tabanlı ölçümleri	8
2.1.2 Doğrusal değişken fark transformatörü (LVDT) tabanlı ölçümler	10
2.1.3 Potansiyometrik cetvel tabanlı ölçümler	12
2.2 Temasız Yer Değişimi Ölçüm Sistemleri	14
2.2.1 Global konumlama sistemleri (GPS) tabanlı ölçümler	15
2.2.2 Lazermetre tabanlı ölçümler.....	16
2.2.3 Etki-Yankı tabanlı ölçümler	17
2.2.4 Görüntü işleme tabanlı ölçümler	18
2.3 Yer Değiştirme Ölçüm Yöntemlerinin Karşılaştırılması	19
3. YER DEĞİŞTİRME TESPİTİ SİSTEMİ	23
3.1 Kullanılan Materyaller ve Deney Düzenegi	23
3.2 Geliştirilen Görüntü İşleme Yöntemi	32
3.2.1 Video kaydı	32
3.2.2 Yeşil renkli bölgelerinin tespiti ve filtreleme.....	33
3.2.2.1 Ortanca filtre	35
3.2.3 Görüntü parlaklık ağırlık merkezinin hesaplanması	36
3.2.3.1 Parlaklık ağırlık merkezi:	37
3.2.4 Düşey ve yatay eksenlerde yer değiştirme profillerinin çıkartılması	38
3.2.5 Piksel-Mesafe Dönüşüm Parametresinin Çıkarımı	40
3.3 Sarsma Tablası İle Yazılımın Karşılaştırılması.....	44
3.3.1 Dinamik hareket profillerinin karşılaştırılması	45
3.3.1.1 İlinti (Korelasyon):	46
3.3.1.2 Çapraz ilinti (Çapraz korelasyon):	46
3.3.1.3 Öz ilinti (Otokorelasyon):	47
3.3.1.4 Normalize çapraz ilinti (Korelasyon):.....	48
3.3.1.5 Sinyallerin Fourier dönüşümü:.....	49
3.3.2 Statik hareket profillerinin karşılaştırılması.....	52
3.3.2.1 Hata kavramı	55

4. YÖNTEMİN FARKLI KOŞULLARDA TESTİ VE ANALİZLERİN DEĞERLENDİRMESİ.....	57
4.1 Dinamik Hareket Profilleri İle Sistemin Performansının Analizi	59
4.2 Statik Hareket Profilleri İle Sistemin Performansının Analizi	65
4.3 Kameranın Yenileme Hızının Artırılması Analizi	69
4.4 Kamera ile Lazer İşaretçinin Yer Değiştirilmesi Testi.....	76
4.5 Kamera Platformu İle Lazer İşaretçi Arası Mesafeye Göre Sistemin Performansının Analizi	80
5. SONUÇLAR.....	85
KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	93



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Köprü üzerinde çeşitli sensörlerle kurulan yer değişimi ölçümü sistemi. . . 6	
Şekil 1.2 : Yüksek katlı binada çeşitli sensörlerle kurulan yer değişimi ölçümü sistemi. 7	7
Şekil 2.1 : LVDT Sensörü İç yapısı 11	11
Şekil 2.2 : Lineer potansiyometrik cetvel kesiti. 12	12
Şekil 2.3 : Potansiyometrik cetvel elektriksel karşılığı. 13	13
Şekil 2.4 : Potansiyometrik cetvel mesafe-çıkış grafiği. 13	13
Şekil 2.5 : Lazermetre iç yapısı. 16	16
Şekil 2.6 : Etki-Yankı tabanlı mesafe ölçümü. 17	17
Şekil 3.1 : Platform ve sarsma tablası arasında θ diff açısı olduğu duruma tepeden bakış. 27	27
Şekil 3.2 : Platformlar arası açı bulunması durumu. 28	28
Şekil 3.3 : Platformların doğrultularının paralel olması durumu. 29	29
Şekil 3.4 : Deney düzeneği kurulum görseli. 30	30
Şekil 3.5 : Statik yer değişimi hareketi profili. 31	31
Şekil 3.6 : Farklı genliklerdeki dinamik hareket profilleri. 31	31
Şekil 3.7 : Önerilen görüntü işleme yöntemi adımları. 32	32
Şekil 3.8 : Görüntü eşik değeri ayırımı akış şeması. 34	34
Şekil 3.9 : Lazer işaretinin yatay eksenindeki yer değişimi profili. 39	39
Şekil 3.10 : Lazer işaretinin düşey eksenindeki yer değişimi profili. 39	39
Şekil 3.11 : Lazer işaretinin bileşke yer değişimi profili. 40	40
Şekil 3.12 : Dönüşüm parametresiyle çarpılarak mm cinsinden oluşturulmuş yer değiştirme profili. 44	44
Şekil 3.13 : “1 Hz 10 mm” tepe genlikli hareket profili. 45	45
Şekil 3.14 : Evrişim, çapraz ilinti ve öz ilinti işlemleri ilişkisi. 48	48
Şekil 3.15 : 1 Hz 10 mm tepe genlikli dinamik yer değişimi profilinin çıktıları. 48	48
Şekil 3.16 : “1 Hz 10 mm” tepe genlikli hareket profili FFT grafikleri. 52	52
Şekil 3.17 : Sarsma tablasının 10 mm genlikli statik yer değişimi profili. 53	53
Şekil 3.18 : Görüntü işleme yazılımının 10 mm genlikli statik yer değişimi profili. 55	55
Şekil 3.19 : Sistemlerin 10 mm genlikli statik hareket profili çıktıları 56	56
Şekil 4.1 : Dinamik ve statik hareket profilleri için kurulan deney düzeneği. 59	59
Şekil 4.2 : Kamera platformu lazer işaretçi arası 33 metre olduğu deney düzeneği. . 81	81

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Oluşturulan test düzenekleri için test matrisi.....	58
Çizelge 4.2 : Düzenek -1- için dinamik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.	63
Çizelge 4.3 : Düzenek -4- için dinamik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.	67
Çizelge 4.4 : Düzenek -5- için dinamik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.	70
Çizelge 4.5 : Düzenek -2- için dinamik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.	73
Çizelge 4.6 : Düzenek -7- için dinamik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.	78
Çizelge 4.7 : Düzenek -8- için statik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.	82

KISALTMALAR

DFT	: Kesikli Fourier Dönüşümü
DTFT	: Kesikli Zaman Fourier Dönüşümü (Discrete Time Fourier Transform)
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
GPS	: Global Konumlama Sistemleri (Global Positioning System)
LVDT	: Doğrusal Değişken Fark Transformatörleri (Linear Variable Differential Transformers)
fps	: Saniyedeki çerçeve sayısı (frame per second)
AC	: Alternatif Akım (alternative current)
DC	: Doğru Akım (direct current)

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan semboller açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Semboller	Açıklama
c	Ses hızı
V_r	Giriş voltajı
V_o	Çıkış voltajı
t	Zaman
d	Yer değişimi
Δd	Toplam yer değiştirme
θ_{diff}	Platformlar arası açı
ΔX	Bileşke yer değiştirme
x_l	Düşeydeki parlaklık ağırlık merkezi
y_l	Yataydaki parlaklık ağırlık merkezi
p	Yataydaki piksel sayısı
q	Düşeydeki piksel sayısı
$r_{xy} [l]$	Gerçek iki sinyalin çapraz ilintisi
$r_{xx} [l]$	Gerçek sinyalin öz ilintisi
$R_{NCC} [x,y]$	Gerçek sinyalin normalize çapraz ilinti
$X(w)$	Gerçek sinyalin Fourier Dönüşümü
$X(e^{j\omega})$	Gerçek sinyalin Kesikli zaman Fourier Dönüşümü

RESİM LİSTESİ

Resim 2.1 : Potansiyometrik cetvel ile yer değişimi ölçümü uygulamaları.....	14
Resim 3.1 : Kullanılan dijital kamera.	23
Resim 3.2 : Kamera ve lens bloğu.	24
Resim 3.3 : Kamera ve ekran platformu.	24
Resim 3.4 : “Testbox-Shaketable” sarsma tablası.....	25
Resim 3.5 : Testbox-Shaketable kontrol yazılımı arayüzü.	25
Resim 3.6 : Lazer işaretçi.....	26
Resim 3.7 : SparkFun HMC5883L üç eksenli manyeto ölçer.	26
Resim 3.8 : Renkli görüntü.	33
Resim 3.9 : Eşik değeri uygulandıktan sonra oluşan görüntü.....	35
Resim 3.10 : Ortanca filtre uygulanmış görüntü sonucu.....	36
Resim 3.11 : Parlaklık ağırlık merkezi yatay “1076” ve düşeyde “720” olarak h hesaplanmış görüntü.....	38
Resim 3.12 : Gri renk uzayına dönüştürülmüş görüntü.	41
Resim 3.13 : Parlaklık değeri elemesinden sonrası oluşan siyah ve beyaz görüntü. .	42
Resim 3.14 : “imclearborder” ile filtrelenmiş siyah beyaz görüntü.....	42
Resim 3.15 : Görüntüde tespit edilen çember bölgesi.....	43
Resim 4.1 : Kamera hareketli, lazer işaretçi sabit kurulum resmi.	77

1. GİRİŞ

Bugünlerde dijital kameraların teknolojik olarak gelişmesi ve kullanılan algoritmalarının ilerlemesiyle birlikte görüntü işleme uygulamalarına günlük hayatın her alanında karşılaşmak mümkündür. Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar sayesinde görüntülerdeki ekstra bilgiler ve yorumlamalar kullanılarak görüntü işleme alanı oldukça ilgi çekmiş ve bilgisayarlı görü altında yeni bir alan ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda insanların faaliyet gösterdiği birçok alanda görüntü işleme sistemleri geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır (Santhosh, 2011). Görüntü işleme sistemlerinin günlük hayatta biyomedikal uygulamalardan, askeri uygulamalara, güvenlik sistemlerinden inşaat mühendisliği alanındaki uygulamalara kadar birçok alanda kullanılmaya başlamıştır.

Gelişen teknolojiyle birlikte nesnelerin ivmeleri, hızları ve yer değiştirmeleri önemli bilgiler içermektedir. Kimi zaman bu verilerle bir otomobilin seyir halindeki hızı bulunabilirken kimi zaman bir uçağın kalış süresi boyunca maksimum ivmelenme değeri incelenebilir. Fakat gelişen teknolojiyle birlikte yer değişiminin ölçülmesi özellikle inşaat mühendisliği alanında bulunan asma köprüler, yüksek katlı binalar, kuleler, elektrik enerjisi için kullanılan rüzgar gülleri, tarihi binalar vb. gibi yapıların yapısal sağlığı hakkında ciddi bilgiler içermektedir (Ribeiro, 2014; Gastineau, 2009; Ji Y, 2012). Yapıların bazı tanımlı noktalardaki yer değişimi değerleri, ölçüm noktalarına, yapının durumuna, yapının yaşına vb. gibi fiziksel özelliklere göre değişebilmekte olup, kimi yerlerde santimetreler seviyelerinde olabilirken kimi yerlerde mikrometreler civarında olabilmektedir. Bu yer değişimi miktarları, önceden belirlenen seviyeleri geçmesi durumunda o yapıların yapısal sağlamlığı kontrol edilmelidir (Hu, 2015).

Bugünlerde inşaat mühendisleri bu kadar düşük seviyelerdeki mesafe değişimlerini ölçebilmek için özel sensörler ve bu sensörlere göre özel ölçüm yöntemleri kullanmaktadır (Santhosh, 2011). Kullanılan yer değişimi ölçüm yöntemine göre sensörler kimi zaman yapılardaki önceden belirlenen ölçüm noktalarına doğrudan

temas edecek şekilde monte edilip ölçümler alınırken, kimi zaman da belirlenen noktalara temas etmeden uzaktan yapılan ölçümlerle yapılmaktadır (Praher, 2016; Park 2015; Mesko, 2013).

Sensör teknolojisinin gelişmesiyle temaslı yer değişimi ölçümlerinin inşaat mühendisliği alanındaki yapı bilimi analizlerinde kullanıldığı sistemlerde yüksek doğruluklu sonuçlar elde edilmiştir (Santhosh, 2011; Arraigada, 2006). Fakat bu ölçüm sistemlerinde kullanılan sensörler oldukça hassas, pahalı ve kurulumu zor olan sensör ve sistemlerden oluşmaktadır (Celebi, 2000). Halbuki temassız yer değişimi ölçüm sistemleriyle daha kolay veya ekstra bir cihaz gerektirmeden, yapıya zarar vermeden mesafe verileri kullanıcıya sunulabilmektedir (Feng, 2015).

Bu çalışmanın en temel amacı; yüksek çözünürlüklü dijital kamera, lazer işaretçi ve kaydedilen görüntüleri sonradan işleyecek bir görüntü işleme yazılımının da kullanılmasıyla yer değiştirme ölçümlerinin temaslı ölçüm yöntemleri kadar yüksek doğrulukla ve hassasiyetle yapılabildiğinin gösterilmesidir. Bu amaçla bir görüntü işleme yöntemi geliştirilmiş ve geliştirilen yazılımın performansı çeşitli deney düzenekleri kurularak test edilmiştir. Testler sonucunda sistemin başarı sınırları belirlenmeye çalışılmış ve çalışmanın sonucu olarak aktarılmıştır. Tez çalışmasının yan amaçlarından birisi de, temassız yer değiştirme ölçümü yöntemlerinden birisi olan “görüntü işleme ile yer değiştirme ölçümleri” alanındaki çalışmalara katkı sağlaması olarak belirlenmiştir. Ayrıca çalışmanın mühendislik alanında multi disiplinler bir çalışma olduğu, bilgisayar mühendisliği ve elektronik mühendisliği alanlarındaki bilgilerin kullanıldığı ama çalışmanın uygulamasının inşaat mühendisliği alanındaki uygulamalara doğrudan etki ettiği düşünülmektedir. Bu yüzden tez boyunca bu çalışmanın uygulama örneği olarak, inşaat mühendisliğindeki yapıların yer değişimi ölçümünün üzerinde durulmuş, örnekler ve testler bu alan doğrultusunda kullanılmıştır.

Tez çalışmasında Bölüm 2’de günümüzde kullanılmakta olan yer değişimi ölçüm yöntemleri temel bilgiler ile açıklanmıştır. Yöntemler arasındaki farklar ve karşılaştırmalar yine bu bölümde yapılmıştır. Çalışmada kullanılan sistemin ekipmanları, önerilen görüntü işleme ile yer değiştirme tespitinin detaylarıyla birlikte Bölüm 3’te verilmiştir. Bölüm 4 ise önerilen yöntemin farklı koşullarda performans testlerini ve analizlerini içeren çizelgeleri bulundurmaktadır. Ayrıca bu bölüm

içerisinde testlerin sonuçları değerlendirilmiş ve testler arasında performans kıyaslamaları yapılmıştır. Bölüm 5'te ise sonuçlar verilip, bu alanda yapılacak gelecekteki çalışmalara yönelik sistemin başarımını artıracak değerlendirmelerde bulunulmuştur.



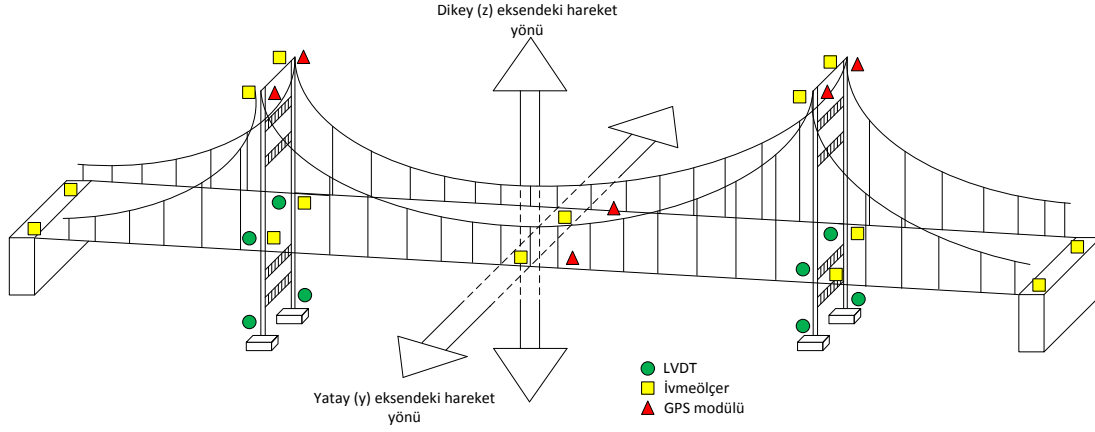


2. GÜNÜMÜZDE KULLANILAN YER DEĞİŞİMİ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Günümüzde kullanılan tüm yer değiştirme ölçüm sistemlerinin temelinde uzunluk değişimi veya önceden belirlenen koordinatların değişimi bilgisi kullanılmaktadır (Leach, 2014). Yer değişimi ölçüm sensörleri, belirli bir başlangıç noktasından belirli bir bitiş noktası arasındaki mesafeyi ölçerler.

Hareketli nesne veya yapıların yer değişimi ölçümlerinde birçok farklı teknik kullanılmaktadır. Yer değişimi ölçümleri tek bir sensör tipinin kullanılmasıyla olabileceği gibi birden çok sensörlerin çeşidinin kullanıldığı sistemlerle de yapılabilmektedir. Yer değişimi ölçümleri hareketli cisme kurulum yapısına göre “temaslı yer değiştirme ölçüm sistemleri” ve “temassız ölçüm sistemleri” olmak üzere iki farklı kategoriye ayrılmaktadır. Araştırmacılar yer değişimi ölçümü yapılacak cismin ölçüm hassasiyet gereksinimlerini göz önünde bulundurarak, bu yöntemleri birbiri arasında kıyaslayıp, oluşacak maliyet ve bütçe sınırları içerisinde bir sistem seçip, kurgulamaktadırlar. Eğer ölçümü yapılacak cisim inşaat mühendisliğindeki ilgi alanlarından olan kule, köprü, minare veya gökdelen ise karşılaştırılacak parametreler oldukça artmakta olup seçilecek yer değişimi sisteminin önemi daha da değer kazanmaktadır (Ko, 2005; Hu, 2014). Böyle durumlarda ölçüm hassasiyetini artırmak için birden çok ölçüm sistemi melez bir yapıda da kullanılabilir (Gastineau, 2009). Aşağıdaki grafikte bir köprünün salınımını izlemek için kurgulanan ve hem temaslı hem de temassız yer değiştirme ölçüm yöntemlerinin birlikte kullanıldığı örnek melez ölçüm sistemi görülmektedir.

Şekil 1.1’de sarı kare kutular ivmeölçerlerin, yeşil yuvalak kutular doğrusal değişken fark transformatörlerini (LVDT) , kırmızı üçgen kutular ise diferansiyel global konumlama sistemi (GPS) modüllerini ve köprü üzerinde yerleştirildikleri bölgeleri temsil etmektedir. Kurgulanan bu yapıya göre köprünün şekilde de belirtildiği gibi yatay ve düşey eksenindeki yer değişimleri yani aslında salınımları ölçülebilir. Ölçümler şekildeki gibi GPS modülleri, LVDT’ler ve ivmeölçerlerle birlikte, melez bir yapıda kullanılabildiği gibi ayrı ayrı da kullanılabilir (Jung, 2011; Dong, 2010).



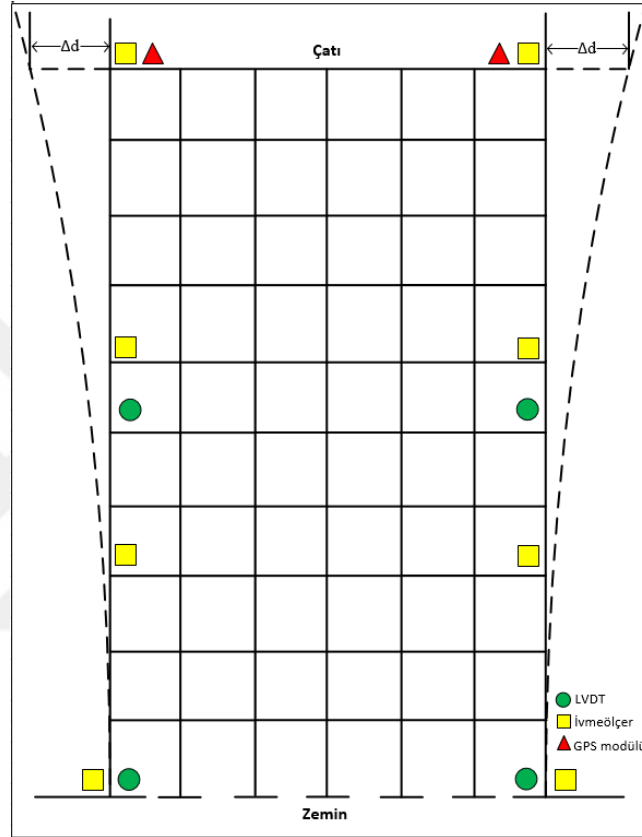
Şekil 1.1 : Köprü üzerinde çeşitli sensörlerle kurulan yer değişimi ölçümü sistemi.

Diğer birçok “değişim” ölçüm yöntemlerinde olduğu gibi yer değişimi ölçümünde de görecelilik kavramından söz edilebilir. Yer değiştiren cisim hareketi, referans kabul edilen görece sabit bir noktaya göre hesaplanır. Dolayısıyla hareketli bir cismin yer değişiminde her zaman referans alınan sabit bir nokta vardır. Şekilde gösterilen köprü salınıminin ölçüldüğü sistemde, köprü'nün başlangıç ve bitiş noktalarına yerleştirilen ivmeölçerler diğer ivmeölçerler için sabit referans noktalarıdır. Yani matematiksel olarak bu noktalardaki sensörlerden elde edilen veriler, diğer noktalardaki verilerden çıkartılarak bileşke veri seti belirlenmiş olur. Daha sonra toplanan bu ivmeölçer verileri işlenerek hareket profillerine çevrilmiş olur.

Yukarıdaki örnekte açıklandığı üzere; ivmeölçerler gibi sadece temaslı ölçüm sensörlerinin kullanıldığı her ölçüm sisteminde bir referans ölçüm noktasına ihtiyaç vardır. Bu yüzden temaslı ölçüm sistemlerinde sabit referans noktanın ölçümü için çoğu zaman ek sensörlerin kurulumlarına ihtiyaç vardır. Fakat bazı yer değişimi ölçümü çeşitlerinde, örneğin GPS tabanlı ölçümlerde, GPS modülleri sadece yerleştirilen noktaların anlık koordinatlarını ölçmektedir. Bu sayede GPS modüllerinin referans için köprü üzerinde başka bir GPS modülünün kullanılmasına gerek yoktur. Mevcuttaki modüllerden alınan anlık koordinat verilerinin hareket profillerine dönüştürülmesiyle o noktanın yer değiştirmesi ölçülür. Böylelikle veriler üzerinde çok fazla işlem yapılmasına gerek yoktur.

Aşağıdaki grafikte yine birden çok sensör setinin melez olarak kullanıldığı, bir binanın çatı katının zemine göre yer değiştirmesinin ölçümünün kurgulandığı model gösterilmektedir. Köprü modeline benzer şekilde ivmeölçer, GPS modülleri ve LVDT'ler ile çok katlı bir binanın çeşitli noktalarının yer değiştirmesi ölçümü sistemi

kurgulanmıştır. Bu sistemde de çeşitli katlara yerleştirilen ivmeölçerler için referans ölçümler zemin kata koyulan ivmeölçerlerden alınmaktadır. Şekildeki binanın çatı katının hareketini gözlemek içinse ivmeölçerlere ek olarak GPS modülleri koyulmuştur. İvmeölçerlerden alınan veriler GPS modüllerinden alınan verilerle karşılaştırılarak daha doğru sonuçlar elde edilebilir. LVDT'ler ise katlardaki kolonların yer değişimi ölçümleri için kullanılabilir.



Şekil 1.2 : Yüksek katlı binada çeşitli sensörlerle kurulan yer değişimi ölçümü sistemi.

Aşağıdaki bölümlerde öncelikle günümüzde kullanılan geleneksel yöntemlerle tespit edilen yer değiştirme ölçümleri anlatılmıştır. Kullanılan yöntemler “temaslı yer değiştirme ölçüm sistemleri” ve “temassız yer değiştirme ölçüm sistemleri” olarak iki kısma ayrılıp her bir kısım kendi başlığı altında açıklanmıştır.

2.1 Temaslı Yer Değişimi Ölçüm Sistemleri

Hareketli nesne veya yapı üzerine doğrudan monte edilen sensörlerin kullanıldığı ölçümlere temaslı yer değiştirme ölçümleri (contact displacement measurement systems) denmektedir. Bu sistemler, ölçümde kullanılan sensör tipine göre çeşitlilik

göstermekte olup, ölçümlerin doğruluğu da kullanılan sensörün hassasiyetine göre değişmektedir. Hareketli nesneye doğrudan temas yoluyla alınan ölçümlerde kullanılan sensörlere LVDT'ler, ivmeölçerler, potansiyometrik cetveller örnek verilebilir (Brownjohn, 2014). Bu sensörlerin ortak özellikleri mekaniksel değişimleri elektriksel sinyallere çevirerek anlamlandırılırlar.

Yer değişimi belirlemelerinde bu sistemlerin kullanımı sırasında bazı dezavantajlarının olduğu saptanmıştır. Bu sistemlerin uygulamalar esnasında değişiklik göstermekle birlikte kurulumları zor, kurulum sonrası bakımı oldukça sık ve kuruldukları çevredeki fiziksel etkilere daha açık sistemlerdir. Fakat bu sensörleri içeren ölçümlerin sonuçları daha yüksek doğruluğa sahip olup, temassız ölçüm sistemleri için referans oluşturmaktadır.

Aşağıdaki bölümlerde temaslı yer değiştirme ölçümlerinde kullanılan sistemlerden bazıları ve bu ölçümlerde kullanılan sensörlerin temel özellikleri anlatılmıştır.

2.1.1 İvmeölçer tabanlı ölçümleri

Bu tür ölçüm sistemlerinin temelini oluşturan sensörler ivmeölçerlerdir. İvmeölçerler test ve ölçüm sistemlerinde uzun yıllardan beri dinamik veya statik ivme değişimlerini ölçmek için kullanılmaktadır (Park, 2005; Arraigada, 2006). İvmeölçerlerin küçük ivme değişimlerini geniş bir frekans bandında ölçebilmeleri, uzun dönemli ölçümlerdeki sağlamlıkları, ölçüm hassasiyetlerindeki doğrulukları ve tutarlılıkları gibi birçok avantajları vardır (Hwang, 2012).

Günümüzde kullanılan ivmeölçerler çok farklı tiplerde olduğundan farklı çalışma yöntemleri vardır (Kavitha, 2016). Bunların en yaygın olarak kullanılanları piezoelektrik ve kapasitif ivmeölçerlerdir. Piezoelektrik ivmeölçerler içerisindeki mikroskobik kristaller maruz kaldıkları stres sonucunda orantılı olarak gerilim üretir (Newman, 2010). Üretilen bu gerilim değeri, önceden tanımlanmış olan gerilim değeri ile kıyaslanır ve ivmenin etkisi bulunmuş olur. Diğer bir tip ivmeölçer çeşidi ise kapasitif ivmeölçerlerdir. Bu tip ivmeölçerlerde birbirine yakın iki paralel levha arasında kapasitif etki oluşur ve kapasitans değeri ortaya çıkar. Dışarıdan harici bir kuvvet uygulandığı takdirde, sabit elektrot ve hareketli elektrot arasındaki mesafe değişecek, bu sayede kapasite değerinin de değişmesi sağlanacaktır. Sonuç olarak

uygulanan kuvvet ile ilintili bir elektriksel değişim elde edilir. Oluşan bu elektriksel değişim bir kalibrasyon parametresiyle çarpılıp ivme verisine çevrilir.

İvmeölçerlerin kullanıldığı ölçüm sistemlerinde genelde temel amaç nesnelerin titreşim bilgilerindeki genlik, frekans ve faz seviyelerinin belirlenmesidir. Fakat nesnelerin ivme verilerinden, yer değiştirme profilleri de çıkartılabilmektedir (Hong, 2016; Hu, 2015; Kavitha, 2016). Aşağıda ivmeölçerlerden zamana karşı elde edilen ivme verilerinden, sonradan işlem yapılarak (post process) hız-zaman veya yer değiştirme-zaman verileri nasıl oluşturulduğu anlatılmıştır.

Zamana bağlı pozisyon değişimi $x(t)$, hız değişim ise $v(t)$ olarak verilen bir cismin hızı pozisyonun birinci türevi alınarak aşağıdaki şekilde bulunur;

$$v(t) = \frac{dx}{dt} \quad (2.1)$$

Yine zamana bağlı ivmelenmesi $a(t)$ olarak verilen cismin ivme denklemi ise cismin hızının birinci dereceden türevi, pozisyon değişiminin ise ikinci dereceden türevi olup aşağıdaki formülde görülebilir;

$$a(t) = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv}{dt} \quad (2.2)$$

Benzer şekilde bir cismin ivme-zaman profili verildiğinde pozisyon-zaman profilinin bulunması için ivme verisinin zamana bağlı olarak iki kez integrali alınır. Teoride iki katlı integral işleminin alınabilmesi için başlangıç hareket değeri ve başlangıç hız değeri bilinmelidir. Başlangıç hız değeri ilk integrasyon işleminden sonra, başlangıç pozisyon değeri ise ikinci integral sonucuna etkilenmelidir. Bu işlemler aşağıdaki formülle gösterilmiştir.

$$v(t) = v(t_0) + \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau, \quad (2.3)$$

t_0 başlangıç zamanını, $v(t_0)$ başlangıç hız sabitini gösterir. Hız verisinden pozisyon verisinin eldesi ise aşağıdaki formülde gösterilmiştir:

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau \quad (2.4)$$

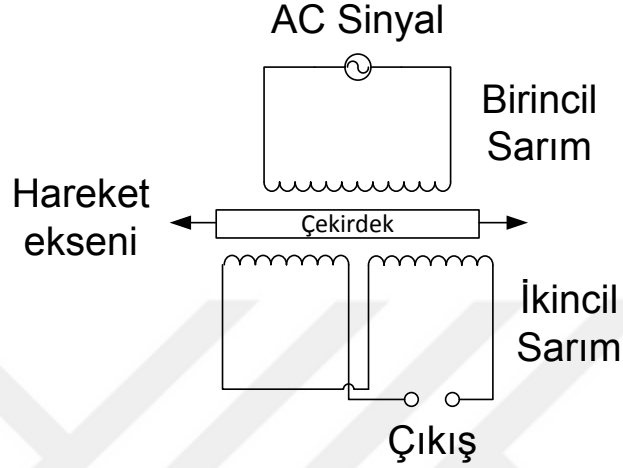
Böylece ivme-zaman verisinden çift integrasyon işlemi ile pozisyon verisi elde edilmiş olur. Fakat integrasyon hatalarını minimuma indirmek için yukarıda gösterilen iki başlangıç (hız ve pozisyon) koşulu bilinmelidir. Benzer şekilde bu değerlerin başlangıç koşullarındaki değerleri sadece bu anlardaki hız ve pozisyon değerlerinin doğrudan ölçülmesiyle bulunur.

İvmeölçer tabanlı ölçümlerin uzun yıllardan beri yer değiştirme ölçümlerinde kullanılmasına rağmen, yukarıda bahsedilen nümerik integral işlemlerinden kaynaklanan hesap hataları mevcuttur. Bu yüzden bu yöntemle yapılan ölçümlerin hatasını minimuma indirmek için diğer yer değiştirme yöntemleriyle birlikte kullanılmaktadır. Örneğin, ivmeölçerlerin GPS modülleriyle birlikte kullanılması oluşacak hataları minimuma indirmektedir (McCullagh, 2014; Han, 2016). Son yıllarda yapılan integrasyon algoritmaları iyileştirilmiş olmasına rağmen, halen istenilen seviyeye ulaşamamıştır.

2.1.2 Doğrusal değişken fark transformatörü (LVDT) tabanlı ölçümler

Bu yer değişimi ölçüm yönteminde sensör tipi olarak doğrusal değişken fark transformatörü (LVDT) sensörü kullanılır. LVDT'ler bir eksen üzerindeki ileri ve geri hareket mesafesini ölçmeye yarayan oldukça hassas, indüktif tabanlı cihazlardır (Santhosh, 2011). (Kano, 1989). Şekil 2.1'de görüldüğü gibi ölçüm eksenini boyunca ileri ve geri serbest hareket eden, çekirdek veya nüve diye adlandırılan iletken bir malzeme olan şaft, şaftı çevreleyen ve manyetik alanı oluşturan sarımlar ve içi boş bir metal gövdeden oluşurlar (Şekil 2.1). LVDT'ler temelde transformatör ilkesine göre çalışırlar. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, LVDT'ler de yer değişimi ölçümü işlemi, iki noktaya bağlanmış ve içerisinde üç adet trafo içeren silindirik şekilde bir manyetik çekirdeğin yerleştirilmesi ile gerçekleştirilir. Primerdeki sargıya belirli bir genlikte sinüsoidal sinyal uygulanır. Bu sinüsoidal dalga sayesinde sekonder tarafındaki sargıda bir alternatif akım sinyali indüklenir. Ferromanyetik malzemedeki yapılmış bir nüve sargılara fiziksel olarak dokunmaksızın sargıların içindeki silindirik bölgeye yerleştirilir. Sekonderdeki trafo primer uçtaki trafoya göre ters bağlıdır. Nüve transformatörünün manyetik merkezinde olduğu sürece sekonder çıkışları birbirini götürür ve çıkış gerilimi sıfır olur. Nüvenin manyetik merkez pozisyonundan uzaklaştırılmasıyla birlikte sekonder sargıları arasındaki indüklenen manyetik akı oranının dengesi bozulur. Nüve bu orta bobin ile ilişkili olarak hareket ettikçe, dış iki

bobin içerisinde bir voltaj indüklenir. Voltajın genliği ve işareti nüvenin hareket doğrultusuyla ilişkilidir. Nüvenin yer değiştirmesine göre indüklenen gerilimin genliği birbiriyle doğru orantılıdır. Sonuçta ortaya çıkan gerilim yine bir dönüşüm parametresiyle çarpılarak yer değişimine çevrilir ve hareketli cismin yer değişimi hesaplanır.



Şekil 2.1 : LVDT Sensörü İç yapısı.

LVDT'ler ile yer değişimi ölçümü oldukça yaygındır. Çoğu zaman LVDT tabanlı ölçümler, diğer temas yoluyla ölçüm metodlarına kıyasla daha güvenilir ve doğruluğu daha fazla olan bir yöntemdir. Günümüzde 100 μm 'den 500 mm ye kadar ölçüm aralığında, %0.5 lineeriteye sahip LVDT'ler mevcuttur (Santhosh, 2011). Ölçümlerin çözünürlüğü oldukça yüksektir. Ayrıca içerisindeki nüve ile sarımlar arasında fiziksel bir temas olmadığından sürtünme kuvvetinin oluşturacağı olumsuz etkiden minimum etkilenmektedirler. Bu sensörlerle yapılan ölçümlerdeki tutarlılık oranı oldukça yüksektir.

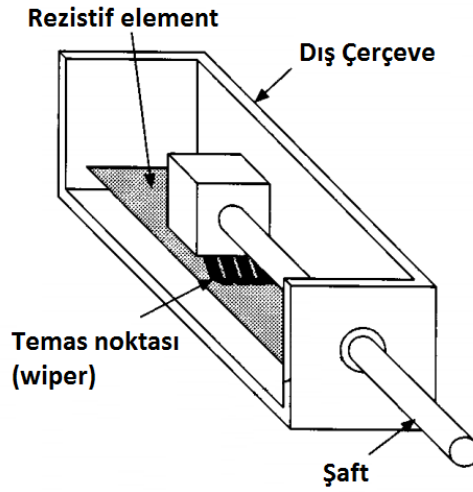
Ek olarak LVDT'ler zorlu ortam şartlarına karşı oldukça dayanıklı cihazlardır. Ani sıcaklık değişimlerinden minimum seviyede etkilenmektedirler (Santhosh, 2011). İçerisinde oluşturulan elektromanyetik alan zarar görmediği sürece yüksek doğruluklu ölçümler alınabilir. Bu yüzden de diğer yer değiştirme metodlarının doğrulanmasında referans ölçüm metodu olarakta kullanılırlar (Park, 2007, Merkle, 2004).

Günümüzde modern LVDT'ler çoklu eksenlerde ölçüm yapabilme kabiliyetine sahip olup, çevresel ve elektriksel etmenlerin neden olduğu elektriksel gürültüleri filtreleyebilecek sinyal işleme ünitelerini barındıran cihazlar olarak üretilmektedirler.

Yüksek çözünürlüklü yer değişimi ölçümü sonuçları, çevresel etmenlerden az etkilenme, yüksek tekrar edilebilirlik gibi avantajlarına rağmen LVDT sensörleri oldukça pahalıdır.

2.1.3 Potansiyometrik cetvel tabanlı ölçümler

Bu yöntemle yapılan ölçümlerde sensör tipi olarak potansiyometrik cetveller kullanılır. Potansiyometrik cetveller uygulanan hareketle direnç değerleri değişen elektromekanik cihazlardır (Şekil 2.2). Diğer sensörlerin yapılarına kıyasla daha basit ve maliyetçe uygun olduklarından yer değişimi uygulamalarında sıklıkla tercih edilir (Antonelli, 1999). Yapılarına göre lineer, yaylı veya döner tipli potansiyometre gibi birkaç çeşitte bulunmaktadır.

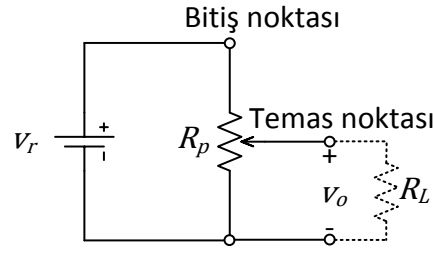


Şekil 2.2 : Lineer potansiyometrik cetvel kesiti.

Yer değişimi ölçümü için potansiyometrik cetvel ölçülecek cismin üzerine monte edilir. Potansiyometrik cetvelin şaftı ise hareket eden kısma monte edilir. Cisim şaft ekseninde hareket ettikçe şaft uzayıp içerisindeki potansiyometrenin direnç değeri değişir. Bu direnç değişimi ise potansiyometreden alınan çıkış geriliminde değişmeye sebep olur. Çıkıştaki bu voltaj değişimi şaftın mekanik değişiminin elektriksel karşılığıdır.

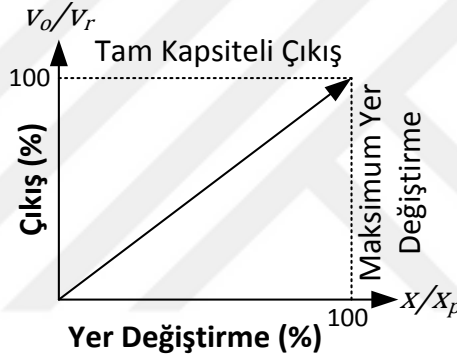
Elektriksel olarak bir potansiyometrik cetvel, Şekil 2.3'te de gösterildiği gibi temas noktası (wiper) ile ikiye bölünen bir voltaj bölücü devre olarak düşünülebilir. Böylece aslında potansiyometrenin çıkışı olan V_o , uygulanan V_r giriş voltajı ile temas noktasına göre değişen bir fonksiyondur. V_o çıkışından elde edilen analog sinyal, kullanılan

potansiyometrik cetvele özel tanımlanan dönüşüm katsayısıyla çarpılarak mesafe birimlerinden birine çevrilir.



Şekil 2.3 : Potansiyometrik cetvel elektriksel karşılığı.

Şekil 2.4'te bir potansiyometrik cetvelin mesafe değişimine göre ürettiği çıkış sinyali grafiği görülmektedir.



Şekil 2.4 : Potansiyometrik cetvel mesafe-çıkış grafiği.

Grafiğe göre V_r potansiyometrik cetvele uygulanan giriş voltajını, V_o potansiyometreden alınan çıkış voltajını, X_p potansiyometrenin maksimum açılma boyunu, X ise potansiyometrenin o anki açılma boyunu ifade etmektedir. Bu grafiğe göre potansiyometrik cetvelin o anki açılma boyu, maksimum açılma boyuna yaklaştıkça, çıkışından alınan voltaj seviyesi de uygulanan giriş voltajına yaklaşmaktadır.

Kullanım ve kurulum kolaylığı, düşük maliyetli olması, yüksek genlikli çıkış sinyali üretmesi, değişen hava koşullarından minimum etkilenmesi gibi nedenlerden dolayı yer değiştirme ölçümlerinde sıklıkla kullanılan sensörlerdir. Buna rağmen, dinamik değişimlere cevap verememeleri, ölçüm çözünürlüklerinin LVDT'ler kadar yüksek olamaması, sürtünmeden dolayı oluşan ölçüm kayıpları gibi dezavantajları da mevcuttur. Potansiyometrik cetveller yapıların kolon, kiriş gibi kısımlarına doğrudan

monte edilir. Günümüzde yapılardaki çatlaklar, eğilmeler, genişleme miktarları bu sensörler ile ölçülebilmektedir. Resim 2.1’de potansiyometrelerin kullanılmasıyla çatlak ölçümü yapılan bir ölçüm sistemi görülmektedir.



Resim 2.1 : Potansiyometrik cetvel ile yer değişimi ölçümü uygulamaları.

2.2 Temassız Yer Değişimi Ölçüm Sistemleri

Hareketli nesne veya yapı üzerine doğrudan monte edilmeden, uzaktan etkileşim yoluyla yapılan ölçümlere temassız yer değiştirme ölçümleri (noncontact displacement measurement systems) denmektedir. Temassız yer değişimi ölçüm sistemlerinde; GPS modülleri içeren sistemler, dijital kamera içeren sistemler, ultrasonik ses dalgası bazlı sistemler ve lazermetre tabanlı sistemler kullanılmaktadır (Park, 2010; Oetgen 2016; Son, 2015; Goyal, 2016; Gentile, 2001).

Yer değişimi ölçümlerinde temassız yer değişimi metodlarının kullanılması sırasında birtakım zorluklar ile karşılaşmıştır. Bu zorlukların sonucunda temassız ölçüm yöntemleri geliştirilmeye başlanmıştır. Bu sistemlerin kullanılmasıyla özellikle kurulum için harcanan zaman ve iş gücü, temassız yer değişimi ölçümlerine göre büyük ölçüde azalmaktadır. Ayrıca bazı yapıların yer değişimi ölçümlerinde temassız ölçüm sistemlerindeki sensörler kullanılamayabilmektedir. Çünkü yer değiştirmesi ölçülecek yapı “tarihi eser” statüsünde olup montaj işlemine izin verilmeyebilir. Benzer şekilde temassız ölçüm sistemlerinde kullanılan sensörler birbirinden değişik elektronik altyapılara sahip olduklarından, bu sensörlerden alınan verilerin çeşitli sinyal şartlandırıcı devrelerini içeren özel veri toplama ve kayıt cihazlarıyla işlenip anlamlı veriler haline getirilmesi gerekir. Ayrıca temassız ölçüm yöntemlerinden kullanılan sensörlerle bir ölçüm sistemi kurulduğunda, her bir sensörün düzenli olarak bakımının yapılması ve kontrol edilmesi gerekir. Yer değiştirme ölçümlerinde temassız ölçüm

sistemleri kullanılması, temaslı ölçüm sistemlerine göre ciddi avantajlar sağlamaktadır (Kim, 2005).

Yapılan çalışmalar ve geliştirmeler sonucu geleneksel temas tipi sensörlerin yerine, uzaktan ölçüm yapabilecek sistemlerle yer değiştirmenin başarılı bir şekilde ölçülebileceğini gösteren birçok çalışma mevcuttur (Kwon, 2002; Lee, 2006b; Kim, 2011; Ji YF 2008).

Bu tez çalışmasında yer değişimi ölçümü için temassız ölçüm teknolojilerinden birisi olan görüntü işleme tabanlı yer değiştirme ölçümleri alanına girmektedir.

2.2.1 Global konumlama sistemleri (GPS) tabanlı ölçümler

Gelişen teknoloji ile birlikte son 20 yılda GPS ile konum bulma işlemleri yapıların yer değiştirme izlenmelerinde kullanılmaya başlanmıştır (Nakamura, 2000; Jo H, 2012). GPS tabanlı sensörlerin yapıların hareketlerinin izlenmesinde kullanılması kısmen yeni bir yaklaşımdır (Yigit, 2015; Moschas 2011). GPS ile konum bulma işlemi, dünya yörüngesindeki uyduların yaydığı radyo sinyallerinin birbirleri arasındaki geçiş sürelerinin ölçülmesine dayanmaktadır (Celebi, 2000; Moschas, 2014; Hyzak, 1997).

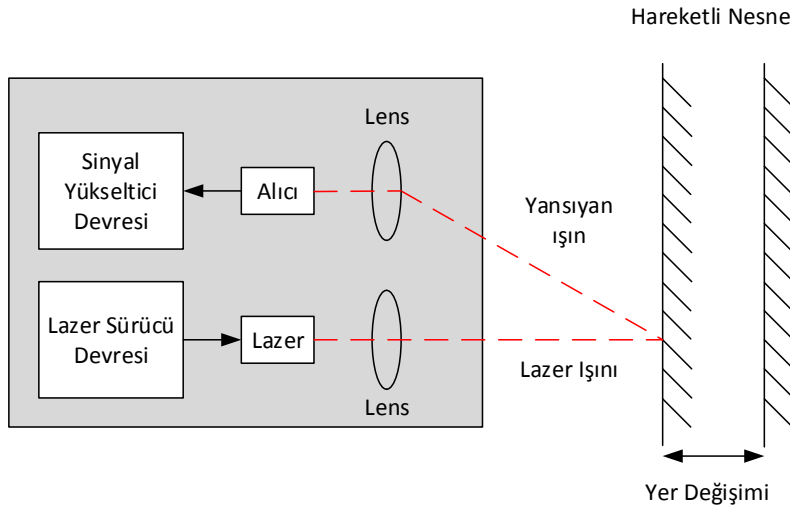
GPS sistemlerinin temeli üç yapıdan oluşur; ilk yapı dünya yörüngesinde dolaşan uydulardan oluşur. Bu uydular kendi aralarında sürekli olarak etkileşim içerisindedirler (Knecht, 2001). İkinci yapı ise bu uyduların kontrol istasyonlarıdır. Sistemdeki son yapı yeryüzünde konum öğrenme için kullanılan GPS alıcılardır. Kontrol istasyonu tarafından pozisyonları sürekli olarak bilinen uydular, GPS alıcılara yönelik olarak devamlı olarak zaman ve konum sinyali yayarlar. Yayılan sinyaller GPS alıcılar üzerindeki antenlerle algılanarak, alıcının o anki bulunduğu konum öğrenilir. Bir modül bulunduğu konumu belirlemek için en az dört uydu ile iletişim içerisinde olmalıdır. Bu yöntemin ölçüm hassasiyeti halen istenilen değerlere ulaşamayıp santimetreler civarındadır. Yapılan geliştirmeler ile birlikte GPS modüllerinin “diferansiyel” olarak kullanılması ve 24 saatlik uzun süreler boyunca yapılan yer değiştirme izleme ölçümlerinde, ölçüm hassasiyet milimetreler civarına kadar düşebilmiştir (Yigit, 2015). Teknolojik olarak daha gelişmiş ve pahalı GPS alıcılarıyla, GPS modüllerinin “diferansiyel” ölçüm metoduyla kullanılması ve ölçümlerin kesintisiz ve uzun süreli yapılmalarıyla ölçüm hassasiyeti milimetreler civarına inebilmektedir (Lowry, 1997). Fakat bu ölçüm sisteminin de kendine has bazı

dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; saniyedeki konum güncelleme süresinin azlığı, kablosuz sinyallerin yayılımı sırasında meydana gelen sönümlenme (multipath error effect), hassas GPS modüllerinin çok pahalı olması sayılabilir. Bu yüzden GPS tabanlı ölçümler yer değiştirme ölçümlerinde tek başlarına kullanılmamaktadırlar.

2.2.2 Lazermetre tabanlı ölçümler

Lazermetre tabanlı ölçümlerle yapılan yer değiştirme ölçümlerinde sensör tipi olarak lazermetre sensörleri kullanılmaktadır (Xie, 2016). Lazermetreler lazer kaynağı, lazer alıcısı ve lazer ışığını elektrik sinyaline çeviren üç temel yapıdan oluşmaktadır (Şekil 2.5). Lazermetreler ile yer değişiminin yanı sıra cisimlerin ivmeler, hızları, esneme miktarları, kalınlık değerleri gibi birçok ölçüm yapılabilmektedir (Maekawa, 2016). Kurulum kolaylığı, ölçümlerdeki doğruluklarının yüksek oluşu nedeniyle birçok uygulama da çoğu kez ilk tercih sebebidirler (Parali, 2016).

Şekilde 2.5'te görüldüğü gibi lazer kaynağından üretilen lazer ışını ölçümü yapılacak hareketli nesneye çarparak geri yansır. Sensördeki lenslerden geçen yansıyan ışınlar lazer alıcısı tarafından yakalanır. Böylelikle nesne ile lazermetre arasındaki mesafe ölçülür. Nesne hareket ettikçe hareket yönüne bağlı olarak mesafe artıp azalacağından, hareketli nesnenin yer değiştirmesi ölçülmüş olur.



Şekil 2.5 : Lazermetre iç yapısı.

Gelişen teknoloji sayesinde lazermetre sensörleriyle yapılan yer değişimi ölçümlerinin başarısı oldukça artmıştır (Xie, 2016). Günümüzde lazermetreler uzun mesafe ölçüm

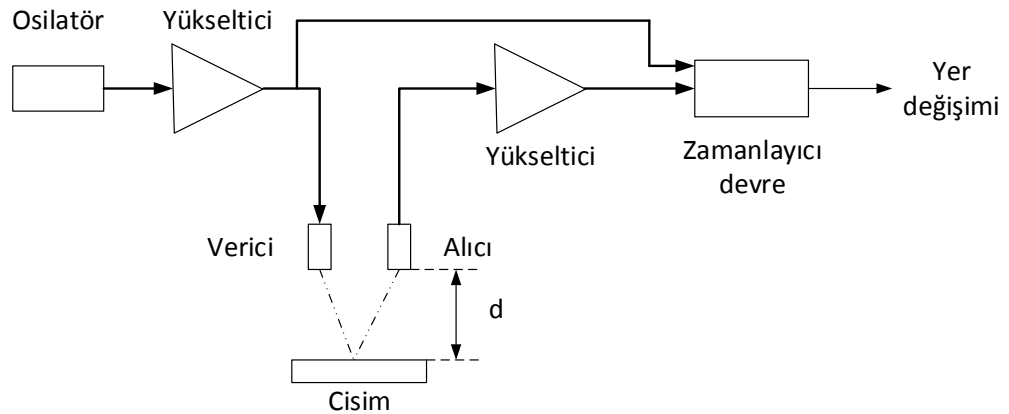
aralıklarında, 0,1 mm ile 0,2 mm arasındaki ölçüm doğruluğu ile çalışabilmektedir (Maekawa, 2016). Buna rağmen lazermetreler diğer sensörlere göre oldukça pahalı cihazlardır. Ayrıca uzun mesafelerden yapılan ölçümlerde lazer kaynağından çıkan ışınların yoğun olması insan sağlığını tehlikeye sokmaktadır. Bir diğer dezavantajları ise yer değiştirmesi ölçülecek yapının yüzeyinden etkilenmeleridir.

2.2.3 Etki-Yankı tabanlı ölçümler

Temassız yer değiştirme ölçüm sistemlerinden birisi etki-yankı yöntemlerinin kullanıldığı yer değiştirme ölçümleridir (Thong-un, 2015; Vanlanduit, 2003). Bu yöntemde ultrasonik ses dalgaları kullanılarak hareketli nesne üzerine gönderilir. Ultrasonik dalgalar, insan kulağının duyulabilir aralığı olan 20 kHz'den daha yüksek frekanslı bileşenlerden oluşan akustik dalgadır. Ultrason'un bir yer değişimi ölçüm metodu olarak kullanılmasındaki temel mantık gönderilen dalga'nın havadaki kalış süresine dayanır. Etki-yankı metodu bu sistemin kullanımına güzel bir örnektir. Bir ses kaynağından çıkan ultrasonik ses dalgası önündeki bir engelle çarpıp ve yansıtılarak ses kaynağına geri döner. Ses dalgasının havadaki kalış süresi ses dalgasının hızına ve kaynak-engel arası mesafeye bağlıdır. Ses dalgasının hızı biliniyor ve bu hız c ile ifade edilir ve sesin havada katettiği süre t olarak veriliyorsa engel ile ses kaynağı arasındaki d mesafesi;

$$d = \frac{ct}{2} \quad (2.5)$$

olarak bulunur. Şekil 2.6'da ultrasonik dalga tabanlı mesafe ölçümü sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Etki-Yankı tabanlı mesafe ölçümü.

Şekil 2.6’da gösterildiği gibi alıcı ve verici farklı cihazlar olabileceği gibi çoğu zaman aynı cihaz da olabilmektedir. Osilatör yaklaşık 40 kHz seviyesinde elektrik sinyali üretir. Üretilen elektrik sinyali verici tarafından aynı frekansta mekanik titreşimlere çevrilir. Bu mekanik titreşimler aslında ses dalgalarıdır. Durmakta olan cisimden yansıyan ses dalgaları alıcı tarafından tekrar elektrik sinyaline dönüştürülür. Osilatörün ilk sinyali üretmesiyle zaman tutmaya başlayan “zamanlayıcı devre” cisimden yansıyan ilk sinyalin elektriksel olarak geri almasıyla durmaktadır. Oluşan bu zaman farkı formül 2.5’teki t değerine denk gelir.

Hassas mesafe ölçümleri için sesin havadaki hızı oldukça kritiktir. Ses hızının oda sıcaklığı ve 1 atmosfer basınç altındaki değeri 343 m/s’dir. Fakat bu değer havanın basıncına, sıcaklığına, içerdiği kimyasal bileşenlerine (nem, karbondioksit miktarı gibi) çok bağlıdır. O yüzden mesafe ölçümü yapılacak ortamın hava sıcaklığı farkı fazla ise ölçümlerde hatalar olabilmektedir.

Etki-yankı yönteminin başlıca avantajları kolay kuruluma sahip olma, ortamın ışık miktarından bağımsız olma, havanın sisli olduğu ortam şartlarında veya ortamdaki elektromanyetik girişim etkilerine karşı dayanıklı olma gibi özellikler sayılabilir. Dezavantajı ise; ses kaynağından çıkan darbe sinyalinin genişliği çok düşük olduğundan yayılan gücün de çok az olmasından kaynaklanan düşük sinyal-gürültü oranına sahip olmasıdır. Çevresel etmenlerden dolayı oluşan çoklu yansımalarından dolayı sistemi hatalı ölçümlere çok açıktır.

2.2.4 Görüntü işleme tabanlı ölçümler

Bu tür yer değişimi ölçümlerinde görüntü işleme teknikleri temel alınarak yapılan ölçümü yöntemleridir (Wu, 2016; Ye, 2016;). Bu tez çalışmasında sunulan sistem de bu ölçüm kategorisine girmektedir. Bu yöntem geleneksel yer değiştirme ölçüm yöntemlerine göre daha yeni bir yaklaşımdır (Kim, 2011). Bu tip ölçümlerde genellikle, hareketli nesneyi veya yapıyı gözlemleyebilecek dijital kameralar, kameraların sürekli takip ettiği kullanıcı tarafından belirlenen bir şablon ve kameradan alınan verileri işleyen bir görüntü işleme yazılımı kullanılmaktadır (Olaszek, 1999; Mazen, 2004; Wahbeh, 2003; Ji Y, 2012; Lee, 2006b). Dijital kameralar hareketli nesne üzerinde bir veya birden fazla şablonu referans alarak bu şablonların hareketlerini takip eder (Lee, 2006c; Wahbeh, 2003).

Görüntü işleme ile yapılan yer değişimi ölçümü uygulamalarında kurulumun kolay ve hızlı olması, sonuçların çabuk elde edilmesi, diğer temassız ölçüm sistemlerindeki sensörlere göre nispeten daha ekonomik olması bakımından yer değişimi ölçümlerinde en çok tercih edilen ve araştırma yapılan alanlardan birisidir (Santos, 2016; Kwon, 2002).

Günümüzde bu yöntem; üzerinden araç ve trenlerin geçtiği uzun asma köprülerin, yüksek kulelerin, çok katlı binaların, rüzgar güllerinin, fabrika bacalarının belirli yapısal noktalarındaki yer değiştirmelerin belirlenmesinde mevcut yöntemlere alternatif olarak kullanılmaktadır (Khuc 2016; Lee 2006a; Olaszek 1999; Yapar 2015).

Yapılan çalışmalar, bu yöntemin kullanıldığı ölçümlerinin başarısının, LVDT tabanlı ölçüm sonuçlarının başarısına yaklaşmakta olduğunu göstermektedir (Lee J 2006; Ribeiro 2014). Çalışmalarda dijital kamera ile hedef arasındaki mesafenin 10 metre olduğu ölçümlerde 0,1 mm çözünürlüğe, 100 metre olduğu ölçümlerde ise 1,0 mm çözünürlüğe ulaşılmıştır (Stephen, 1993). Bu ölçüm sisteminde yapılan ölçümler genellikle tek bir kamera ile yatay ve dikey eksenlerdeki yer değiştirmelerin belirlenmesinde kullanılmış olup, iki kamera ile üç eksenli yer değişimi ölçümleride yapılabilmektedir (Chang C, 2007). Bu yöntemin bir diğer önemli avantajı ise LVDT veya lazermetrelere göre benzer ölçüm başarısına sahip olmalarına rağmen diğer yöntemlere göre daha az maliyetli olmalarıdır (Kim, 2005; Choi, 2011). Ayrıca bu yöntemle yapılacak bir ölçüm kurulumu için harcanan süre diğer ölçüm yöntemlerine göre daha azdır.

2.3 Yer Değiştirme Ölçüm Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Temaslı yer değişimi ölçümlerinin kullanıldığı sistemlerde kullanılan sensörlerin gelişen teknolojiye ayak uydurmasıyla, yer değişimi tespitleri yüksek hassasiyetle ve doğrulukla yapılarak kullanılmaktadır. Fakat bu ölçüm sistemlerinde kullanılan sensörler ve cihazlar oldukça hassas, oldukça pahalı ve kurulumu zor olup kurulum esnasında hassas işçilik gerektiren, bu yüzden de fazlaca zaman alan sensörlerden oluşmaktadır. Ayrıca yer değiştirme ölçümlerinde kullanılan cihazlar çoğu zaman 7 gün 24 saat çalışabilmesi gerektiği için hava şartlarından kaynaklanan her türlü fiziksel etkilere dayanıklı olmalıdır. Bununla birlikte tüm temaslı ölçümlerdeki sensörlerin çıkış voltajları genelde düşük genliklerde olduğu için kullanılan kablolardan, sistemi

besleyen elektrik kaynağına kadar herşey olabildiğince gürültüsüz olmalıdır. Bu durum ise, çoğu zaman kurulumu zorlaştıran, kablo mesafelerini kısıtlayan bir başka nedendir. Benzer şekilde bu sensörler ortamdaki sıcaklık değişimlerinden çok çabuk etkilenmektedir. Ortamda bulunan elektromanyetik girişimlerin etkilerine de yatkındırlar. Ayrıca bu sensörlere düzenli olarak periyodik bakım ve kalibrasyon yapılmalıdır. Bu gibi nedenler, temaslı yer değişimi ölçümü yöntemlerinin temassız ölçüm yöntemlerine göre dezavantajlarını oluşturur.

Temaslı yer değişimi ölçümü yöntemlerinin, temassız ölçüm yöntemlerine göre belli başlı avantajları ise; ölçüm güvenilirliğinin yüksek olması, ölçüm hassasiyetlerin kimi ölçümlerde 0,1 mm'ye kadar düşebilmesi, duman, sis, ışsız ortam etmenlerden nadiren etkilenmesi, ölçümlerin tekrarlanabilirlerindeki başarısı, nispeten daha ekonomik sensörleri barındırması, ölçülecek cismin yüzeyine kısmen daha az bağımlı olması, sensörlerin yeniden kullanılabilirliğinin yüksek olması gibi nedenler sayılabilir.

Temassız yer değişimi ölçüm yöntemleri, günümüzde geliştirilmekte olan popüler bir alandır. Bu yöntemin kullanılması temassız ölçüm yöntemlerine göre daha kolay ve hızlı kurulumu sahip olmasına, uzun süreli bakım gerektirmemesine, çevresel etmenlerin oluşturduğu fiziksel zorluklardan nispeten daha az etkilenmesine rağmen ölçüm hassasiyeti, temaslı ölçüm yöntemlerine kıyasla daha düşük kalmaktadır. Ölçüm hassasiyetinin artırılması yönelik çalışmaların yapılması bu alandaki güncel araştırmaları oluşturmaktadır. Aşağıdaki çizelgede sistemlerin birbiri arasında karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Ölçüm sistemlerinin karşılaştırılma tablosu.

Kullanılan Yöntem	Kurulum Kolaylığı	Veri İşleme İş Yüğü	Ölçüm Hassasiyeti (yaklaşık)	Maliyet	Kurulum Sonrası Bakım	Sıcaklık Değişiminden Etkilenme	Elektromanyetik Etkilere Yatkınlık
İvmeölçer Tabanlı Sistemler	Zor	Çok	mm	Çok Yüksek	Fazla	Çok	Çok
LVDT Tabanlı Sistemler	Zor	Normal	mm	Çok Yüksek	Fazla	Çok	Çok
Potansiyometrik Tabanlı Sistemler	Zor	Normal	mm	Normal	Fazla	Çok	Çok
GPS Tabanlı Sistemler	Kolay	Az	cm	Çok Yüksek	Az	Az	Az
Lazermetre Tabanlı Sistemler	Kolay	Normal	mm	Çok Yüksek	Az	Az	Az
Etik Yankı Tabanlı Sistemler	Kolay	Normal	mm	Çok Yüksek	Az	Az	Az
Görüntü İşleme Tabanlı Sistemler	Kolay	Normal	cm	Düşük	Az	Az	Az

Çizelge 2.1'e bakıldığında ilk üç satır temaslı yer değişimi ölçümlerinden oluşurken, geri kalan sistemler temassız yer değişimi ölçümlerinden oluşmaktadır. Yöntemler kurulum kolaylığına göre birbirleriyle karşılaştırıldığında, temaslı ölçüm sistemlerinin kurulumu temassız ölçüm sistemlerine göre çok daha zor olduğu görülmüştür. Veri işleme iş yükü açısından karşılaştırıldığında, ivmeölçer tabanlı sistemlerden alınan sonuçlar oldukça yüksek miktarda sayısal ve analog sinyal işleme tekniklerini gerektirdiğinden diğer sistemlere göre yoğun bir çalışma gerektirmektedir. GPS tabanlı sistemler ise hareketli nesnelerin doğrudan konum bilgisini aktardığından diğerlerine göre daha az iş yüküne sahiptir. Ölçüm sistemleri yer değişimi ölçüm hassasiyeti açısından birbirlerine göre karşılaştırıldığında temaslı ölçüm sistemlerini oluşturan grubun hassasiyet seviyesi milimetreler civarında olabilirken, temassız ölçüm sistemlerinden GPS tabanlı ve görüntü işleme tabanlı sistemlerin hassasiyeti düşük kalmakta olup santimetreler civarında görülmektedir. Günümüzde gelişen sensör teknolojisi ile birlikte etki yankı tabanlı ve lazermetre tabanlı sistemlerden alınan yer değişimi sonuçları milimetreler civarında olabilmektedir. Ölçüm sistemleri birbirleriyle maliyet açısından karşılaştırılırsa, görüntü işleme tabanlı sistemlerde tercih edilen algılayıcı genellikle dijital kamera olduğundan diğer sistemlerdeki özel sensörlere nispeten çok daha uygun fiyatlı olarak kalmaktadır. Çizelge 2.1'de sistemler kurulum sonrası bakım işlemleri açısından birbirleriyle kıyaslandığında temaslı yer değişimi ölçüm sistemlerinin kontrol periyotları oldukça sık olup bakımları hassas olan sensörlerden kuruludur. Temassız ölçüm sistemlerinin ise kurulum sonrası bakım işlemleri nispeten daha az olmaktadır.



3. YER DEĞİŞTİRME TESPİTİ SİSTEMİ

Bu bölümde çalışmada önerilen görüntü işleme yöntemi detaylarıyla birlikte anlatılmaktadır. Test düzeneğinin kurulumu ve kullanılan materyaller özellikleriyle birlikte Bölüm 3.1’de anlatılırken, yer değiştirmenin tespitinin geliştirilen görüntü işleme yazılımı ile bulunması ise detaylarıyla birlikte Bölüm 3.2’de anlatılmaktadır. Bölüm 3.3’te ise görüntü işleme yazılımından alınan sonuçların, referans alınan sarsma tablası hareketlerine göre doğruluğu ve hata hesabı için karşılaştırma analizinin nasıl yapıldığı anlatılmaktadır.

3.1 Kullanılan Materyaller ve Deney Düzeneği

Bu tezde görüntüleme elemanı olarak Point Grey firmasının “Flea3 3.2 MP Color USB3 Vision” kamerasıyla, “BeSafe” firmasının kamera lensi birlikte kullanılmıştır. Kullanılan dijital kamera “2080 x 1552” piksel çözünürlüğünde ve saniyede 60 çerçeve görüntü olarak video kaydını gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca kamera boyutlarının küçük olması (29 mm en x 29 mm boy x 30 mm yükseklik), kurulum kolaylığı, hafifliği ve ekonomik oluşu gibi nedenlerde bu kameranın seçilmesinde bir diğer önemli etkenlerdir (fiyatı 595\$).



Resim 3.1 : Kullanılan dijital kamera.

Birleştirilen kamera-lens bloğu pleksiglas malzemeden yapılan ekran platformunu görüntüleyecek şekilde zeminden alüminyum plakaya sabitlenmiştir (Resim 3.2).



Resim 3.2 : Kamera ve lens bloğu.

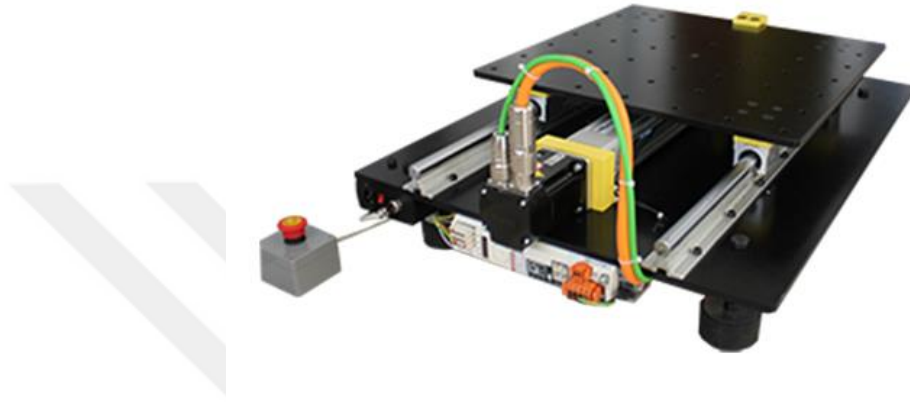
Ekran platformu üzerine lazer işaretçinin üzerine düşeceği ve lazerin bu bölge içinde hareket edeceği “80 mm x 60 mm”lik bir dikdörtgen çerçeve çizilmiştir. Ayrıca bu çerçevenin merkezine de “10 mm” çapında çember çizilmiştir. Bu çember daha sonra piksel-mm çevrimindeki parametrelerin belirlenmesinde kullanılacağından, bu çizimler “1200 x 1200” çözünürlüklü lazer yazıcıdan alınmıştır. Alınan bu çıktı sayfası ekran platformuna şekildeki gibi sabitlenmiştir. Kamera ile pleksiglas arasındaki uzaklık yaklaşık “156 mm” olacak şekilde ayarlanıp, kameranın görüntüleyeceği alan yaklaşık “80 mm x 60 mm” olacak şekilde odak ayarı yapılmıştır.



Resim 3.3 : Kamera ve ekran platformu.

Çalışmada kameraya ve lazer işaretçiye uygulanacak referans yer değiştirme profilleri için Teknik Destek Grubu Firmasının “Testbox-Shaketable” isimli Servo Elektro-

Mekanik Sarsma Tablası kullanılmıştır (Resim 3.4). Testbox-Shaketable sinüs, üçgeni kare vb. tanımlı pozisyon profillerini kendi yazılımından kontrol edilen periyot sayısı ve frekansı boyunca uygulayabilen, tek eksenli ileri-geri yönde hareket kabiliyetine sahip, kapalı devre PID kontrollüyle hareket eden elektro-servo motora sahip eğitim amaçlı sarsma tablasıdır. Tüm hareket profilleri kullanılan bu sarsma tablasından uygulanmıştır.



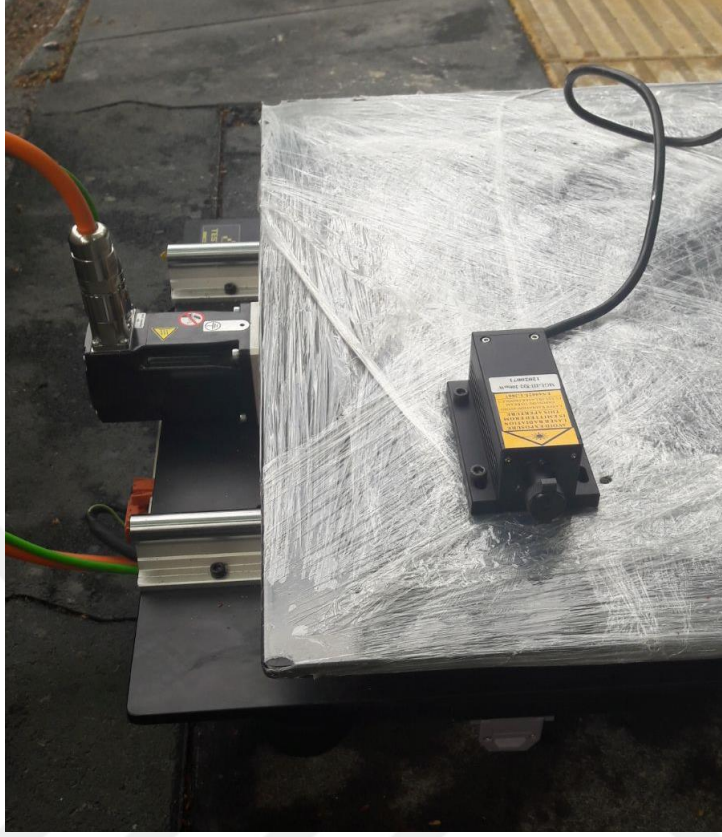
Resim 3.4 : “Testbox-Shaketable” sarsma tablası.

Testbox-Shaketable sarsma tablası “Easytest Shake Table” yazılımıyla birlikte kullanılmaktadır (Resim 3.5). Bu yazılım sayesinde istenilen genlikte ve frekansta, çeşitli hareket profilleri uygulanabilmektedir. Ayrıca bu yazılım sayesinde yazılımda belirlenen hareket süresi boyunca sarsma tablasının gerçek pozisyonunda (actual position) zamana bağlı olarak kayıt edilebilmektedir.



Resim 3.5 : Testbox-Shaketable kontrol yazılımı arayüzü.

Çalışmada 250 mW çıkış gücüne sahip yeşil renkli lazer işaretçi kullanılmıştır. Lazer işaretçi ve sarsma tablasına sabitlenmiş hali Resim 3.6’da görülmektedir.



Resim 3.6 : Lazer işaretçi.

Çalışmadaki en önemli parçalardan biriside “Sparkfun” firmasının kart halinde sunduğu, Honeywell firması tarafından üretilen ve üzerinde üç eksenli manyetik ölçüm yeteneğine sahip “HMC5883L” sensörünün bulunduğu manyetik kumpastır. HMC5883L sensörü I²C dijital haberleşme protokolünü kullanmaktadır. Ayrıca bu sensörün çözünürlüğü 5 mili-gaus olarak belirtilmiştir (Resim 3.7).



Resim 3.7 : SparkFun HMC5883L üç eksenli manyeto ölçer.

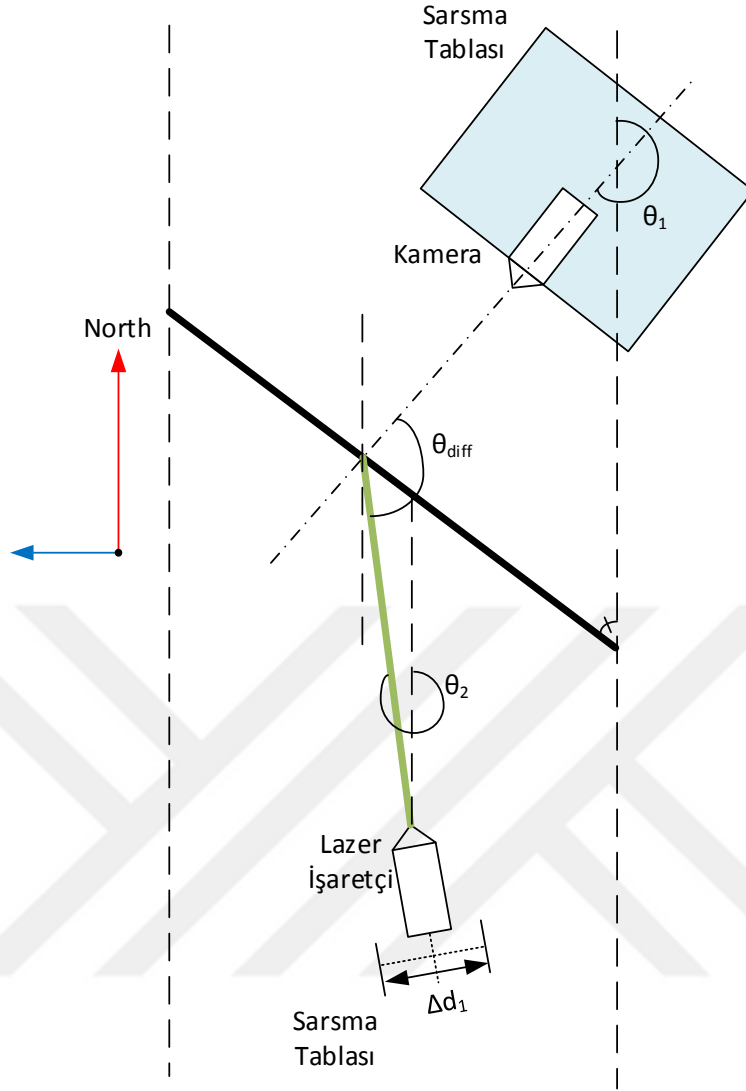
HMC5883L üç eksenli manyeto ölçer bu çalışmada sarsma tablasının ve kamera platformunun ayrı ayrı Kuzey ile yaptıkları açıları ölçülmesinde ve sonrasında her iki platformda kuzeyle yaptıkları açı değeri aynı olacak şekilde ayarlamak için kullanılmıştır. Böylece her kurulum öncesinde kamera platformu ile lazer işaretçinin birbirine tam paralel olarak ayarlanması amaçlanmıştır. Bu platformların paralel olma durumu oldukça önemli olup, sistemin başarısını doğrudan etkileyen etmenlerdendir. Çünkü platformlar birbirlerine tam paralel olmadıkça, lazer işaretçinin sarsma tablasıyla birlikte uyguladığı yer değişimi hareket profilinin izdüşümü kamera platformunda tam olarak oluşmamaktadır. Bu durumu bir örnekle açıklamak gerekirse; eğer platformlar birbirlerine tam paralel olmayıp sarsma tablasından ve dolayısıyla lazer işaretçiden 10 mm'lik tepe genlikli sinüzoidal hareket uygulandığında kamera platformunda lazerin iz düşümü aradaki açının sinüs değeriyle ters orantılı şekilde olacaktır. Bu durum aşağıdaki şekilde düzeneğe tepeden bakılmak suretiyle çizilmiştir.



Şekil 3.1 : Platform ve sarsma tablası arasında θ_{diff} açısı olduğu duruma tepeden bakış. Yukarıdaki şekilde olduğu gibi kamera platformu ile lazer işaretçi düzlemi arasında θ açısı kadar bir açı varsa sarsma tablasından uygulanan toplamda $\Delta d_1 = 20$ mm'lik yer değişimi, kamera platformunda Δd_2 kadarlık bir yer değişime denk gelmektedir. Δd_1 ile Δd_2 arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$\sin \theta_{diff} = \frac{\Delta d_1}{\Delta d_2} \quad (3.1)$$

Deney düzeneği kurulurken yukarıda bahsedilen platformlar arası θ_{diff} açısı hesaplamak için hem sarsma tablasının, hemde lazer işaretçinin platformunun kuzey ile yaptığı açılar üç eksenli manyeto ölçer sensörüyle ölçülmüştür. Aşağıdaki şekilde platformlar arası açı farkının olduğu durumun tepeden bakışı gösterilmiştir.

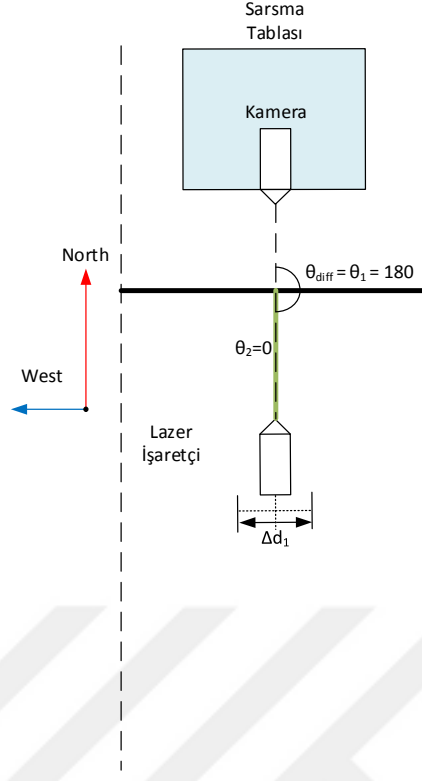


Şekil 3.2 : Platformlar arası açı bulunması durumu.

Şekil 3.2’de örnek bir verilen çalışma düzeneğinde gösterildiği gibi lazer işaretçinin doğrultusunun kuzey ile yaptığı açı HMC5883L üç eksenli manyeto ölçer ile ölçülüp θ_2 açısı ile ifade edilmiştir. Sarsma tablası ve kamera platformunun doğrultusunun kuzey ile yaptığı açı ikinci ölçüm olup, θ_1 açısıyla isimlendirilmiştir. Bu durumda platformlar arasındaki açı değeri θ_{diff} , ölçülen bu değerler birbirinden çıkarılmasıyla aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$\theta_{diff} = \theta_1 - \theta_2 \quad (3.2)$$

Platformların doğrultularının birbirine paralel olması, θ_{diff} değerinin 180° ’ye eşit olmasıyla sağlanır. Aşağıdaki Şekil 3.3’de $\theta_{diff} = 180^\circ$ durumunun oluşturulduğu deney düzeneğinin tepeden bakışı çizilmiştir.



Şekil 3.3 : Platformların doğrultularının paralel olması durumu.

Yukarıdaki Şekil 3.3'te θ_1 açısını kuzey ile yaptığı açı 180° ölçüldüğü, θ_2 açısının ise kuzey ile yaptığı açı 0° ölçüldüğü varsayılmıştır. Bu durumda θ_{diff} değeri;

$$\theta_{diff} = 180^\circ - 0^\circ \quad (3.3)$$

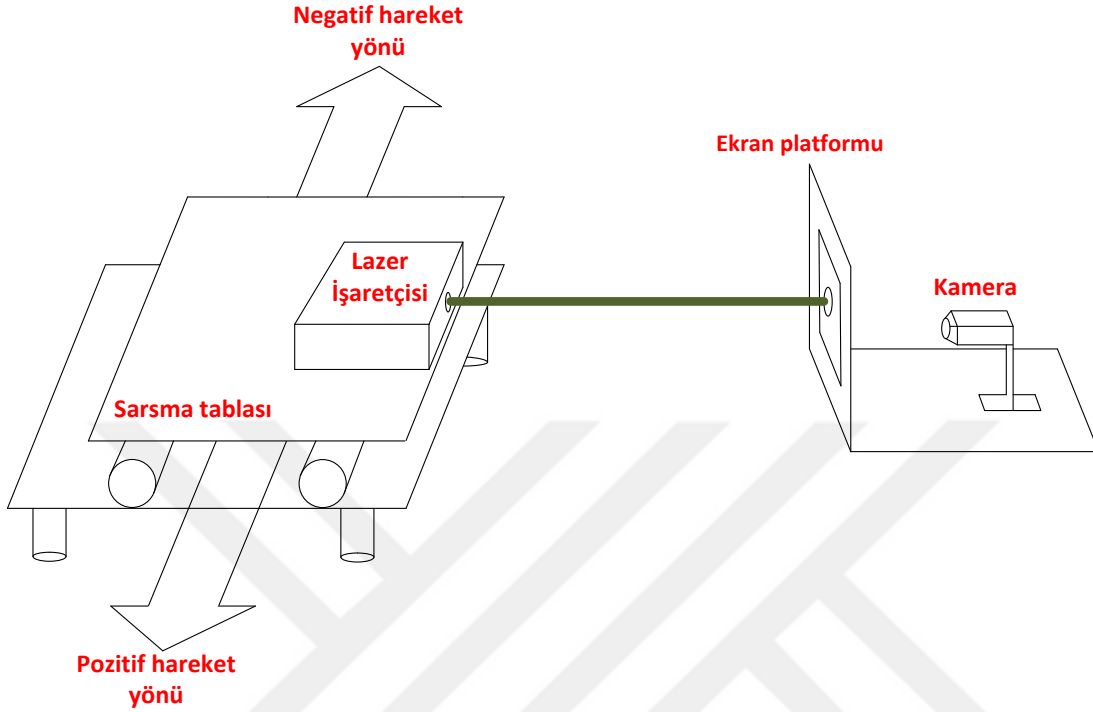
$$\theta_{diff} = 180^\circ \quad (3.4)$$

θ_{diff} değerinin 180° olmasıyla platform doğrultuları birbirine paralel hale gelmiştir.

Deney düzeneği kurulduktan sonra θ_1 ve θ_2 açıları sırasıyla ölçülüp θ_{diff} değeri 180° olana kadar platformların doğrultuları değiştirilmiştir. Böylece sarsma tablasından oluşturulan Δd_1 yer değişimleri, düzeneğin kurulumundan kaynaklanan doğrultu hatalarını düzelterek kamera platformuna geometrik hatasız aktarılması sağlanmıştır.

Kullanılacak malzemeler ve platformlar entegre edildikten sonra, deney düzeneği şekildeki gibi (Şekil 3.4) kurulmuştur. Lazer işaretçi sarsma tablasının üzerine monte edilmiş, ekran platformu ve kameranın tam merkezine gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Burada lazer işaretçinin merkeze doğru ayarlanması Kamera ve ekran platformu ise mekanik hataları ortadan kaldırmak üzere yere sabitlenmiştir. Kamera platformunun doğrultusu ile lazer işaretçinin doğrultusu HMC5883L üç

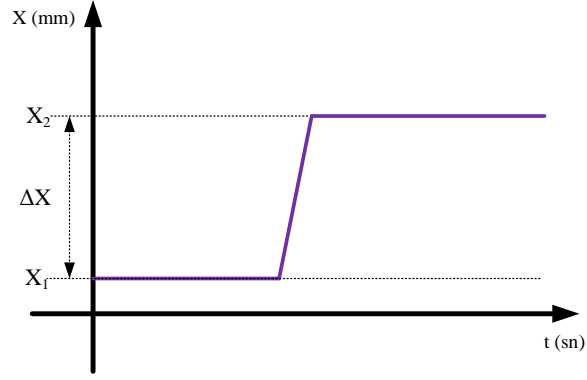
eksenli manyeto ölçer sensörüyle ölçülerek aradaki açı 180° olana kadar platformlar elle ayarlanmıştır. Bu ayarlardan sonra kamera ile lazer işaretçinin arası “Bosch” uzaklık sensörü ile ölçülmüştür.



Şekil 3.4 : Deney düzeneği kurulum görseli.

Kurulum işlemleri tamamlandıktan sonra sarsma tablası kontrol yazılımı açılıp, tanımlı basamak ve sinüzoidal hareket profillerinin uygulanması için gerekli ayarlar yapılmıştır. Her bir deney düzeneği farklı denemeleri içerdiğinden birbirinden farklı frekansta, tipte ve genlikte yer değiştirme profilleri kullanılmıştır. Çalışmada hareket profilleri dinamik ve statik hareketler olmak üzere 2 farklı hareket tipi olarak kullanılmıştır. Her iki hareket tipinde de genlikler 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm, 0,6 mm, 0,7 mm, 0,8 mm, 0,9 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm olarak değiştirilmiştir.

Statik hareket profilleri tez çalışmasında geliştirilen görüntü işleme metodunun statik yer değişimi hareketlerine karşı performansını incelemek üzere uygulanmıştır. Aşağıdaki şekilde sarsma tablasından üretilen statik yer değişimi hareketi profili grafiği gösterilmiştir.

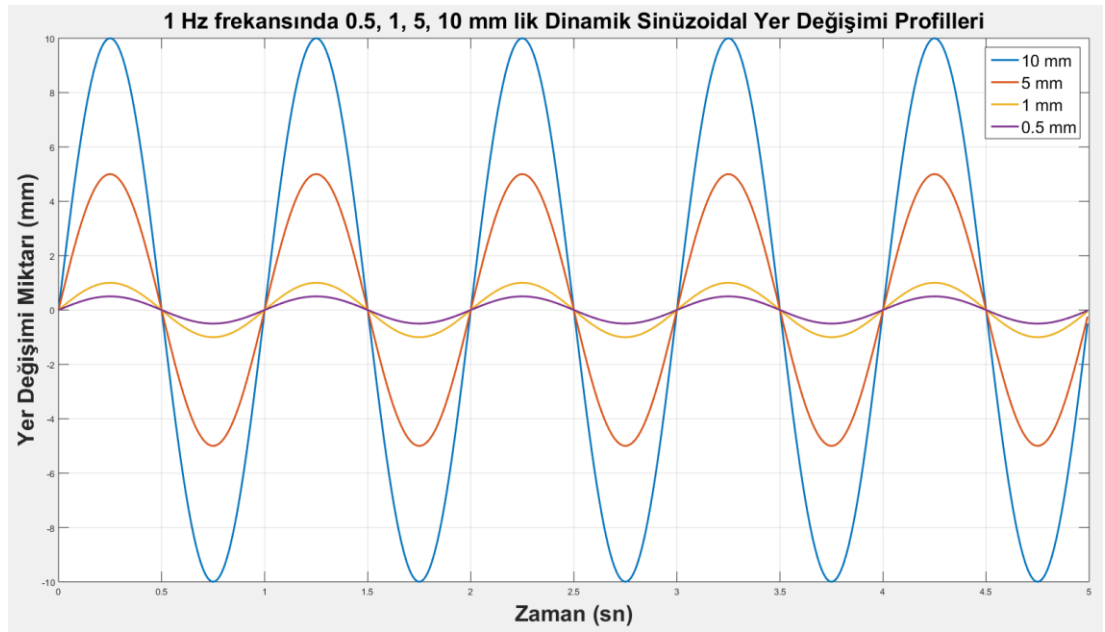


Şekil 3.5 : Statik yer değişimi hareketi profili.

Grafikte X_1 sarsma tablasının harekete başlamadan önceki pozisyonunu, X_2 ise sarsma tablası hareketi sonrasındaki pozisyonunu ifade etmektedir. ΔX ise sarsma tablası yazılımından girilen toplam yer değişimi miktarını karşılık gelen mesafedir.

Çalışmada sarsma tablasından uygulanan ikinci tip hareket profili ise dinamik yer değişimi profilleridir. Bu profiller tez çalışmasında geliştirilen görüntü işleme yazılımının zamanla daha değişken olan hareket profillerine karşı performansını incelemek için kullanılmıştır.

Hareket profilleri 0,1 mm'den 10 mm'ye kadar değişik genlik değerlerinde, sabit frekansta uygulanmıştır. Şekil 3.6'da 10 mm için örnek bir hareket profili görülebilir.



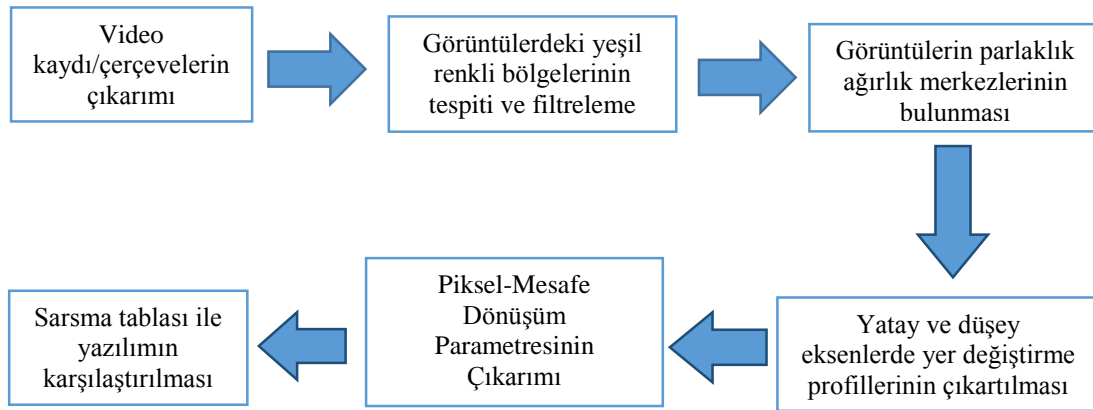
Şekil 3.6 : Farklı genliklerdeki dinamik hareket profilleri.

Sarsma tablasının hareketi aslında üzerine sabitlenmiş olan lazer işaretçiye uygulanmış ve böylece lazer ışını da ekran platformu üzerinde hareket etmiştir. Kamera ise bu lazer ışını hareketini kayıt edip, Matlab ortamında geliştirilen yazılım sayesinde, kaydedilen videolar sonradan işleme metoduyla işlenip yatay ve düşey eksenlerdeki hareket profillerine çevrilmiştir.

Sarsma tablası kontrol yazılımından uygulanan hareketler esnasında tablanın anlık pozisyonu da tablanın kendi yazılımından kaydedilmiştir. karşılaştırma için kullanılmak üzere kendi yazılımıyla kaydedilmiştir. Böylelikle son aşamada yüksek doğrulukla hareket profilleri uygulayan sarsma tablası hareketleriyle tezde bahsedilen yazılımın çıktısı sonucu oluşan hareket profillerinin benzerliği karşılaştırılmıştır.

3.2 Geliştirilen Görüntü İşleme Yöntemi

Bu tezde Matlab ortamında geliştirilen görüntü işleme yazılımıyla yatay ve düşey eksenlerde sarsma tablasından uygulanan yer değiştirme profillerinin doğruluğunun belirlenmesi için frekans ve genlik analizi üzerinde durulmuştur. Sarsma tablasından uygulanan farklı genlik ve farklı frekanslardaki referans sinüs pozisyon profilleri önerilen görüntü işleme tekniğiyle yakalanmaya çalışılmış ve Fourier dönüşümü sonucunda yapılan frekans analizi ile de hata tespiti yapılmıştır. Önerilen metodun alt basamakları aşağıdaki şekildedir.



Şekil 3.7 : Önerilen görüntü işleme yöntemi adımları.

3.2.1 Video kaydı

Görüntü işleme yazılımının ilk bölümü olan bu bölüm yazılıma girdi olarak sunulan videolardan oluşmaktadır. Videolar kameranın kendi yazılımı olan “The FlyCapture”

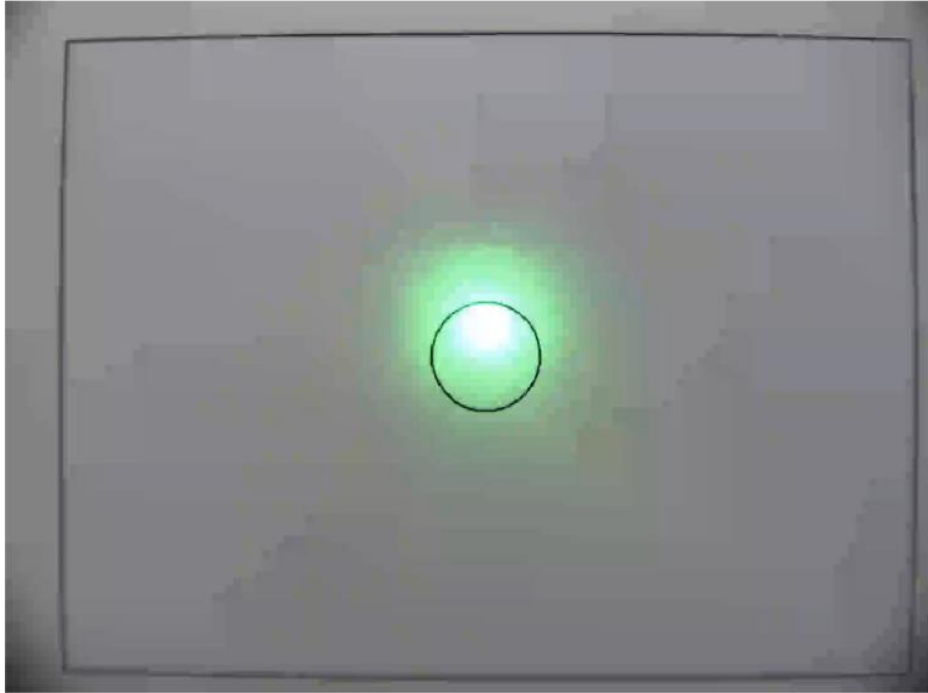
programından kayıt edilmiştir. Kameranın sağlayabileceği en yüksek çözünürlük olan “2080 x 1552” piksel çözünürlüğünde kayıtlar alınmıştır.

Ölçüm sisteminin düzeneği Şekil 3.4’te gösterildiği gibi kurulduktan sonra kayıt alma işlemi sarsma tablasına hareket komutu verildiği anda başlamıştır.

3.2.2 Yeşil renkli bölgelerinin tespiti ve filtreleme

Sayısal görüntüler piksel olarak adlandırılan küçük görüntü birimlerinden oluşmaktadır. Renkli görüntülerde her bir piksel kendi içerisinde renk bilgisini barındırır. Bir rengi oluşturmak için üç veya dört renk kullanılmaktadır. Genelde bu renkler yeşil, kırmızı ve mavi olarak bilinmektedir. Bu renklerin belirli oranlardaki karışımıyla diğer renkler elde edilir ve renkli görüntüler oluşturulur.

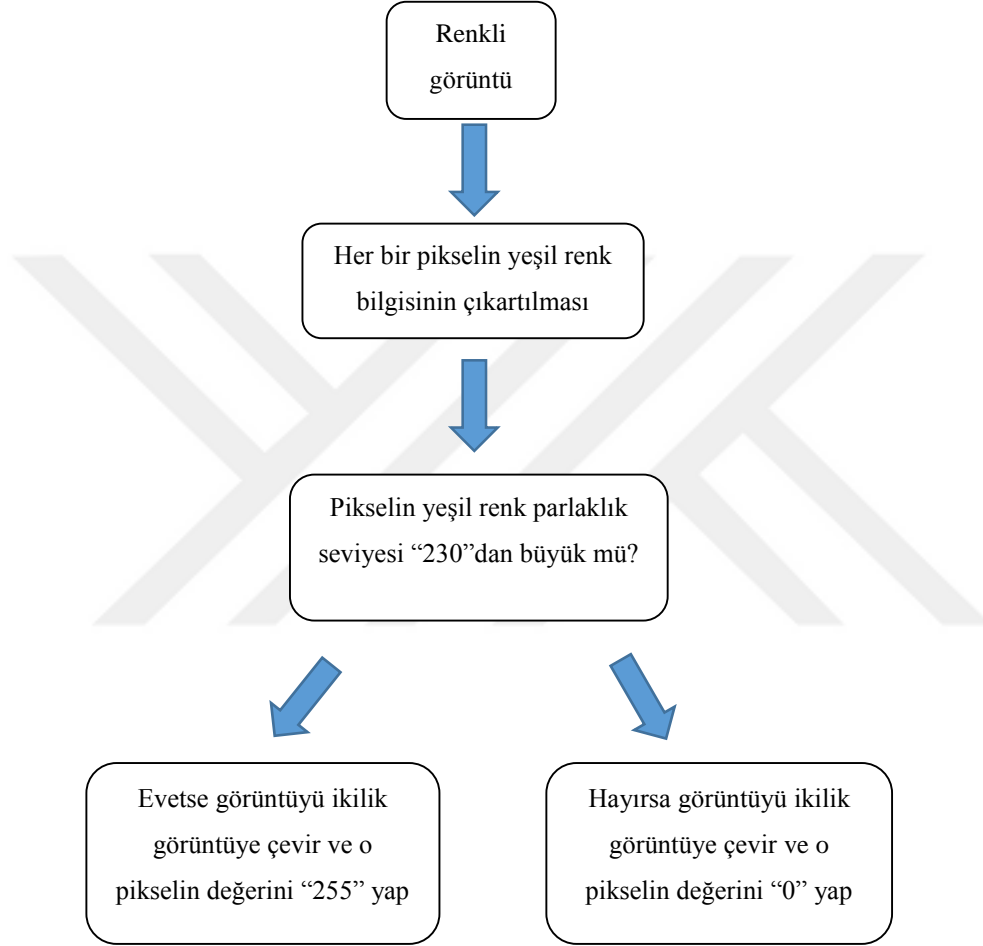
Yazılımın birinci aşaması sonucunda ortaya çıkan çerçevelerden sürecin devamı için lazer ışığının düştüğü renkli bölge tespit edilmiştir. Yani başka bir deyişle renk ayrımı yapılmıştır. Platform üzerine düşen yeşil ışık parlaklığı Resim 3.8’de görülmektedir.



Resim 3.8 : Renkli görüntü.

İlerleyen işlemler bu bölgenin tespiti ve bu bölgenin görüntüdeki diğer bölgelerden ayrımı üzerinden yapılmaktadır. Bu ayrım için bölgeler arasındaki piksellerin renk içeriği farklılığı bilgisinden yararlanılmıştır. Çalışmada yeşil renkli lazer ışını

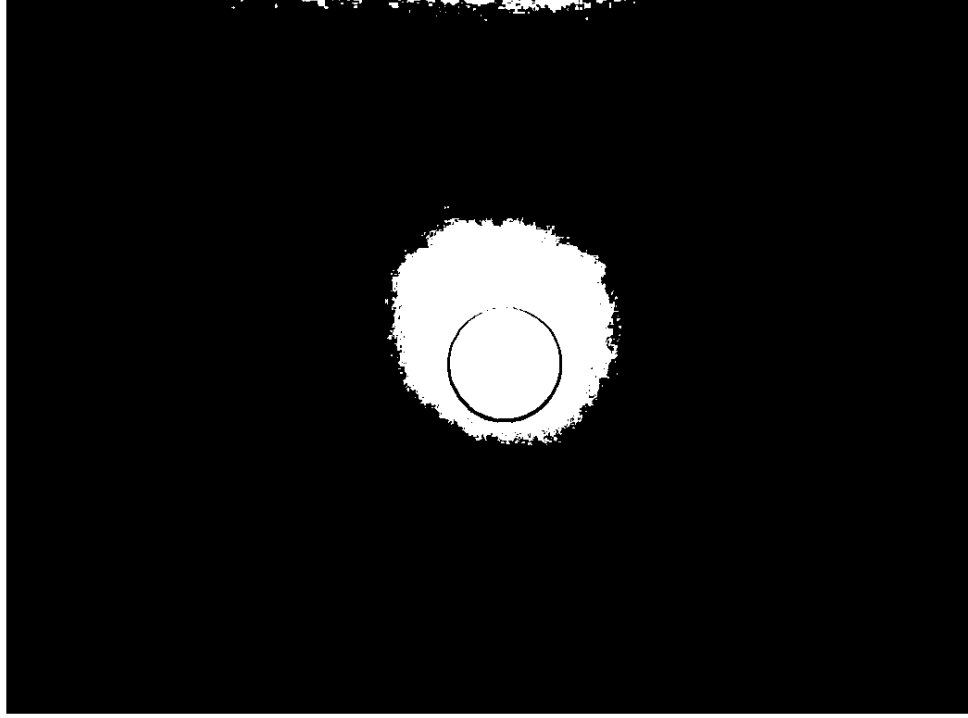
kullanıldığından platform üzerine düşen yeşil rengin yoğun olduğu pikseller bulunmuştur. Bu bölgeler için yüksek bir eşik değeri belirlenip, bu bölgelerin diğer bölgelerden ayırımına gidilmiştir. Ayırım sonucunda eşik değerinin altında kalan piksellerin değeri “0” yani siyah, eşik değerinin üstünden kalan piksellerin değeri “1” yani beyaz olacak şekilde ikilik görüntülere çevrilmiştir. Yapılan işlemler aşağıdaki Şekil 3.8’deki akış diyagramında anlatılmıştır.



Şekil 3.8 : Görüntü eşik değeri ayırımı akış şeması.

Akış şemasına göre, her bir çerçevedeki renkli görüntüler içerisindeki her bir pikselin yeşil rengin parlaklık değeri “0” ile “255” arasında değerler olacak şekilde bulunur. Bulunun parlaklık değerlerinin 230’dan büyük olması durumunda o pikselin yeni parlaklık değeri “255” olarak belirlenir. Eğer pikselin parlaklık değeri 230’dan küçük ise pikselin yeni değeri “0” olarak atanır. Böylece oluşan görüntü artık “0” ve “255” parlaklık değerlerini barındıran yani siyah-beyaz görüntü olarak gözlemlenir. Buradaki parlaklık eşik değerinin “230” olması, birden çok deneme yapılarak belirlenmiştir. Eğer parlaklık eşik değeri 230’un çok altında olursa çerçevelerdeki yeşil

lazer bölgesinin alanı değişmekte olup, yazılımın performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Benzer şekilde 230 değerinin çok altında olması da yazılımın performansını olumsuz yönde etkilediği birden çok deneme yapılarak görölmüştür. Resim 3.9’da tüm piksellerin eşik değeri “230”a göre “0” ve “255” olarak yeni değerlerinin atanması sonucu oluşan görüntü görölmektedir.



Resim 3.9 : Eşik değeri uygulandıktan sonra oluşan görüntü.

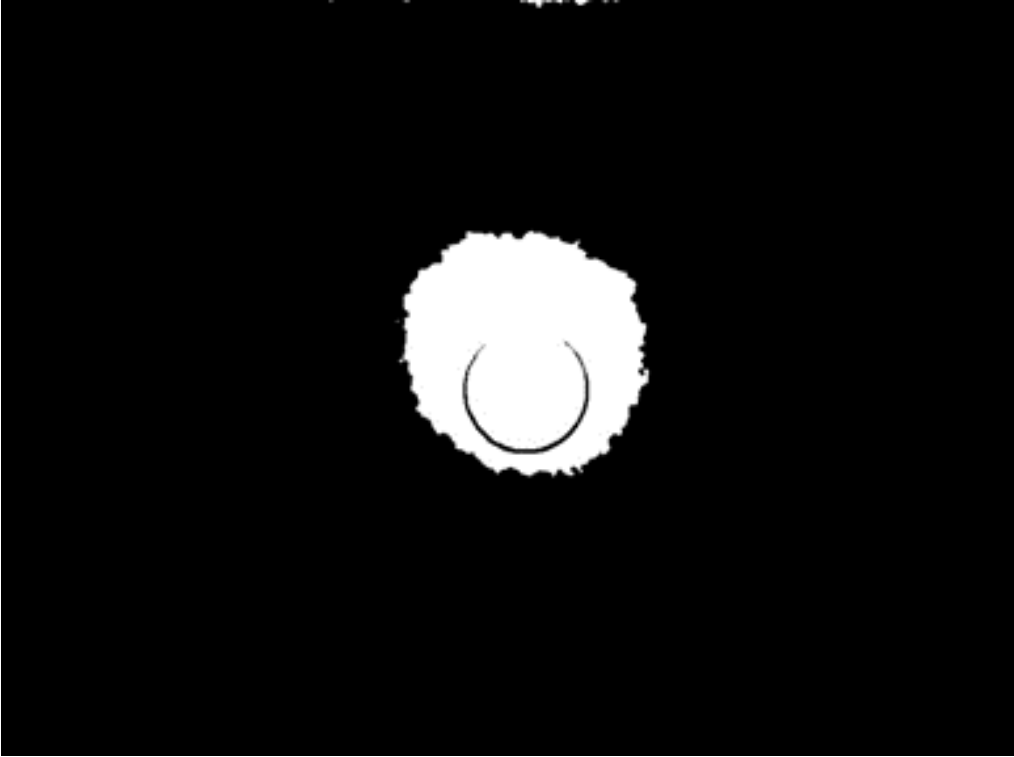
İkilik formata çevrilen görüntülerde zaman zaman tuz-biber gürültüne benzer bileşenlere rastlanılmaktadır. Tuz-biber gürültüsü, görüntüler üzerindeki küçük boyutlarda siyah veya beyaz nokta şekilleridir. Oluşan bu gürültülerin filtrelenip, görüntünün tek bir bütün halinde olması sistemin başarımlı performansını artırmaktadır. Bu yüzden bu aşamada görüntülere filtreleme işlemlerine başvurulmuştur. Filtreleme işleme için 2 boyutlu “ortanca filtre” (medyan filtre) metodu seçilmiştir.

3.2.2.1 Ortanca Filtre

Ortanca filtre, görüntü işlemede filtreleme için kullanılan en temel yöntemlerden birisidir. Belirli tipteki rastgele gürültüler için mükemmel bir gürültü azaltma imkanı sunmakla birlikte, görüntüler üzerinde benzer boyuttaki filtrelere göre fark edilir derecede daha az bulanıklığa yol açtıklarından dolayı oldukça kullanışlıdır. Görüntülerdeki bir noktaya medyan filtreleme işlemi yapmak için öncelikle seçilen

şablon içerisindeki piksellerin parlaklık değerleri küçükten büyüğe doğru sıraya dizilir. Sonra bu sıralamadaki “ortanca değer” bulunur ve bu değer filtrelenmiş görüntüde karşılık gelen merkezdeki piksele atanır.

Örneğin, 3 x 3'lük bir komşuluk bölgesindeki pikseller sırasıyla “10, 20, 20, 15, 100, 20, 25, 15, 20” değerlerine sahip olsun. Bu görüntüye ortanca filtre uygulandığından önce bu değerler küçükten büyüğe doğru sıralanır. Yeni görüntü sırasıyla “10, 15, 15, 20, 20, 20, 20, 25, 100” şeklinde oluşur. Daha sonra oluşan görüntünün ortanca değeri “20” olarak bulunur ve o koordinat değerine “20” parlaklık değeri atanır.



Resim 3.10 : Ortanca filtre uygulanmış görüntü sonucu.

Resim 3.9'da oluşan ve tuz-biber gürültüsü içeren siyah beyaz görüntü, ortanca filtreden geçirilerek aşağıdaki Resim 3.10'daki halini almaktadır. Böylece görüntülerdeki tuz-biber etkisi ortadan kaldırılmış olur.

3.2.3 Görüntü parlaklık ağırlık merkezinin hesaplanması

Bu bölümde iki bölüm önce belirlenen lazer ışığının düştüğü yeşil bölgenin ikilik görüntü olarak elde edilmesinden sonra bu görüntünün ağırlık merkezinin nasıl hesaplandığı anlatılmaktadır.

Çalışmada kullanılan videolar, sarsma tablasından uygulanan hareket profillerinin zamana bağlı değişimini içerdiğinden, aynı şekilde videolardan elde edilen kareler de zamana bağlı olarak değişen hareket profillerini içermelidir. Dolayısıyla lazer ışığının düştüğü her bir görüntü karesi tek bir piksel ile ifade edilebildiğinde, bu ifadenin zamana bağlı değişiminden uygulanan sarsma tablasının basamak hareketi profili çıkartılabilmektedir. Bu işlem için her bir görüntü arası lazer işaretçisinin hareketinin takip edilmesi gerekir.

Görüntülerin bir piksel ile temsil edilmesi için iki bölüm önce elde edilen yeşil renkli bölgelerin ikilik görüntüleri üzerindeki parlaklıkların ağırlık merkezinin (center of gravity in images) hesaplanmasından yararlanılmıştır.

3.2.3.1 Parlaklık Ağırlık Merkezi:

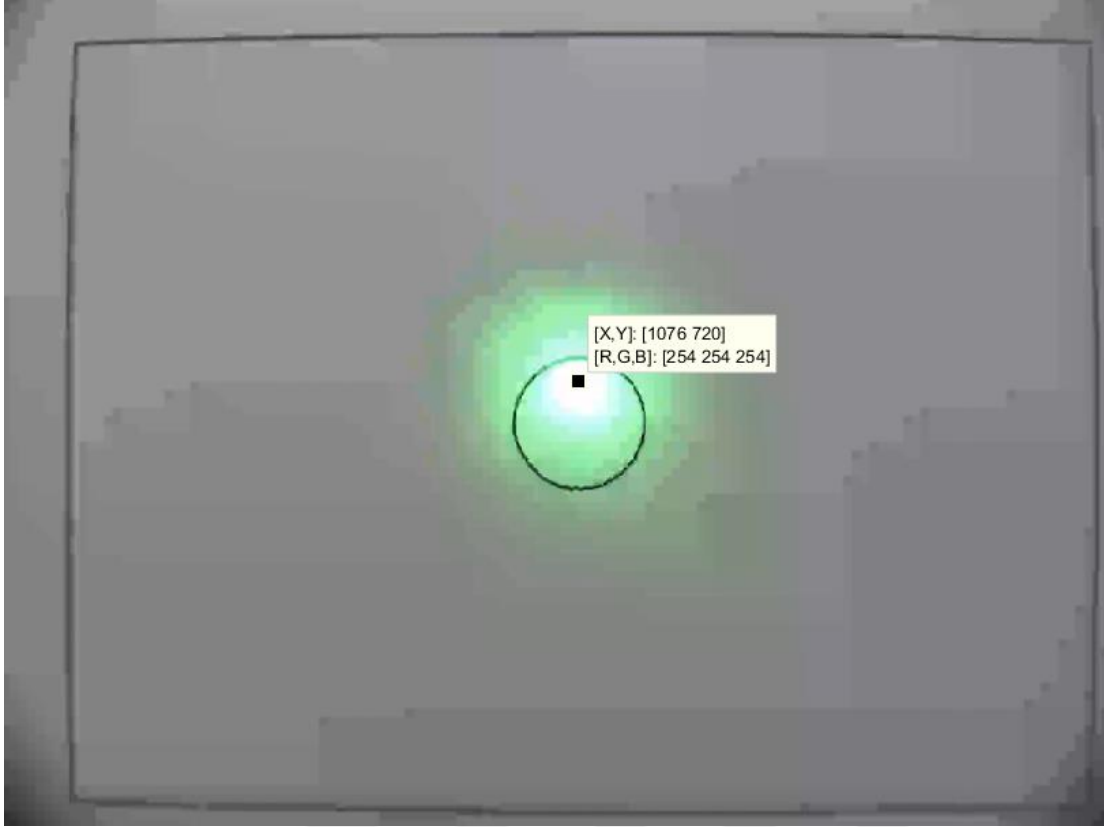
Bir görüntünün yatay ve düşey eksenleri için parlaklığına göre ağırlık merkezi koordinatları aşağıdaki formüllere göre bulunur:

$$\bar{x}_1 = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q j x A(i,j)}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A(i,j)} \quad (3.5)$$

$$\bar{y}_1 = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q j y A(i,j)}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A(i,j)} \quad (3.6)$$

Formüllerdeki p ve q ifadeleri görüntünün çözünürlüğünü yani satır ve sütunlardaki piksellerin sayısını göstermektedir. Çalışmada kullanılan kameranın çözünürlüğü “2080 x 1552” olduğu için $p = 2080$ ve $q = 1552$ değerlerini almıştır. Formülde $A(i,j)$ ifadesi ise görüntüdeki tanımlanan piksellerdeki parlaklık değerlerini ifade etmektedir. Ayrıca \bar{x}_1 ve \bar{y}_1 değeri ise videodaki ilk karenin yatay ve düşey eksendeki parlaklık merkezi koordinatlarıdır. Videoyu oluşturan tüm karelere aynı işlem uygulanmıştır.

Aşağıdaki Resim 3.11’de video kaydından alınan tek bir görüntü için hesaplanmış parlaklık ağırlık merkezi noktası gösterilmiştir.

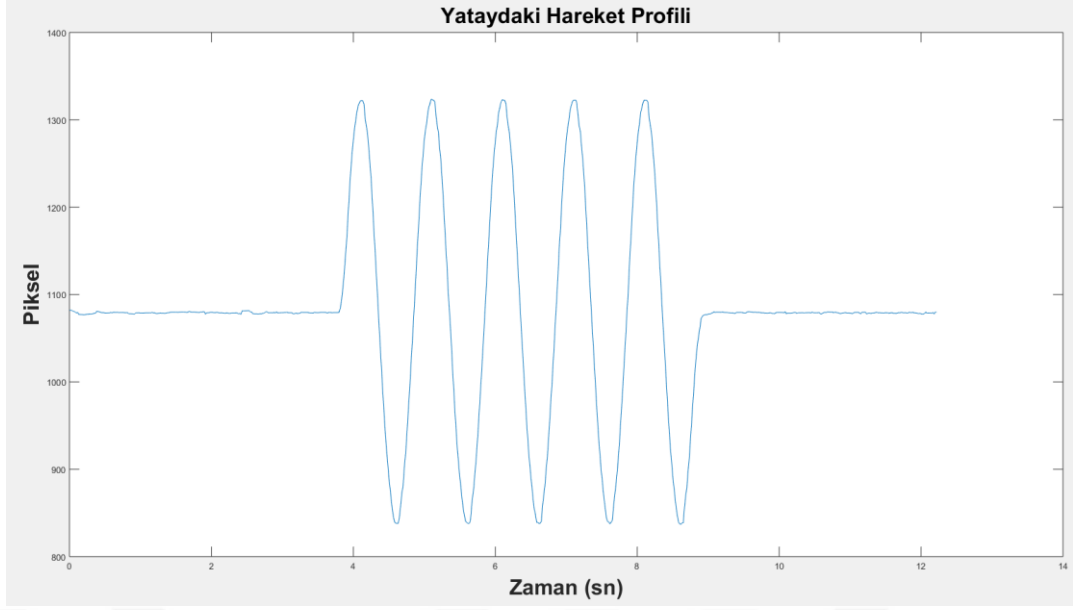


Resim 3.11 : Parlaklık ağırlık merkezi yatay “1076” ve düşeyde “720” olarak hesaplanmış görüntü.

3.2.4 Düşey ve yatay eksenlerde yer değiştirme profillerinin çıkartılması

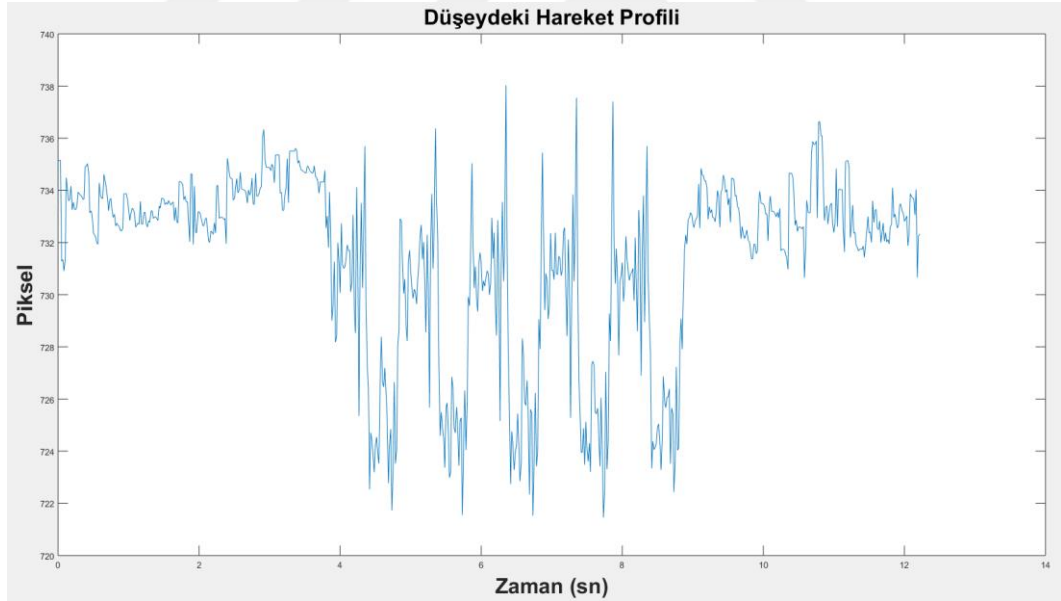
Tezde önerilen görüntü işleme yöntemindeki bir önceki aşamada her bir karedeki lazer ışığının oluşturduğu yeşil renkli bölümlerin yatay ve düşey düzlemle parlaklık merkezleri bulunmuştur. Bu aşamada ise hareket profili içeren kayıtlı videolardaki tüm karelerin parlaklık merkezi bulunarak sarsma tablasının içerdiği hareket profili çıkarılmıştır.

Videoyu oluşturan her bir çerçeveden elde edilen yataydaki ve dikeydeki tüm \bar{x} ve tüm \bar{y} değerleri birer matrise yerleştirilmiş ve bu değerlere karşılık gelen zaman değerleri de diğer bir matrise yerleştirilmiştir. Daha sonra bu \bar{x} ve \bar{y} değerleri Matlab yazılımında çizdirilerek videoların hareket profili çıkartılmıştır. Çıkartılan hareket profilinin yatay eksenine videonun kayıt süresi uzunluğu olup, düşey eksenler ise lazer işaretçinin x ve y eksenindeki hareket değişimlerini piksel cinsinden vermektedir. Aşağıdaki Şekil 3.9’da bir videonun parlaklık değerlerinin çıkartılması sonucunda video süresi boyunca yatay eksene karşılık lazer işareti ağırlık merkezi değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : Lazer işaretinin yatay eksenindeki yer değişimi profili.

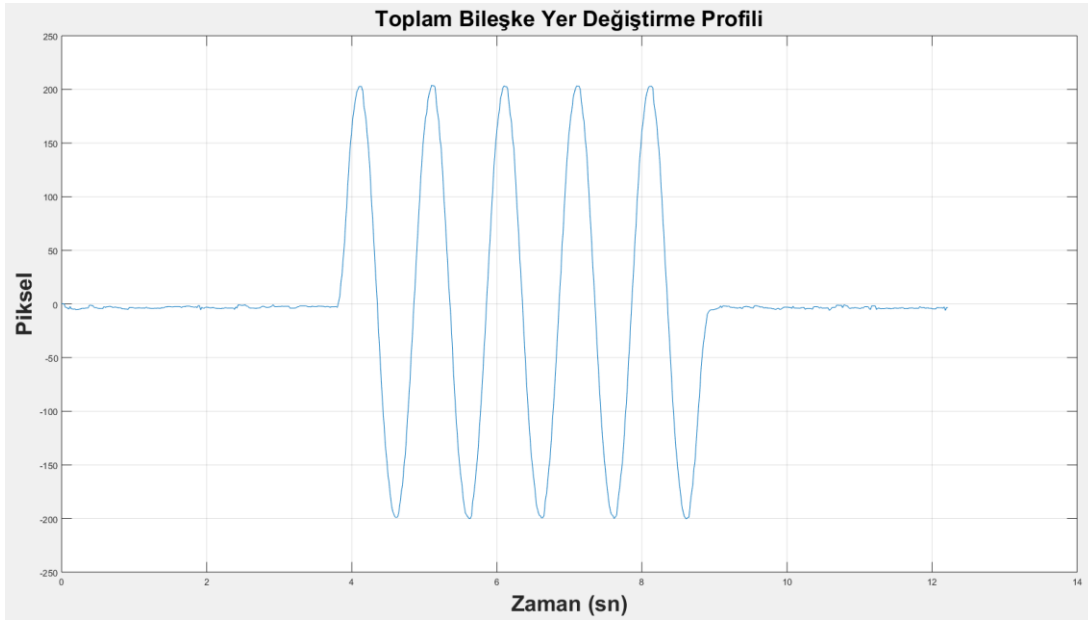
Aşağıdaki Şekil 3.10’da ise aynı videonun düşey eksenindeki parlaklık değerlerinin çıkartılması sonucunda oluşan lazer işaretinin hareketi gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : Lazer işaretinin düşey eksenindeki yer değişimi profili.

Şekil 3.9’da oluşan grafik lazer izdüşümünün yatay eksenindeki (yani hareket eksenindeki) takibin çıktısı olduğu için düşey eksenindeki hareket takibine grafiğe göre çok daha gürültüsüz oluşmaktadır. Şekil 3.10’da ise lazer işaretinin düşey eksenindeki (aslında hareketin oldukça düşük olması beklenen eksen) yer değiştirmesi görülmektedir. Bu grafik Şekil 3.9’a göre oldukça gürültülü olup tepe genlik değerleri

ise oldukça düşük seviyededir. Lazer işaretinin toplam yer deęiřtirmesi aslında bu yatay ve dūřey eksendeki toplam hareketin bileřkesidir. Bu yūzden daha doęru sonuç elde edebilmek için Őekil 3.10’da gōsterilen dūřey eksendeki kūek hareketlerin etkisinin yatay eksendeki hareketlerle birleřtirilmeli ve toplam bileřke yer deęiřimi profili çıkartılmalıdır. Bu iřlem aslında Pisagor formūlünden ibarettir. Videodaki her bir zaman aralıęındaki \bar{x} ve \bar{y} deęerlerinin karesinin toplamının karekōkū aslında o videonun bileřke yer deęiřtirme profilini oluřturmaktadır. Őekil 3.11’de toplam bileřke yer deęiřtirme profili hesaplanmıř videonun grafięi gōrūlmektedir.



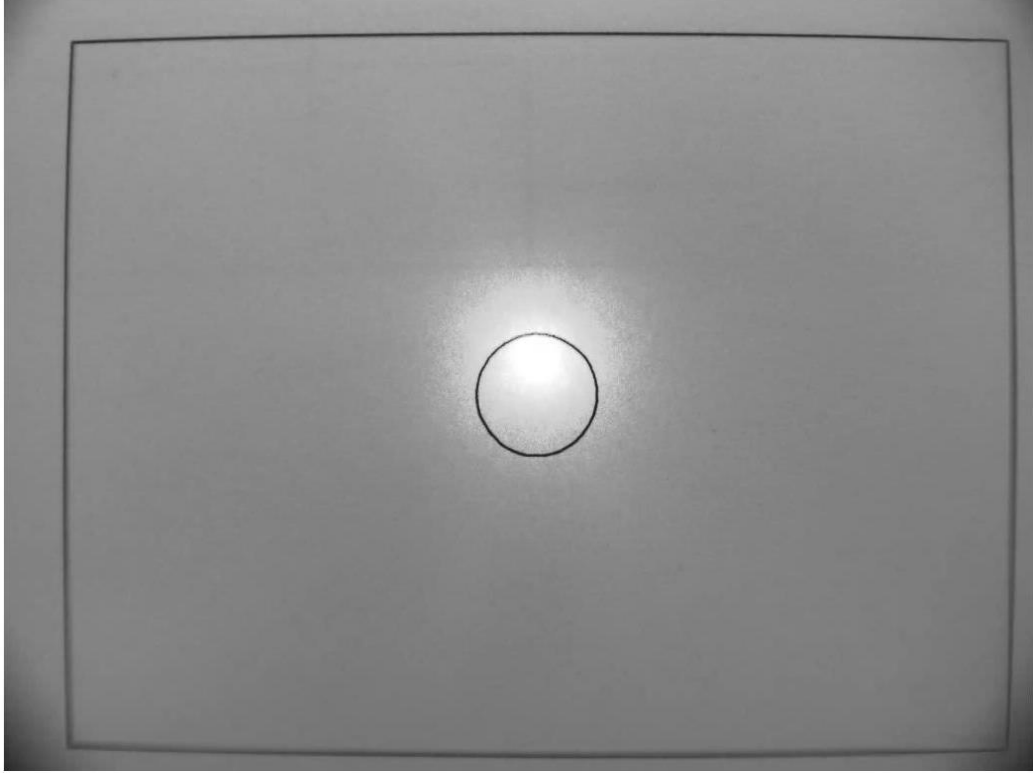
Şekil 3.11 : Lazer işaretinin bileşke yer değişimi profili.

3.2.5 Piksel-Mesafe Dōnūřim Parametresinin ıkarımı

Őu ana kadarki yapılan iřlemlerde, gōrūntūdeki aęırlık merkezlerinin hareket profili deęiřimi olarak hep piksel bilgisi kullanılmıřtır. Tezdeki amaç sarsma tablasından uygulanan yer deęiřiminin çıkartılması olduęu için geliřtirilen yazılımın çıktısı piksel yerine milimetre gibi mesafe parametresi olmalıdır. Bu yūzden piksel bilgisi bir dōnūřim çarpanı ile çarpılıp mesafe birimine çevrilmelidir. Bu arpan parametresine çalıřmada ‘‘dōnūřim parametresi’’ denmiřtir. Bu bōlūmde dōnūřim parametresinin nasıl hesaplandıęı anlatılmıřtır.

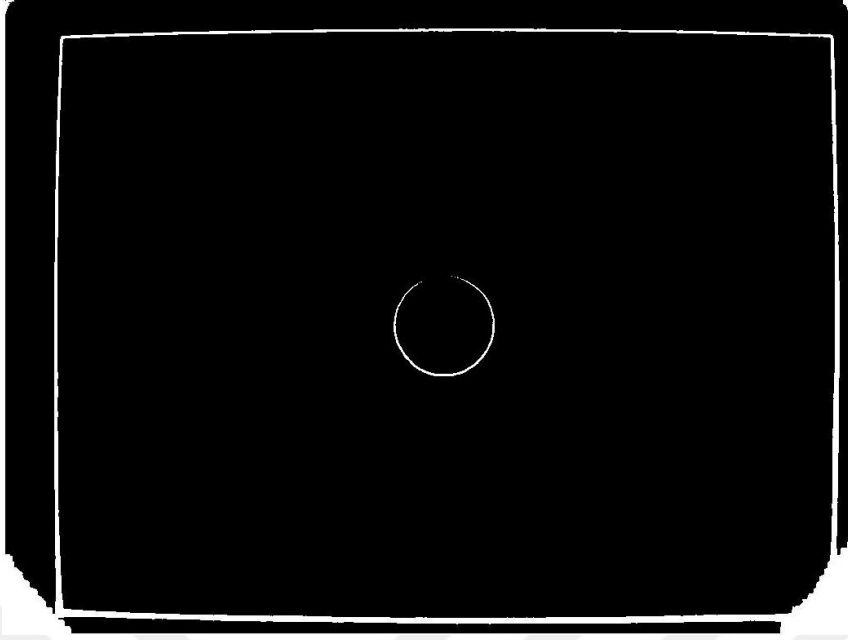
Dōnūřim parametresini hesaplamak için kameranın gōrūntūledięi platform üzerine yapıřtırılan kaęıt Őablon kullanılmıřtır. Kullanılan Őablon kaęıdın merkezi çapı 10 mm

olarak belirlenen bir çember şekli içermektedir. Buradaki amaç video görüntülerindeki bu çemberi çevreleyen sanal bir kare çizdirilmesi ve bu karenin kenar boyutlarının piksel değerinden belirlenmesine dayanmaktadır. Bunun için her bir video karesi gri renk uzayına dönüştürülmüştür. Resim 3.12’de gri renk uzayına dönüştürülmüş bir video çerçevesi görülmektedir.



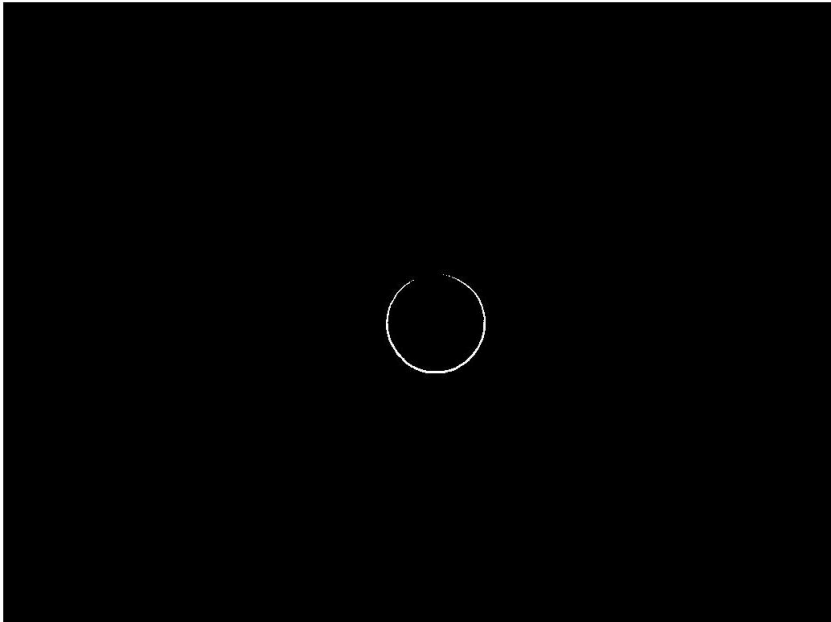
Resim 3.12 : Gri renk uzayına dönüştürülmüş görüntü.

Gri renk uzayına dönüştürülmüş görüntü için parlaklık değeri elemesi yapılmıştır. Parlaklık değeri için 0’dan 255’e kadar olan renk seviyeleri içerisinde “105” seçilmiştir. Parlaklık değeri elemesinden sonra gri renk uzayındaki resimdeki piksellerin yeni parlaklık değeri “0” ve “255” yani siyah ve beyaz olarak yeniden oluşturulmuştur. Resim 3.13’te parlaklık değeri elemesinden sonra oluşan siyah ve beyaz görüntü görülmektedir.



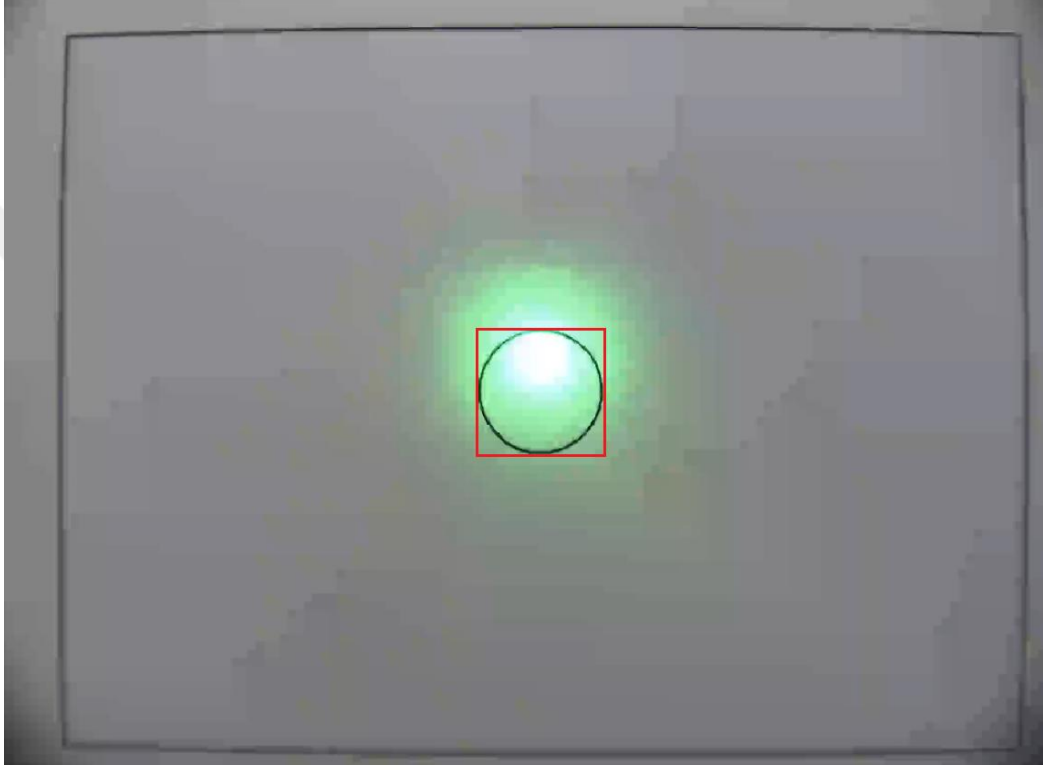
Resim 3.13 : Parlaklık değeri elemesinden sonrası oluşan siyah ve beyaz görüntü.

Parlaklık değeri elemesinden sonra oluşan siyah-beyaz görüntüdeki çemberin ortaya çıkartılması için bir kez daha filtreleme işlemi yapılmalıdır. Matlab’da bu filtreleme işlemi için “imclearborder” komutu kullanılmıştır. “imclearborder” komutu görüntüdeki sınırlara dokunan bileşenleri yok eder, yani bu piksellerin değerlerini “0” yaparak siyah renge çevirir. Resim 3.14’te “imclearborder()” fonksiyonuyla filtrelenmiş siyah beyaz görüntü görülmektedir.



Resim 3.14 : Filtrelenmiş siyah beyaz görüntü.

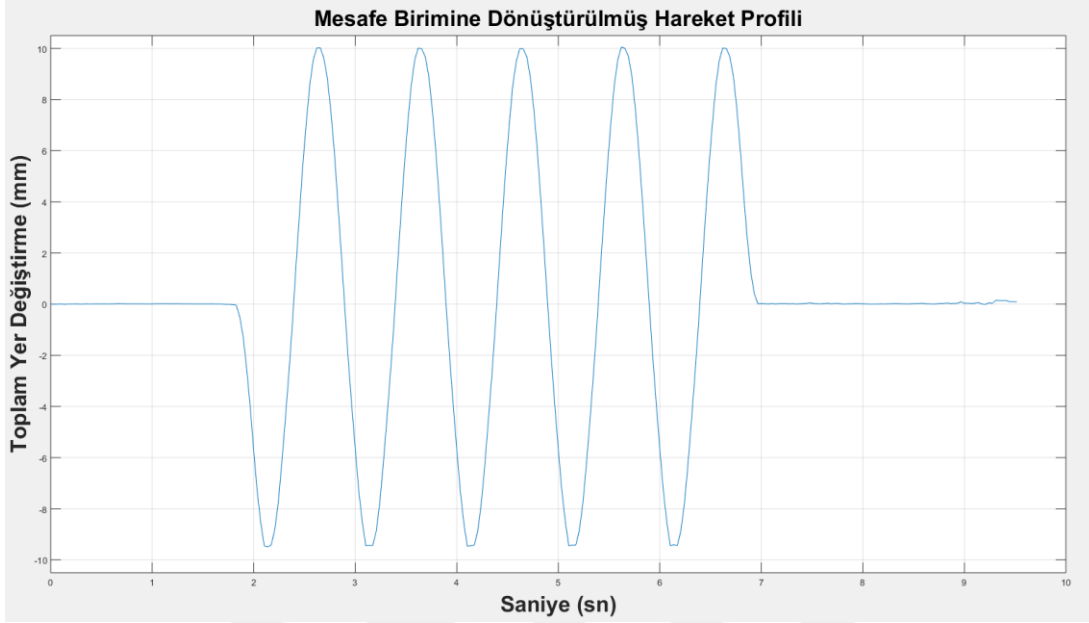
Resim 3.14'te görülen bu son görüntüyle artık şablon için kullanılan çemberin silueti ortaya çıkarılmaya hazırdır. Bu işlem içinde Matlab'daki “regionprops()” komutu kullanılmıştır. “regionprops()” komutu görüntüde tanımlanan bölgelerin bulunmasını sağlar. Burada da “regionprops()” komutuyla görüntüdeki çemberimsi şekiller aratılmış ve siluet bulunmuştur. Bu aşamadan sonra çember silüetinin tam dışından geçecek dörtgen ile sınır bölgeleri tespit edilmiştir. Aşağıdaki Resim 3.15'te kağıt üzerinde sınırları belirlenen ve dörtgen ile çevrelenen çember şablonu görülmektedir.



Resim 3.15 : Görüntüde tespit edilen çember bölgesi.

İdeal durumda görüntüde oluşacak dörtgen “kare” olmalıdır. Sonraki işlem olarak dörtgenin dört köşesinin koordinatları bulunup, koordinatların birbirinden çıkarılmasıyla her bir kenarın kaç piksele denk geldiği hesaplanmıştır. Bu değer aslında kağıda çizilen çemberin çapının piksel olarak karşılığıdır. Artık çapı 10 mm olarak çizilen çemberin çapının piksel karşılığı da bilinmektedir. Çemberin çap değerinin hesaplanan piksel değerine bölünmesiyle her bir görüntü için birimi “mm/piksel” olan ve piksel ifadesinden mm ifadesine geçişi sağlayan dönüşüm parametresi bulunmuş olur. Videodaki tüm görüntüler için aynı işlem yapılır. Dönüşüm parametresiyle Bölüm 3.2.4'ten elde edilen sonuçlar çarpılarak videolardaki lazer işaretçinin hareketi mm cinsinden yer değiştirme profiline çevrilmiş olur.

Aşağıdaki Şekil 3.12’de dönüşüm parametresiyle çarpılmış ve mesafeye dönüştürülmüş video kaydı görülmektedir.



Şekil 3.12 : Dönüşüm parametresiyle çarpılarak mm cinsinden oluşturulmuş yer değışirme profili.

3.3 Sarsma Tablası İle Yazılımın Karşılaştırılması

Bu bölümde kayıtlı videolardan sarsma tablasından uygulanan hareket profilleri elde edildikten sonra, bu iki profillerin birbiriyle karşılaştırılması anlatılmıştır. Karşılaştırmalarda referans hareket profili olarak sarsma tablasından alınan hareket profili kayıtları kullanılmıştır. Çünkü sarsma tablasındaki elektro-servo motor içerisindeki dahili enkoder ile çok hassas hareketler ölçülüp, pozisyon kontrolü yapılabilmektedir. Sarsma tablasından alınan kayıtlar sarsma tablasının hareket halindeyken ve durur vaziyetteyken, yaklaşık 20 milisaniyelik zaman aralıklarıyla alınan ve tablanın mevcut olduğu pozisyonlarını içermektedir. Bu veriler görüntü işleme yazılımının son basamağındaki kayıtlı videolardan çıkartılan hareket profilleriyle karşılaştırılarak, uygulanan hareket profiline göre farklı karşılaştırma yöntemleriyle incelenmiştir. Sarsma tablasından uygulanan her bir hareket profili için video sonuçları ayrı ayrı karşılaştırılmış ve her bir düzenek için detaylı karşılaştırma tabloları oluşturulmuştur. Karşılaştırmalar uygulanan hareket sinyalinin dinamik ve statik hareket profili olmasına bağlı olarak iki ayrı başlıkta birbirinden farklı karşılaştırma yöntemleriyle incelenmiştir.

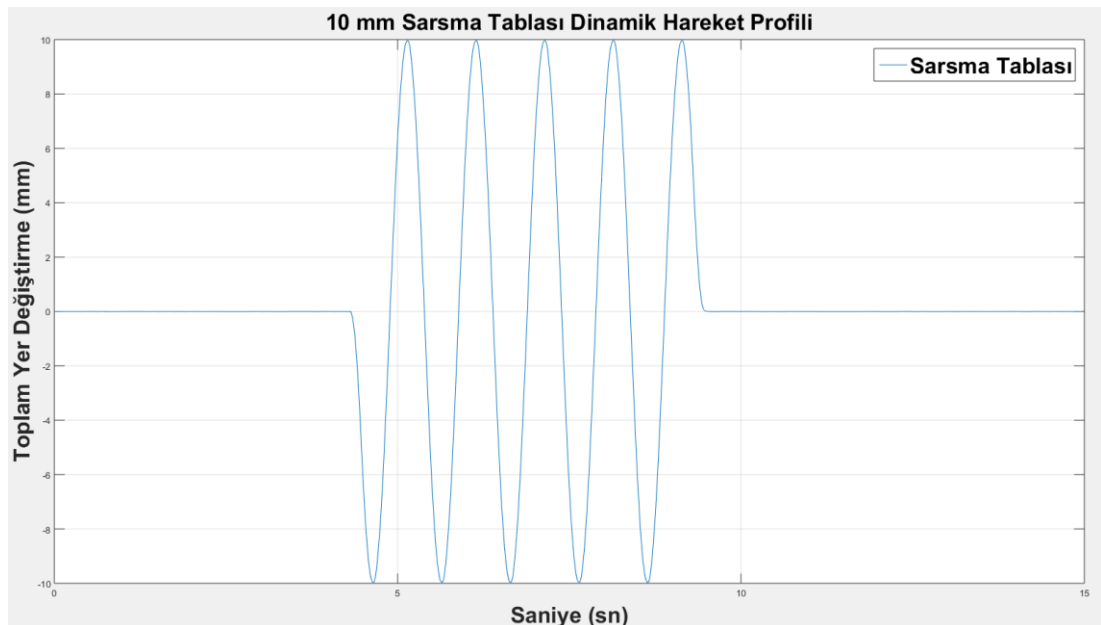
3.3.1 Dinamik hareket profillerinin karşılaştırılması

Bu bölümde çalışmada sarsma tablasından uygulanan dinamik hareket profilleri için karşılaştırmanın nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Önceki kısımlarda da bahsedildiği gibi, dinamik hareket profilleri, önerilen görüntü işleme yazılımının dinamik yer değişimi hareketlerine yani zamanla yer değişimi daha hızlı olan hareket profillerine karşı olan performansını incelemek için uygulanmıştır.

Dinamik hareket profili testleri esnasında bir yandan sarsma tablasıyla kamera platformuna veya lazer işaretçiye dinamik hareket profilleri uygulanırken, bir yandan da sarsma tablasının mevcut pozisyonunu içeren enkoder verilerinin kayıtları alınmıştır. Dinamik hareket profili karşılaştırmaları, sarsma tablasından alınan bu kayıtlar ile görüntü işleme yazılımının çıktısı olarak elde edilen hareket profilleriyle yapılmıştır.

Tez çalışmasında sunulan görüntü işleme yazılımı sistemin dinamik performansını incelemek için, sarsma tablasından sabit frekansta 0,1 mm'den 10 mm'ye kadar değişken genlikte dinamik hareket profilleri uygulanmıştır. Bu dinamik hareket profilleri beş periyottan oluşan sinüzoidal hareket sinyali içermektedir.

Aşağıdaki şekilde sarsma tablasından uygulanan 1 Hz'de 10 mm tepe genliğinde uygulanan sinüzoidal hareket profili görülmektedir.



Şekil 3.13 : “1 Hz 10 mm” tepe genlikli hareket profili.

Dinamik hareket profillerini karşılaştırılması için hem sarsma tablası kayıtlarına hem de görüntü işleme yazılımı çıktılarında bazı “sonradan işleme” (post-process) işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemler sonucunda sarsma tablası hareket profili ile görüntü işleme çıktısı sonuçları arasındaki hareket profillerinin benzerliğinin ölçütü olarak “çapraz ilinti”ye bakılmış, “normalize çapraz ilinti” değeri hesaplanmıştır. Aşağıda ilinti, çapraz ilinti ve normalize çapraz ilinti kavramlarından bahsedilmiştir.

3.3.1.1 İlinti (Korelasyon):

İlinti, sayısal sinyal işleme alanında evrişim (konvolüsyon) işlemi ile birlikte en çok kullanılan sinyal işleme fonksiyonlarından biridir. Korelasyon, iki bağımsız değişken sinyal arasındaki doğrusal ilişkinin yönünü ve gücünü belirtir. Birbirinden bağımsız iki sinyal arasındaki benzerlik ilinti yani korelasyon işlemi yoluyla bulunabilir. Örneğin rastgele gürültü bileşenleri içeren bir sinyal içerisinde, zayıf bir sinyalin olup olmadığını elde etmekte isteniyorsa gürültülü sinyal içerisinde, zayıf sinyalin benzerliğine çapraz ilinti işlemi ile bakılarak bir sonuç elde edilebilir.

Korelasyon işlemi, çapraz ilinti (çapraz korelasyon) ve öz ilinti (otokorelasyon) olmak üzere iki ana korelasyon çeşidine ayrılır. Genellikle sinyal işleme uygulamaların da sinyaller arası benzerlik aranıyorsa bu iki ana işlemten birisi kullanılarak sonuca gidilir.

3.3.1.2 Çapraz İlinti (Çapraz korelasyon):

Rastgele değişken iki sayısal sinyal arasındaki istatistiksel benzerliğin ölçüsü işlemine çapraz ilinti işlemi denir. Çapraz ilinti işlemi formülü ve yapısı yönüyle evrişime çok benzerlik gösterir.

Sonlu enerjili iki gerçel $x[n]$ ve $y[n]$ sinyal dizisinin çapraz ilintisi $r_{xy}[l]$ dizisi ile gösterilir ve

$$r_{xy}[l] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]y[n-l] \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.7)$$

Şeklinde tanımlanır. Ya da buna denk olacak şekilde;

$$r_{xy}[l] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n+l]y[n] \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.8)$$

Bulunur. l indisi (zamanda) kaymayı veya gecikmeyi göstermektedir. $r_{xy}[l]$ 'deki alt indis xy de çapraz ilintisi hesaplanan dizileri gösterir. Alt dizindeki x ve y 'nin sırası, bir dizinin diğerine göre kayma yönünü gösterir. Ayrıntılandırmak gerekirse, 3.7'de $x[n]$ kaymadan bırakılır ve $y[n]$ zamanda l birim kaydırılır. Kayma, l pozitif olduğunda sola, negatif olduğunda sağa doğrudur. Benzer şekilde, 3.8'de, $y[n]$ kaymamıştır ve $x[n]$ zamanda l birim kadar pozitif değerli l için sola, negatif değerli l için sağa kaymıştır. Fakat $x[n]$ 'yi $y[n]$ 'ye göre l birim kadar sola kaydırmak, $y[n]$ 'yi $x[n]$ 'ye göre l birim kadar sağa kaydırmak ile aynı şeydir. Böylece, ilk ve ikinci formül numaraları verilecek, hesaplamalar özdeş çapraz ilinti dizileriyle sonuçlanır.

İki dizinin çapraz ilintisinin ve konvolüsyonunun (evrişiminin) hesaplanmasındaki benzerlikle oldukça açıktır. Konvolüsyon hesaplanmasında, dizilerden biri katlanır, kaydırılır ve sonra diğer dizinin elemanlarıyla çarpılır. Çarpımın elemanları, sonucun kayma miktarına eşit andaki değerinin hesaplanması için toplanır. Katlama işlemi hariç, çapraz ilinti hesabı da aynı işlemleri içerir; dizinin birini kaydırma, diğer dizi ile çarpma ve çarpımın elemanlarını toplama şeklindedir. Şekil 3.14'te konvolüsyon, çapraz ilinti ve öz ilinti işlemlerinin benzerliği verilmiştir.

3.3.1.3 Öz İlinti (Otokorelasyon):

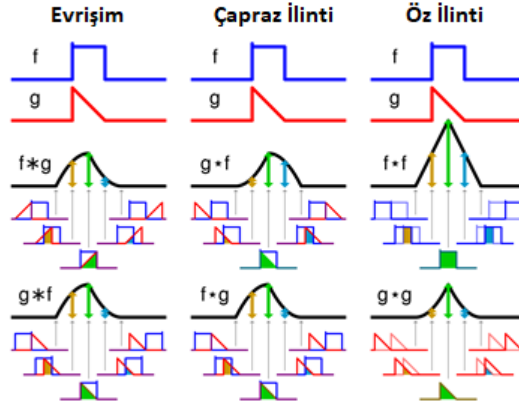
Öz ilinti işlemi ise çapraz ilintinin benzeri olup tek fark başka bir değişken yerine sinyalin kendi kendisiyle olan benzerliğini verir. Yani aslında öz ilinti, çapraz ilinti formülü olan Formül 3.7'nin, $x[n] = y[n]$ olduğu özel bir durumdur. Bu durumda $x[n]$ sinyalinin öz ilinti yani öz ilinti fonksiyonu elde edilir ve

$$r_{xx}[l] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]x[n-l] \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.9)$$

olarak tanımlanır. Ya da bu formüle denk olacak şekilde

$$r_{xx}[l] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n+l]x[n] \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.10)$$

tanımlanır. Şekil 3.14'te “ f ” ile ifade edilen kare dalga sinyaline “ g ” ile ifade edilen üçgen dalga sinyali sırasıyla evrişim, çapraz ilinti ve öz ilinti işlemlerinin uygulanışı gösterilmektedir.



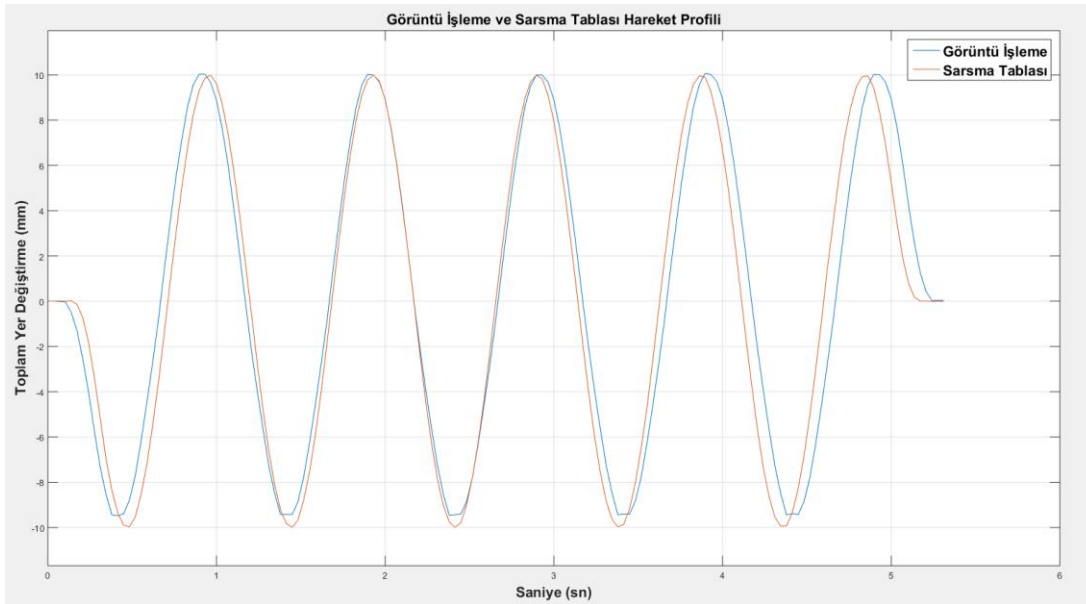
Şekil 3.14 : Evrişim, çapraz ilinti ve öz ilinti işlemleri ilişkisi.

3.3.1.4 Normalize Çapraz İlinti (Korelasyon):

Normalize çapraz ilinti, çapraz ilintisi alınmış iki sinyalin normalize edilmesi işlemidir. Bu işlemdeki amaç aralarındaki fark veya oranın sabit olduğu varsayılan iki sinyalin bu farklılıklarının çapraz ilinti sonucuna etkisini ortadan kaldırmaktır. Normalize çapraz ilinti değeri aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$R_{NCC}[x, y] = \frac{\sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]y[n-l]}{\sqrt{\sum_{n=-\infty}^{\infty} x^2[n] \sum_{n=-\infty}^{\infty} y^2[n-l]}} \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.11)$$

Aşağıdaki Şekil 3.15'te normalize çapraz ilinti değerinin "%96,41" hesaplandığı, 10 mm tepe genliğinde 1 Hz frekansında sarsma tablasının gerçekleştirdiği ve görüntü işleme yazılımının çıktısında oluşan sinüzoidal hareket profili görülmektedir.



Şekil 3.15 : 1 Hz 10 mm tepe genlikli dinamik yer değişimi profilinin çıktıları.

Tez çalışmasında dinamik hareketlerin karşılaştırılması yapılırken, beş periyotluk sinüzoidal hareket profillerinin negatif ve pozitif tepe noktaları, sarsma tablası ve görüntü işleme sisteminin çıktısı için ayrı ayrı bulunup, bu beş maksimum ve minimum nokta da karşılaştırma tablosunda incelenmek üzere kayıt edilmiştir.

Dinamik hareketlerin karşılaştırılmasında yapılan diğer bir inceleme ise hareket profillerinin frekans bölgesindeki grafikleri ve aldığı değerler olmuştur. Bu işlem için uygulanan aynı hareket profilinin sarsma tablası enkoder verilerinin ve görüntü işleme yazılımının çıktılarının Fourier dönüşümü alınmış ve analizler frekans bölgesinde devam etmiştir. Aşağıdaki bölümlerde sinyallerin Fourier Dönüşümü hakkında bilgi verilmiştir.

3.3.1.5 Sinyallerin Fourier Dönüşümü:

Fourier dönüşümü Jean Baptiste Joseph Fourier tarafından 1807 yılında bilim dünyasına sunulan ve sinyal işleme yöntemlerinin en temel tekniği olarak nitelenen bir integral fonksiyonudur. Bugünlerde bu dönüşüm astronomiden tıpa, kimyadan elektroniğe kadar birçok alanda kullanılmaktadır (Bultan, 2009). Bu dönüşüm sayesinde doğadaki sinyallerin gözle görmemizin mümkün olmadığı bileşenleri incelenebilir.

Jean Baptiste Joseph Fourier'e göre evrendeki herhangi bir periyodik sinyal, birbirine dik iki farklı periyodik sinyalin artan frekanslarındaki değerlerin dik toplamı şeklinde ifade edilebilmektedir. Fourier, sunduğu teoreminde bu toplam ifadesini, sinüs ve kosinüs fonksiyonlarını kullanarak göstermiştir. Böylece zaman uzayında tanımlı bir sinyalin Fourier Dönüşümü'nün alınmasıyla, bu sinyalin içerdiği frekans bileşenlerini ve bu bileşenlerinin ağırlıklarının belirlenmesinin önü açılmıştır. Bu ortamda sinyal hakkında incelemeler yapılır ve sinyal bileşenlerinin ağırlıkları gözlemlenir. İstenmeyen frekans bileşenleri için filtreler uygulanabilir ve gerekirse kalan sinyaller tersine Fourier Dönüşümü ile tekrardan zaman ortamına dönüştürülebilir. Bir sinyalin frekans bölgesine geçişi durumunu daha iyi açıklamak için optik biliminde kullanılan prizma örneği verilebilir. Prizma, beyaz ışığı renk bileşenlerine ayırtmada kullanılan bir alettir. Aslında prizma sayesinde beyaz ışık, içerdiği diğer renk bileşenlerine yani frekans spektrumuna ayrılır. Beyaz ışıktan ayrılan her rengin bir frekans ve dalga boyu içeriği vardır. Bu sayede hangi renkten ne kadar olduğu prizma kullanılarak bakılabilir. Bu örnekteki prizmayı, Fourier dönüşümüne benzetebiliriz. Fourier dönüşümü

sayesinde sinyalin genlik, faz ve frekans ağırlıklarına ulaşılabilir. Bu çalışmada da sarsma tablasından uygulanan sinüzoidal hareket sinyal profillerini incelemek için Fourier Dönüşümü kullanılmıştır. Dönüşüm sayesinde uygulanan sinyallerin karşılaştırmalı frekans analizi yapılmıştır. Bu inceleme için sinyaller zaman ortamından (Time Domain), frekansa bağlı bileşenleri içeren frekans ortamına (Frequency Domain) çevrilmiştir.

Zaman ortamında bir sinyalin Fourier Dönüşümü yapılmasıyla ortaya çıkan veriler o sinyalin içerdiği tüm frekans bileşenlerini gösterir. Doğadaki sinyaller sürekli veya kesikli (sayısal) zamanlarda ve periyodik ya da aperiodyk olarak bulunabilirler. Bu ikili özelliklerin çeşitliliğiyle sinyaller dört farklı kategoride incelenebilir;

Sürekli Zamanlı Sinyallerde Fourier Dönüşümü: Bu tip sinyaller eksi sonsuzdan artı sonsuza kadar herhangi bir bileşenin tekrarlanmadığı tipteki sinyallerdir. Bu şekildeki sinyallerde frekans analizi Fourier Dönüşümü alınarak yapılmaktadır. $x(t)$ periyodik olmayan bir sinyali ifade ederken, bu sinyalin Fourier Dönüşümü aşağıdaki şekilde yapılır;

$$X(w) = F[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.12)$$

Bu formülde $X(w)$ ifadesi $x(t)$ sürekli sinyalinin Fourier Dönüşümü olarak gösterilir.

Periyodik Sürekli Zamanlı Sinyaller: Sinüs sinyalleri, kare sinyalleri gibi eksi sonsuzdan artı sonsuza kadar kendini tekrarlayan bölümleri içeren sinyallerdir. Bu tip sinyallerde frekans analizi, sinyallerin Fourier Serisi açılımlarıyla bulunur.

Kesikli Sinyallerde Fourier Dönüşümü: Bu tip sinyaller sürekli zamanlı sinyallerin belirli bir örnekleme frekansında örneklenmiş biçimleridir. Sinyaller kesikli noktalarda tanımlıdır. Bu sinyallerde frekans analizine Kesikli Zaman Fourier Dönüşümüyle (DTFT) ulaşılır. DTFT işlemi aşağıdaki toplam formülüne göre yapılmaktadır;

$$X(e^{j\omega}) = F\{x[n]\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\omega n} \quad (3.13)$$

Formülde w radyan cinsinden açısal frekansı, $F\{x[n]\}$ Fourier Dönüşüm işlemi, $X(w)$ ifadesi $x[n]$ kesikli sinyalinin fourier dönüşümünü gösterir. DTFT işlemi doğası gereği çalışılacak sinyaller üzerinde gerçekleştirilemez bir işlemdir. Bu yüzden periyodik olmayan kesikli zaman sinyallerinin analizinde kesikli fourier dönüşümü (DFT)

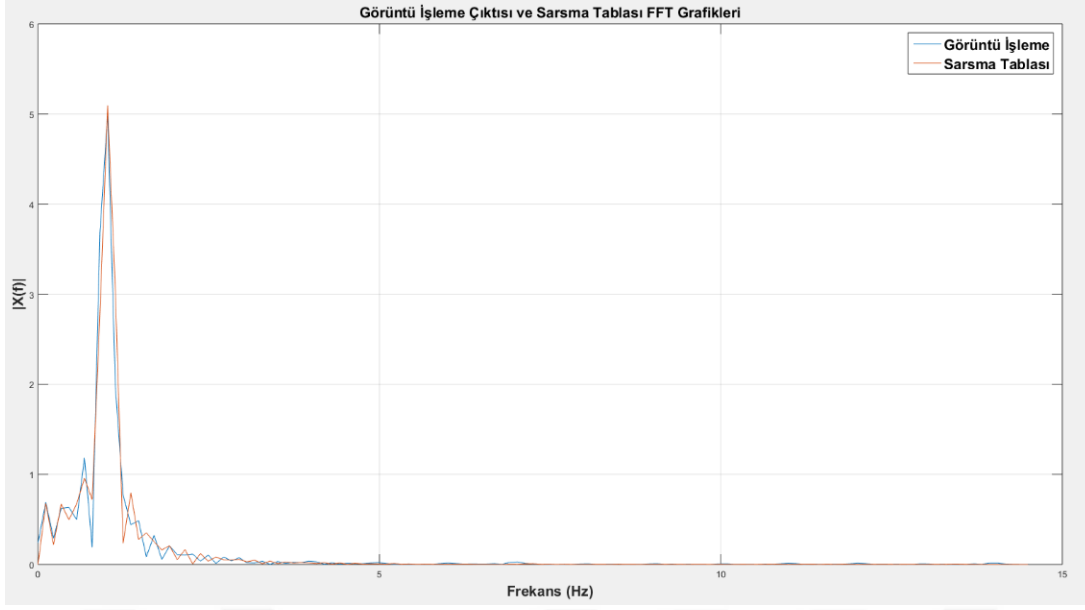
kullanılır. DFT işlemi yapılırken aperiyojik $x[n]$ kesikli sinyalinin bir bölümü alınır ve alınan sinyalin tümünün bu bölümle periyodik olduğu düşünülür. Daha sonra bu bölümün kesikli fourier serisi açılımı yapılır ve bulunan değerler toplanır. Anlatılan bu işlem aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$x[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)} \quad (3.14)$$

Formülde gösterilen k 'lar da n 'ler de ayrı ayrı 0'dan $N-1$ 'e kadar değerler alırlar. Bu da $N \times N$ tane işlem yapılması gerektiğini göstermektedir. DFT işlemi DTFT'si alınan bir sinyalin frekans bölgesinde örneklenmiş hali olarak da ifade edilebilir.

Bu tez kapsamında incelenen hareket profilleri periyodik olmayan kesikli zamanlı sinyaller olduğundan frekans analizi için Matlab yazılımındaki "FFT" (Fast Fourier Transform) komutu kullanılmıştır. FFT yani Hızlı Fourier Dönüşümü, DFT'nin özel bir durumudur ve aslında kendine özel bir formülü yoktur. Bilgisayar ortamındaki hesaplamalarda DFT işleminin iş yükü oldukça fazladır. Bu yüzden DFT hesaplamalarında kolaylık ve daha hızlı hesaplama istendiği için FFT komutu geliştirilmiştir. $x[n]$ kesikli sinyalinin DFT işlemi için sinyalin içinden alınan bölümdeki örnek sayısı ikinin kuvveti şeklinde ise, (yani $N = 2^n$ ise) özel bir hesaplama yöntemiyle DFT için yapılacak işlem sayısı $\log_2(N) \cdot N$ 'ye düşürülebilir. FFT'deki hesaplama hızının artmasındaki yöntemin temeli buna dayanmaktadır. Örneğin 16 örnekle yapılacak DFT işlemi "16x16=256" adım gerektiren bir işlem olacakken, FFT işlemiyle toplam işlem sayısı $\log_2(16) \cdot 16=64$ adıma inecektir. Böylelikle Matlab ortamında DFT işlemi FFT yöntemiyle daha çok hızlı yapılır.

Aşağıdaki Şekil 3.16'da bahsedilen aynı hareket profili için oluşan grafiklerin Fourier dönüşümü sonrasındaki frekans bölgesindeki grafikleri görülmektedir. Dinamik hareket profillerinin karşılaştırılması için oluşturulan karşılaştırma tablosunda, şekildeki gibi Fourier Dönüşümü sonucu oluşan bu grafiklerinde birbirlerine göre olan normalize çapraz ilinti ilişkisi de hesaplanıp sunulmuştur. Buradaki amaç zaman bölgesinde birbirlerine benzeyen iki sinyalin frekans bölgesindeki benzerliğinin de sunulması ve incelenmesidir. Şekil 3.16'da görülen frekans bölgesindeki sinyallerin normalize benzerlik oranı "%96,86" olarak bulunmuştur.



Şekil 3.16 : “1 Hz 10 mm” tepe genlikli hareket profili FFT grafikleri.

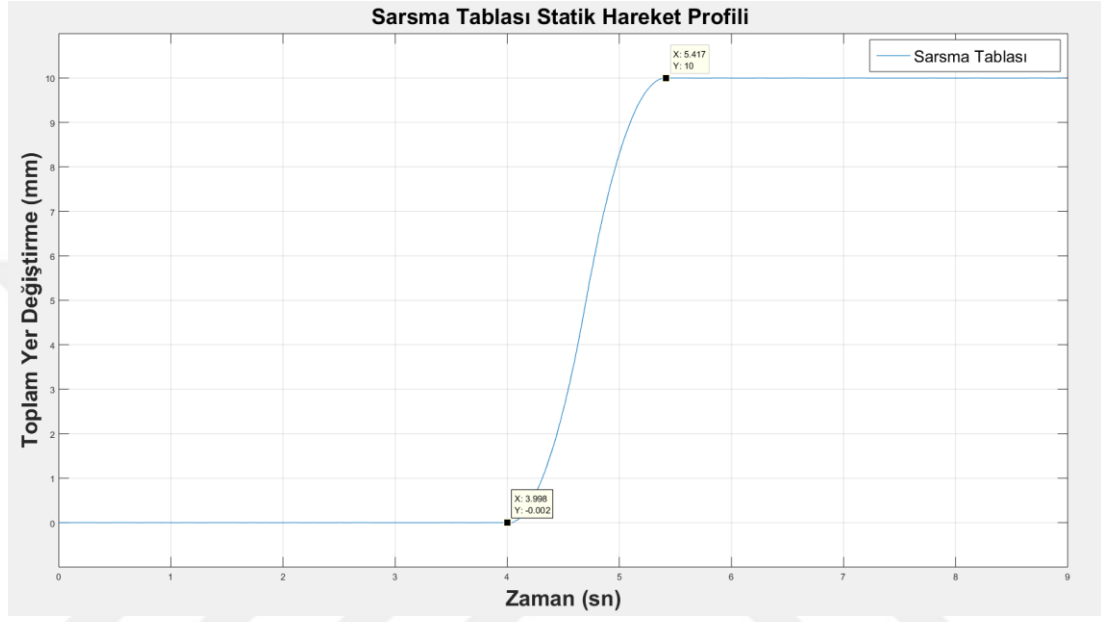
3.3.2 Statik hareket profillerinin karşılaştırılması

Bu bölümde çalışmada sarsma tablasından uygulanan statik hareket profilleri için karşılaştırmanın nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Daha önceden de anlatıldığı gibi statik hareket profilleri, önerilen görüntü işleme yazılımının statik yer değişimi hareketlerine yani zamanla yer değişimi daha yavaş olan hareketlere karşı olan performansını incelemek için uygulanmıştır.

Statik hareket profili testleri esnasında bir yandan sarsma tablasıyla kamera platformuna veya lazer işaretçiye basamak hareket profilleri uygulanırken, bir yandan da bir önceki bölümde olduğu gibi sarsma tablasının mevcut pozisyonunu içeren kayıtlar alınmıştır. Yapılan karşılaştırmalar bu alınan kayıtlar ile yazılımdan çıktısı olarak elde edilen hareket profilleriyle yapılmıştır.

Statik hareket profilinin uygulandığı testlerde genlik değerleri dinamik hareket profillerinde olduğu gibi 0,1 mm’den başlayarak 10 mm’ye kadar uzanan basamak hareketi şeklindeki yer değişimi profili uygulanmıştır. Basamak hareketi profili aslında ani ve tek seferlik sarsma tablasından uygulanan hareket profilleridir. Burada asıl amaç, hareket profili uygulanmadan önceki hareketsiz durum için bir veri oluşturup, basamak hareketi uygulandıktan sonraki hareketsiz durum için oluşturulan veriyle aradaki yer değişimini çıkartmaktır.

Şekil 3.17’de statik hareket profilli için sarsma tablasından uygulanan pozitif yönlü 10 mm genlikli basamak yer değiştirme profili görülmektedir. Başlangıçta “0” pozisyonunda stabil olan tabla yaklaşık dördüncü saniyeden itibaren hareketlendirilip, “10 mm”lik hareket genliğini uyguladıktan sonra, yaklaşık 5,4 saniyeden itibaren tekrar sabit konumuna ulaşmıştır. Şekilden de anlaşılacağı gibi hareket aslında pozitif yönlü basamak hareketine benzemektedir.



Şekil 3.17 : Sarsma tablasının 10 mm genlikli statik yer değişimi profili.

Statik hareket profillerinde karşılaştırmak için dinamik hareket karşılaştırmasından biraz daha farklı bir yol izlenmiştir. Kaydın başlatılmasından itibaren hareketin başlayacağı yere kadarki bölge tablanın harekete başlamadığı, yani tablanın stabil olduğu yer olarak kabul edilmiştir. Bu bölge Şekil 3.17’den de görüleceği gibi aslında hareket profilinin “düşük” seviyeli kısmıdır. Benzer şekilde basamak hareketi bittikten sonraki, kaydın durdurulmasından hemen önceki bölüm ise hareket profilinin “yüksek” seviyeli kısmı olup, yer değiştirmenin tamamlandığı yer olarak kabul edilmiştir. Kaydın başlatılmasında “düşük” seviyeli son verinin olduğu yere kadar olan tüm kayıtların ortalaması alınarak düşük seviye için temsili bir değer belirlenmiştir. Aynı şekilde sarsma tablası yüksek bölgeye geçtikten sonraki ilk veriden itibaren başlayan ve kaydın sonuna kadar olan verilerin ortalaması alınarak yüksek seviye için temsili bir değer belirlenmiştir. Aşağıda sarsma tablası için temsili değerlerin hesaplanması gösterilmiştir.

$$\Delta d_{yüksek_sarsma} = \frac{1}{n} \sum_{n=yüksek_ilk_değer}^{kayıt_son_değer} \Delta d_{tabla_enkoder_verileri} \quad (3.15)$$

$$\Delta d_{düşük_sarsma} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^{düşük_son_değer} \Delta d_{tabla_enkoder_verileri} \quad (3.16)$$

Hesaplanan bu yüksek ve düşük seviye için temsil edilen değerler, sarsma tablasının yapması istenen basamak hareket profili için görüntü işleme yazılımı çıktısı sonucuyla karşılaştırılmak üzere kayıt edilmiştir.

Benzer şekilde görüntü işleme yazılımı sonuçları için de aynı yol izlenmiştir. Video kaydının başlatılmasından tablanın harekete geçme anının başlangıcına kadar olan yer değişimi verilerinin ortalaması, görüntü işleme yazılımı için “düşük” seviyeli kısım için temsili değeri oluşturmuştur. Basamak hareketi tamamlandıktan hemen sonraki ilk veriden itibaren kaydın sonlanmasına kadar olan verilerin ortalaması ile yüksek seviyeli kısım için temsili değer oluşturulmuştur.

Aşağıda yüksek seviye için temsili değer nasıl oluşturulduğu basit bir formülle gösterilmiştir.

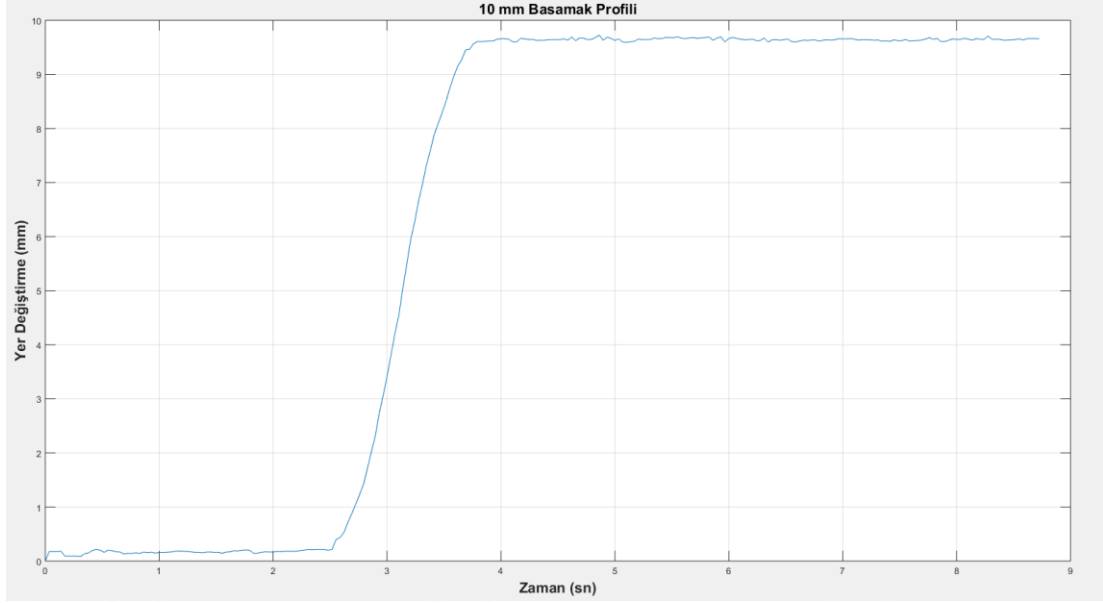
$$\Delta d_{yüksek_görüntü} = \frac{1}{n} \sum_{n=yüksek_ilk_değer}^{kayıt_son_değer} \Delta d_{yazılım_çiktısı} \quad (3.17)$$

Benzer şekilde düşük seviye için temsili değer aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta d_{düşük_görüntü} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^{düşük_son_değer} \Delta d_{yazılım_çiktısı} \quad (3.18)$$

Aşağıdaki şekil 3.18’de 10 mm’lik basamak hareketinin görüntü işleme yazılımı çıktısı sonucu grafiği görülmektedir.

Sarsma tablası kayıtları ve görüntü işleme yazılımının sonucunda çıkan bu temsili değerler için uygulanan yer değiştirme büyüklüğü; “yüksek” bölgede tanımlanan verilerin ortalama değerinden, “düşük” bölgede tanımlanan verilerin ortalama değerinden çıkartılmasıyla aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır.



Şekil 3.18 : Görüntü işleme yazılımının 10 mm genlikli statik yer değişimi profili.

Δd_1 sarsma tablası için mutlak yer değişirme değeri olup;

$$\Delta d_1 = \Delta d_{yüksek_sarsma} - \Delta d_{düşük_sarsma} \quad (3.19)$$

şeklinde bulunur. Δd_2 ise görüntü işleme için hesaplanan mutlak yer değişime değeridir ve aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\Delta d_2 = \Delta d_{yüksek_görüntü} - \Delta d_{düşük_görüntü} \quad (3.20)$$

Sistemler arasındaki karşılaştırma ise her iki sistem için bulunan bu Δd_1 ve Δd_2 değerlerinin arasındaki yüzde bağıl hata hesaplanmasıyla incelenmiştir.

3.3.2.1 Hata kavramı

Fiziksel bir niceliğin ölçülen değeri ile gerçek değeri arasındaki farka hata denir. Ölçülen bir fiziksel büyüklüğün sayısal değeri, yapılan deneysel hatalardan dolayı hiçbir zaman gerçek değeri ile ifade edilemez. Ölçüm sonucu bulunan sayısal değerlerin duyarlılığı ve güvenilirliği yapılan hataların sınırı ile belirlenir. Hata değeri negatif veya pozitif değerler olabilir. Bu yüzden ölçülen nicemin hata sınırı, “±” gibi bir belirsizlikle verilir.

Mutlak Hata ve Bağıl Hata: Ölçülen fiziksel büyüklüğün gerçek değeri X_G olarak tanımlanırsa ve bu X_G 'nin ölçülen deneysel değeri X_D olursa bu iki değer arasındaki farka X_G 'nin mutlak hatası denir. Mutlak hata aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\Delta X = |X_G - X_D| \quad (3.21)$$

Mutlak hata ΔX 'in deney sonucunda ölçülen değer olan X_D 'ye oranına ise bağıl hata denir. Bağıl hata aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$\text{Bağıl Hata} = \frac{|X_G - X_D|}{X_D} \quad (3.22)$$

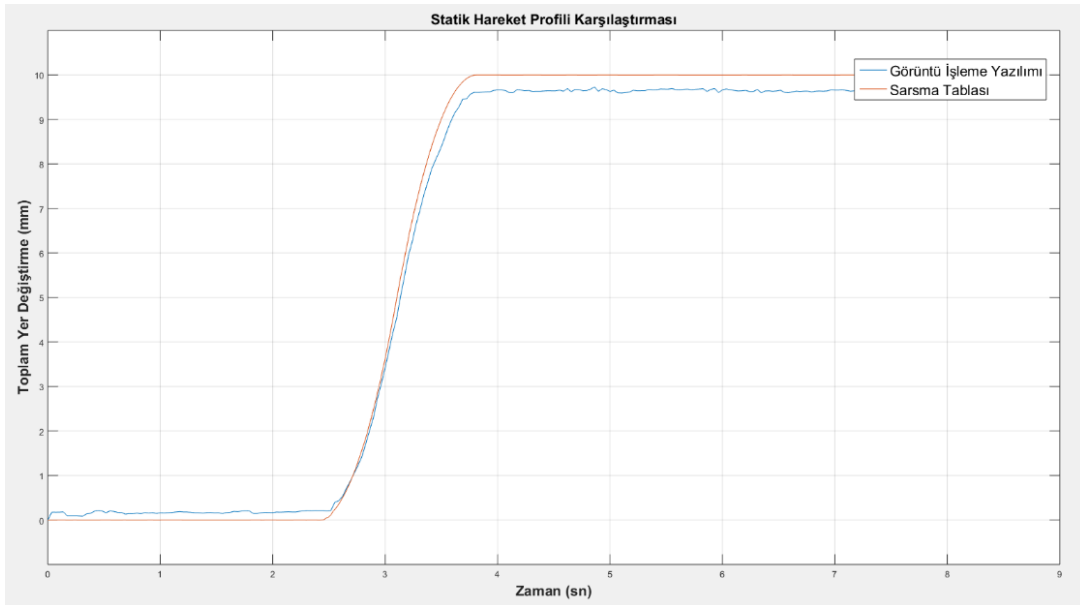
Yüzde bağıl hata ise;

$$\text{Yüzde Bağıl Hata} = \frac{|X_G - X_D|}{X_D} \times 100 \quad (3.23)$$

formülüyle hesaplanır. Karşılaştırma için yazılımdan ve sarsma tablasından elde edilen düşük ve yüksek seviye değerlerinin yüzde bağıl hataları aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$\text{Yüzde Bağıl Hata} = \frac{|\Delta d_1 - \Delta d_2|}{\Delta d_1} \times 100 \quad (3.24)$$

Aşağıda yüzde bağıl hatası “5,18” olarak hesaplanmış 10 mm genlikli statik hareket profilinin sarsma tablası kaydı ve görüntü işleme yazılımın çıktısı şekilleri görülmektedir.



Şekil 3.19 : Sistemlerin 10 mm genlikli statik hareket profili çıktıları.

4. YÖNTEMİN FARKLI KOŞULLARDA TESTİ VE ANALİZLERİN DEĞERLENDİRMESİ

Tez çalışmasında önerilen yer değiştirme ölçümü sistemi başlıca inşaat mühendisliğindeki köprü, yüksek katlı binalar, kule gibi yapılardaki diğer yer değiştirme ölçüm yöntemlerine alternatif bir ölçüm yöntemi olarak sunulmuştur. Bu yüzden önerilen sistemin gerçekteki kullanımını simule edecek bir yapı üzerinde yer değiştirme hareketi sırasındaki performansını öngörmek, kamera platformunun ve lazer işaretçinin kurulumu sırasında ortaya çıkabilecek çeşitli sorunların sistemin performansını nasıl etkilediğini incelemek için çeşitli testler yapılmıştır. Bu yüzden aslında bu bölüm daha çok sistemin gerçek hayatta kullanılması sırasındaki uygulama analizlerinin benzetimlerini içermektedir. Böylece analiz sonuçlarından sistemin kurulumu hakkında çeşitli kolaylıklar ortaya çıkabilir ve sistemin uygulama alanı geliştirilebilir.

Aşağıdaki Çizelge 4.1’de bu bölümde kurgulanan testleri içeren test matrisi görülmektedir. Bölüm 4.1’de önerilen yöntemin dinamik hareket değişimlerine karşılık performansı, kurulan deney düzeneği ile analiz edilmiş olup Çizelge 4.1’de “Düzenek -1-” olarak gösterilmiştir. Bölüm 4.2’de önerilen yöntemin statik hareket değişimlerine karşılık performansı, kurulan deney düzeneği ile analiz edilmiş olup Çizelge 4.1’de “Düzenek -4-” olarak gösterilmiştir. Bölüm 4.3’te ise kullanılan sistemdeki dijital kameranın saniyede aldığı görüntü sayısının artırılmasının sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu bölüm için hem statik hemde dinamik hareket profilleri ile testler uygulanıp, Çizelge 4.1’de statik hareketler için “Düzenek -5-”, dinamik hareketler için “Düzenek -2-” gösterimi yapılmıştır. İlgili bölümde sonuçlar “Düzenek -4-” ile “Düzenek -5-” ve “Düzenek -1-” ile “Düzenek -2-” sonuçları karşılaştırılarak incelenmiştir. Bölüm 4.4’te ise kamera ile lazer işaretçisinin yer değiştirmesiyle geliştirilen görüntü işleme yönteminin sonuçları analiz edilmiş olup, Çizelge 4.1’de “Düzenek -7-” olarak gösterilmiştir. İlgili bölümde sonuçlar “Düzenek -1-” ile “Düzenek -7-” sonuçları karşılaştırılarak incelenmiştir.

Çizelge 4.1 : Oluşturulan test düzenekleri için test matrisi.

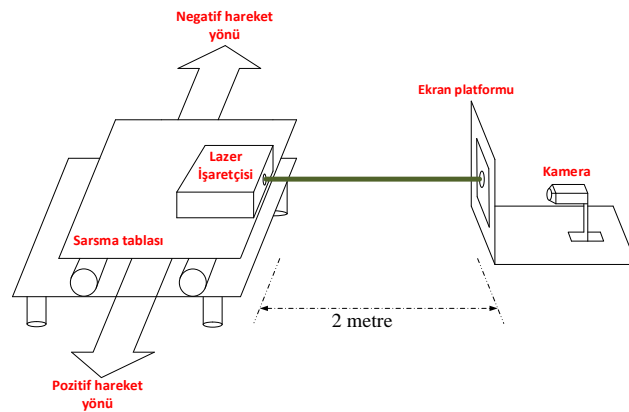
Düzenek Numarası	Genlik (mm)										Kamera-Lazer İşaretçi Arası Mesafe	Hareketli Platform	Uygulanan Hareketin Frekansı (Hz)	Uygulanan Hareket Profili Tipi	Görüntü Hızı (fps)	Görüntü Çözünürlüğü										
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1							2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Düzenek - 1-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	2 metre	Lazer İşaretçi	1	5 periyotluk Sinüs	30	2080 x 1552
Düzenek - 2-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	2 metre	Lazer İşaretçi	1	5 periyotluk Sinüs	60	2080 x 1552
Düzenek - 4-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	2 metre	Lazer İşaretçi	-	Basamak	30	2080 x 1552
Düzenek - 5-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	2 metre	Lazer İşaretçi	-	Basamak	60	2080 x 1552
Düzenek - 7-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	2 metre	Kamera Platformu	1	5 periyotluk Sinüs	30	2080 x 1552
Düzenek - 8-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	33 metre	Lazer İşaretçi	-	Basamak	60	2080 x 1552

Bölüm 4.5’te önerilen yöntemin performansının kamera platformu ile lazer işaretçi arasındaki uzaklığa bağlı olarak nasıl değiştiği analiz edilmiştir. İlgili bölümde sonuçlar “Düzenek -5-” ile “Düzenek -8-” sonuçları karşılaştırılarak incelenmiştir.

4.1 Dinamik Hareket Profilleri İle Sistemin Performansının Analizi

Yapılardaki yer değişimi miktarı ölçülen her bir sisteme kurulan ölçüm düzeneği özgüdür ve birbirinin aynısı değildir. Örneğin bir gökdelenin orta katındaki yer değişimleri, zemin kata göre veya en üst katlara göre farklılık göstermektedir. Zemin kattaki küçük değişimler, bu değişimlere salınım da denebilir, zamana göre çok yavaş değişen ve nispeten çok küçük genlik değerlerinde gözlemlenirken, en üst kattaki hareket değişimleri, zemin kata göre büyük genliklerde ve anlık hızlı değişimlerle gözlemlenebilir. Bu yüzden tez çalışmasında açıklanan sistemin, zamanla hızlı yer değişimleri gösteren (yukarıdaki örnekte gökdelenin üst katında olduğu gibi) bölgelerdeki hareketi belirlemek için performansının incelenmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bölümdeki analizin de amacı, tez çalışmasında bahsedilen sistemin sarsma tablası ile dinamik hareketlere karşı ürettiği hareket profillerinin benzerliğinin karşılaştırılmasıdır. Böylelikle önerilen sistemin zamanla aniden değişen dinamik yer değişimlerine karşı kullanılabilirliği incelenmiş olur.

Bu bölümde sarsma tablasından uygulanan dinamik hareket profillerinin, önerilen sistemdeki görüntü işleme yazılımı çıktısı olan hareket profilleriyle yapılan analizleri ve karşılaştırmaları paylaşılmıştır. Bu analizler için kurulan deney düzeneği şematığı aşağıdaki Şekil 4.1’deki gibidir.



Şekil 4.1 : Dinamik ve statik hareket profilleri için kurulan deney düzeneği.

Şematikte gösterildiği şekilde, lazer işaretçi sarsma tablasının üzerine monte edilmiş olup, kamera platformu lazer tam işaretçinin karşısına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Kamera platformu ile lazer işaretçi arasındaki mesafe 2 metre olacak şekilde uzaklık ayarı yapılmıştır. Kameranın ve lazer işaretçinin doğrultularının aynı olması gerekliliği Bölüm 3.1’de açıklanmıştır. Sarsma tablasındaki lazer işaretçinin doğrultusu HMC5883L üç eksenli manyeto ölçer sensörüyle ölçülüp, tablanın kuzeyle yaptığı açının yaklaşık “265” derece olduğu kaydedilmiştir. Kamera platformunun doğrultusu ise bu açı derecesine karşılık gelecek şekilde üç ayak (tripod) ile ayarlanıp sabitlenmiştir. Dijital kameranın çözünürlüğü “2080x1552” piksele ayarlanıp, görüntü yenileme hızı “30 Hz” seçilmiş ve görüntü formatı “YUV 422” olarak ayarlanmıştır. Kurulum işlemlerinden sonra lazer işaretçi açılıp, sarsma tablasından 0,1 mm tepe genliğinden “10 mm” tepe genliğine kadar dinamik hareket profilleri uygulanmıştır. Uygulamalar sonucunda kameradan ve sarsma tablasından alınan kayıtlar, Bölüm 3.2 ve 3.3’te bahsedilen işlemlerden geçirilmiştir. Bu işlemler sonra ortaya çıkan sonuçlar karşılaştırma tablosuna eklenmiştir. Kamera ile sarsma tablası arasındaki mesafenin 2 metre olduğu ve lazer işaretçiye sarsma tablasından çeşitli genliklerde dinamik hareket profillerinin uygulandığı ölçüm sonuçlarını içeren karşılaştırma tablosu aşağıdaki Çizelge 4.2’deki gibidir.

Dinamik hareket profillerinin sonuçlarını içeren tabloya bakıldığında, “1 Hz” frekansında beş periyot boyunca oluşturulan her bir sinüs çevriminin maksimum ve minimum noktaları arasındaki farklar belirlenip, aradaki farkın mutlak değeri (yani aslında toplam yer değiştirme miktarı) tabloya ilgili sinüs çevriminin altına “mm” cinsinden “Periyot Δd (mm)” miktarı olarak girilmiştir. Tabloda belirtilen “Ortalama Yer Değiştirme Δd (mm)” kısmında ise bu beş çevrimin yer değiştirme miktarlarının ortalaması alınmış ve tabloya eklenmiştir.

Bölüm 3.3.1’de bahsedilen işlemler sarsma tablası verilerine göre görüntü işleme sonuçlarının arasındaki benzerlik Matlab programında “normalize çapraz ilinti” hesaplanarak bulunmuş ve her bir genlik için ayrı ayrı bu benzerlik değeri hesaplanıp tablodaki “Hareket Profillerinin Normalize Çapraz İlinti Değeri” kısmına eklenmiştir. Ayrıca zaman bölgesinde elde edilen bu hareket profillerinin frekans bölgesindeki grafiklerinin karşılaştırılmalarının yapılması sonucunda elde edilen benzerlik değeri

de hesaplanıp tabloda bulunan “FFT Grafiklerinin Normalize Çapraz İlinti Değeri” sütununa yazılmıştır. Ek olarak çıkarılan hareket profillerinin zaman bölgesinden fourier dönüşümü alınmasıyla elde edilen FFT grafiklerinde, genliğin maksimum olduğu noktalar ve bu noktalara denk gelen frekans değerleri de tabloda sırasıyla “FFT Maksimum Genlik Değeri” ve “FFT Frekans Değeri (Hz)” kısımlarına hem sarsma tablası için hemde görüntü işleme sistemi çıktısı için ayrı ayrı olacak şekilde eklemiştir.

Çizelge 4.2’ye bakıldığında, 10 mm tepe genliğinden 0,4 mm tepe genliğine kadar olan sinüzoidal hareket profilleriyle, tezde önerilen sistemin görüntü işleme yazılımından elde edilen hareket profillerinin sonuçlarının normalize çapraz ilinti değeri oldukça yüksek olup, en düşük değer “%94,23” olarak “1 mm 1 Hz” test verisinde gözlemlenmiştir.

Hareket profili çıktılarının arasındaki bu yüksek benzerlik değeri, Matlab programında üst üste çizdirilen hareket profilleriyle de gözlemlenmiştir. 0,4 mm’lik tepe genlik değerinden itibaren benzerlik oranı düşmekte ve 0,1 mm genlikte bu değer %20,05 ile en düşük seviyesini almaktadır.

Ayrıca Çizelge 4.2’de hareket profillerinin FFT grafiklerinin arasındaki benzerliğine bakıldığında, zaman eksenindeki benzerliğe paralel olarak, 10 mm tepe genlikli profillerden itibaren 0.4 mm tepe genlikli hareket profiline kadar benzerlik oranı %96.86’den düşük olmayıp, benzerlik değeri oldukça yüksektir.

Fakat normalize çapraz ilinti sonuçlarına paralel şekilde, 0.4 mm tepe genlikli hareket profilinden itibaren, Fourier Dönüşümü sonucu oluşan grafikler arası benzerliklerde düşüş görülmektedir.

Ayrıca önerilen görüntü işleme ile çıkartılan hareket profillerinin 0.4 mm’den düşük profillerin FFT’leri arasındaki benzerliği, 0,4 mm’den yüksek genlikli profillerdeki kadar başarıyla oluşturulamamaktadır.

Yine Çizelge 4.2’deki FFT grafiklerinin incelemesi sonucunda ortaya çıkan maksimum FFT genliğinin frekans değeri, sarsma tablasından uygulanan hareket profilinin frekans değeri ile 0,1, 0,2 ve 0,3 mm tepe genliğindeki testler hariç aynı

değeri taşımaktadır. Benzer şekilde FFT işlemi sonucu oluşan grafikler arasındaki maksimum genlik değerlerine bakıldığında 0,4 mm tepe genlikli hareket profiline kadar sonuçların birbirine kadar olukça yakın olduğu, 0,3 mm tepe genliğinden sonraki küçülen genlikli testlerle aradaki farkın açıldığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.2 verilerinde temel olarak “Hareket Profillerinin Normalize Çapraz İlinti Değeri” ve “Hareket Profillerinin Normalize Çapraz İlinti Değeri” sütunları incelendiğinde çalışmada bahsedilen görüntü işleme sistemi, sarsma tablasından uygulanan dinamik hareketleri 0,4 mm tepe genliğine kadar yüksek oranda algılayıp hareket çıktısı olarak üretebilmekte olduğu sonucuna varılabilmektedir. Fakat aynı başarıyı 0,4 mm’den küçük genlikli testler için gerçekleştirememektedir.



Çizelge 4.2 : Düzenek -1- için dinamik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.

Uygulanan Sinyaller	Kullanılan Yöntem	1. Periyot Δd (mm)	2. Periyot Δd (mm)	3. Periyot Δd (mm)	4. Periyot Δd (mm)	5. Periyot Δd (mm)	Ortalama Yer Değiştirme Δd (mm)	Hareket Profillerinin Normalize Çapraz İlinti Değeri (%)	FFT Maksimum Genlik (mm)	FFT Frekans Değeri (Hz)	FFT Grafiklerinin Normalize Çapraz İlinti Değeri (%)
0.1 mm_1hz	Sarsma tablası	0.1025	0.1010	0.1010	0.1010	0.1010	0.1013	20.05	0.0653	1.0195	40.00
	Önerilen Metod	0.0660	0.0750	0.0670	0.0500	0.0760	0.0668		0.0278	1.0195	
0.2 mm_1hz	Sarsma tablası	0.2010	0.2010	0.2010	0.2010	0.1995	0.2007	32.95	0.1086	1.0195	44.65
	Önerilen Metod	0.184	0.1644	0.1389	0.1513	0.1213	0.1520		0.0668	0.769	
0.3 mm_1hz	Sarsma tablası	0.3005	0.3015	0.2995	0.3005	0.3005	0.3005	85.24	0.1422	1.0195	87.52
	Önerilen Metod	0.2133	0.2323	0.2461	0.2258	0.2102	0.2255		0.0938	0.9063	
0.4 mm_1hz	Sarsma tablası	0.3990	0.4005	0.3990	0.3990	0.3975	0.3990	67.23	0.1970	0.9375	88.14
	Önerilen Metod	0.3680	0.3695	0.3132	0.3057	0.3286	0.3370		0.1211	0.9375	
0.5 mm_1hz	Sarsma tablası	0.5000	0.5000	0.5015	0.5015	0.5015	0.5009	95.87	0.2708	1.0195	96.96
	Önerilen Metod	0.4116	0.4011	0.4365	0.3745	0.3724	0.3992		0.2154	1.0195	
0.6 mm_1hz	Sarsma tablası	0.6010	0.6000	0.5985	0.6010	0.6020	0.6005	97.16	0.2664	1.0195	98.63
	Önerilen Metod	0.5502	0.5403	0.5418	0.5515	0.5442	0.5456		0.2310	1.0195	
0.7 mm_1hz	Sarsma tablası	0.7005	0.6995	0.6995	0.6995	0.6995	0.6997	95.01	0.3581	1.0195	98.73
	Önerilen Metod	0.6408	0.6490	0.6459	0.6400	0.6404	0.6432		0.3316	1.0195	
0.8 mm_1hz	Sarsma tablası	0.8005	0.7990	0.7990	0.8005	0.7980	0.7994	97.40	0.4458	1.0195	98.79
	Önerilen Metod	0.7326	0.7454	0.7464	0.7495	0.7527	0.7453		0.4107	1.0195	
0.9 mm_1hz	Sarsma tablası	0.8975	0.8980	0.8990	0.8990	0.8990	0.8985	95.60	0.3812	1.0195	98.71
	Önerilen Metod	0.8555	0.8581	0.8498	0.8562	0.8530	0.8545		0.3561	1.0195	
1.0 mm_1hz	Sarsma tablası	0.9965	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990	0.9985	94.23	0.4066	1.0195	99.15
	Önerilen Metod	0.9709	0.9425	0.9598	0.9578	0.9484	0.9559		0.3896	1.0195	

Çizelge 4.2 –devam : Düzenek -1- için dinamik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.

Uygulanan Sinyaller	Kullanılan Yöntem	1. Periyot Δd (mm)	2. Periyot Δd (mm)	3. Periyot Δd (mm)	4. Periyot Δd (mm)	5. Periyot Δd (mm)	Ortalama Yer Değiştirme Δd (mm)	Hareket Profillerinin Normalize Çapraz İlinti Değeri (%)	FFT Maksimum Genlik (mm)	FFT Frekans Değeri (Hz)	FFT Grafiklerinin Normalize Çapraz İlinti Değeri (%)
2 mm_1hz	Sarsma tablası	1.9965	1.9950	1.9955	1.9965	1.9940	1.9955	98.33	0.8818	1.0195	98.73
	Önerilen Metod	1.8496	1.8908	1.8615	1.8754	1.8632	1.8681		0.8684	1.0195	
3 mm_1hz	Sarsma tablası	2.9890	2.9905	2.9890	2.9915	2.9915	2.9903	97.97	1.6140	1.0195	99.10
	Önerilen Metod	2.8281	2.8575	2.8197	2.8216	2.8262	2.8306		1.5945	1.0195	
4 mm_1hz	Sarsma tablası	3.9890	3.9855	3.9865	3.9875	3.9880	3.9873	98.56	2.1489	1.0195	98.64
	Önerilen Metod	3.7763	3.7553	3.7702	3.7567	3.7552	3.7627		2.0298	1.0195	
5 mm_1hz	Sarsma tablası	4.9840	4.9840	4.9840	4.9850	4.9830	4.9840	95.20	2.8574	1.0195	97.47
	Önerilen Metod	4.7519	4.7658	4.7663	4.7654	4.7559	4.7611		2.7038	1.0195	
6 mm_1hz	Sarsma tablası	5.9820	5.9830	5.9810	5.9820	5.9830	5.9822	99.80	3.3420	1.0195	99.86
	Önerilen Metod	5.7319	5.7176	5.7297	5.7226	5.7129	5.7229		3.1774	1.0195	
7 mm_1hz	Sarsma tablası	6.9795	6.9795	6.9795	6.9795	6.9785	6.9793	97.96	3.9141	1.0195	99.87
	Önerilen Metod	6.7861	6.7848	6.7785	6.7626	6.7608	6.7746		3.7750	1.0195	
8 mm_1hz	Sarsma tablası	7.9730	7.9760	7.9730	7.9745	7.9730	7.9739	97.91	3.9845	1.0195	97.98
	Önerilen Metod	7.8018	7.8133	7.8156	7.8263	7.7954	7.8105		3.8310	1.0195	
9 mm_1hz	Sarsma tablası	8.9670	8.9675	8.9660	8.9660	8.9645	8.9662	98.41	4.5880	1.0195	99.35
	Önerilen Metod	8.8770	8.8821	8.8256	8.8542	8.8365	8.8551		4.4399	1.0195	
10 mm_1hz	Sarsma tablası	9.9635	9.9660	9.9650	9.9625	9.9635	9.9641	96.41	5.0923	1.0195	96.86
	Önerilen Metod	9.8022	9.8126	9.7962	9.8213	9.8038	9.8072		4.9962	1.0195	

4.2 Statik Hareket Profilleri İle Sistemin Performansının Analizi

Bu deney düzeneğinde, sarsma tablasından uygulanan statik hareket profillerinin, önerilen sistemdeki görüntü işleme yazılımı çıktısı olan hareket profilleriyle yapılan analizleri ve karşılaştırmaları paylaşılmıştır. Bu analizler için kurulan deney düzeneği Şekil 4.1’de kurulan düzenek ile aynıdır. Bölüm 4.1’de sarsma tablasından dinamik hareket profilleri uygulanırken, bu bölümde deney düzeneği hiç değiştirilmeden aynı sisteme statik hareket profilleri uygulanmıştır.

Bölüm 4.1’de açıklanan gökdelen örneği, yapıların statik hareketlerin analizi için kurulan deney düzeneğinin açıklanmasında da kullanılabilir. Tezde önerilen sistem gökdelenin zemin katında oluşan, zamana göre çok yavaş değişen ve nispeten çok küçük genlik değerlerindeki hareket değişimlerini ölçebilecek yeterlilikte olmalıdır. Bu yüzden tez çalışmasında açıklanan sistemin, zamanla yavaş yer değişimleri gösteren (yukarıdaki örnekte gökdelenin zemin katına denk gelen bölge olmaktadır) bölgelerdeki performansının incelenmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bölümde kurulan deney düzeneğinin amacı, tez çalışmasında bahsedilen sistemin sarsma tablası ile statik hareketlere karşı ürettiği hareket profillerinin benzerliğinin karşılaştırılmasıdır. Böylelikle önerilen sistemin zamanla aniden değişmeyen daha statik yer değişimlerine karşı kullanılabilirliği incelenmiştir.

Şekil 4.1’de gösterilen şematik kurulduktan sonra dijital kameranın çözünürlüğü yine bir önceki düzenekte olduğu gibi “2080x1552” piksele ayarlanıp, görüntü yenileme hızı “30 Hz” seçilmiştir. Önceki analize benzer şekilde sarsma tablasından 0,1 mm yer değişimi farkından başlayarak, 10 mm’ye kadarki basamak profilli statik yer değişimleri uygulanmıştır. Alınan sarsma tablası ve video kamera kayıtları Bölüm 3.2 ve Bölüm 3.3’te bahsedilen işlemlerden bu sefer statik hareket profillerini incelemek için geçirilerek ilgili sonuçlar çıkartılmıştır. Bu işlemlerden sonra ortaya çıkan sonuçlar statik hareket profilleri karşılaştırma tablosuna eklenmiştir.

Kamera ile sarsma tablası arasındaki mesafenin 2 metre olduğu ve sarsma tablasından lazer işaretçiye çeşitli genliklerde uygulanan statik hareket profillerinin ölçüldüğü sonuçları içeren karşılaştırma tablosu Çizelge 4.3’teki gibidir.

Statik hareket profillerinin sonuçlarını içeren tabloya bakıldığında, basamak hareketine benzer hareket profillerinin uygulandığı profillerin bölüm 3.3.2’de anlatılan

profilin “düşük” kısmı için belirlenen değerlerinin ortalaması alınmasıyla elde edilen düşük seviyesi değeri, birimi tabloda mm cinsinden olacak şekilde “Düşük Kısım Ortalaması (mm)” sütununa yazılmıştır. Basamak hareketinin uygulandığı profillerin “yüksek” kısmı için belirlenen değerlerinin ortalaması alınmasıyla elde edilen yüksek seviyesi değeri, birimi yine tabloda mm cinsinden olacak şekilde “Yüksek Kısım Ortalaması (mm)” sütununa eklemiştir. Daha sonra her bir genlik denemesi için yine Bölüm 3.3.2’de detaylarıyla anlatılan ortalama yer değiştirmelerin farkıyla hesaplanan “Toplam Yer Değiştirme Δd (mm)” miktarı hesaplanıp tabloya eklenmiştir.

Tabloda hesaplanan tüm değerler sarsma tablası ve görüntü işleme sistemi için ayrı ayrı bulunup, karşılaştırılmak üzere tablodaki yatay sütunlara “sarsma tablası” ve “önerilen metod” ifadeleriyle eklenmiştir.

Çizelge 4.3’e bakıldığında, 10 mm genlik değerinden 1,0 mm genliğine kadar olan basamak hareket profilleriyle, tezde önerilen sistemin görüntü işleme yazılımı sonucundan elde edilen hareket profillerinin toplam yer değiştirme sonuçlarının arasındaki yüzde bağıl hata değerinin en yüksek seviyesi “%28.75” olarak 1,0 mm’lik hareket profilinde gözlemlenmiştir. Ayrıca 10 mm’den 3 mm genliğindeki testlere kadar yüzde bağıl hata oranı tek haneli rakamlardan oluşmakta olup, maksimum değeri “%9,65” olarak bulunmuştur.

Yine Çizelge 4.3 verilerine bakıldığında 1,0 mm’lik genlikli testlerden itibaren azalan genlikli testlere doğru hata oranı diğer değerlere göre nispeten yükselmektedir. 0,1 mm ve 0,2 mm genlikli testlerde ise önerilen sistemle basamak hareketinin düşük ve yüksek seviyesini ayırt edemediğinden hata oranı çok yüksek çıkmaktadır.

Sarsma tablasından uygulanan statik hareketlerin görüntü işleme sistemiyle karşılaştırılmasını içeren Çizelge 4.3 verilerine genel olarak bakıldığında 1 mm genliğine kadar hata oranı düşük kalmakta ve literatürdeki alternatif yer değişimi ölçüm yöntemlerine alternatif bir yöntem olarak kullanılabilirliği değerlendirilmektedir. 1 mm genlikli testlerden itibaren genlik düştükçe hata oranı artmakta olup, 0,5 mm genlikli testlerden sonra ise iyice yükselmektedir. Bu yüzden tez çalışmasında önerilen sistemle statik hareket tespiti 0,5 mm genlikli testlerden itibaren düşük genlikli testlerde yüksek hata değeri ile tespit edilmekte ve bu değerler için başarısız kalmaktadır.

Çizelge 4.3 : Düzenek -4- için dinamik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.

Uygulanan Sinyaller	Kullanılan Yöntem	Düşük Kısım Ortalaması (mm)	Yüksek Kısım Ortalaması (mm)	Toplam Yer Değişirme Δd (mm)	Bağıl Hata (%)
0,1 mm Basamak	Sarsma tablası	0.0014	0.0984	0.0970	120,41
	Önerilen Metod	0.181	0.3948	0.2138	
0,2 mm Basamak	Sarsma tablası	0.0013	0.1988	0.1975	111,14
	Önerilen Metod	0.104	0.521	0.417	
0,3 mm Basamak	Sarsma tablası	0.0011	0.2975	0.2964	38,70
	Önerilen Metod	0.1331	0.3148	0.1817	
0,4 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0013	0.3980	0.3967	72,20
	Önerilen Metod	0.0921	0.2024	0.1103	
0,5 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0038	0.4969	0.4931	32,53
	Önerilen Metod	0.1651	0.4978	0.3327	
0,6 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0015	0.5994	0.5979	28,33
	Önerilen Metod	0.1342	0.5627	0.4285	
0,7 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0013	0.6989	0.6976	28,93
	Önerilen Metod	0.0573	0.5531	0.4958	
0,8 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0015	0.7986	0.7971	19,95
	Önerilen Metod	0.1813	0.8194	0.6381	
0,9 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0010	0.8986	0.8976	23,67
	Önerilen Metod	0.2665	0.9516	0.6851	
1,0 mm Basamak	Sarsma tablası	0.0019	0.9980	0.9961	28,75
	Önerilen Metod	0.2272	0.9369	0.7097	

Çizelge 4.3. -devam : Düzenek -4- için dinamik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.

Uygulanan Sinyaller	Kullanılan Yöntem	Düşük Kısım Ortalaması (mm)	Yüksek Kısım Ortalaması (mm)	Toplam Yer Değiştirme Δd (mm)	Bağıl Hata (%)
2 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0012	1.9989	1.9977	16,89
	Önerilen Metod	0.1734	1.8337	1.6603	
3 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0017	2.9982	2.9965	9,65
	Önerilen Metod	0.1584	2.8657	2.7073	
4 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0018	3.9982	3.9964	5,47
	Önerilen Metod	0.1771	3.9549	3.7778	
5 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0012	4.9987	4.9975	4,11
	Önerilen Metod	0.3054	5.0975	4.7921	
6 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0013	5.9989	5.9976	2,91
	Önerilen Metod	0.1755	5.9988	5.8233	
7 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0010	6.9988	6.9978	6,18
	Önerilen Metod	0.0682	6.6332	6.5650	
8 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0013	7.9990	7.9977	8,24
	Önerilen Metod	0.2958	7.6348	7.3390	
9 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0011	8.9989	8.9978	5,57
	Önerilen Metod	0.3475	8.8439	8.4964	
10 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0011	9.9987	9.9976	5,18
	Önerilen Metod	0.1663	9.6456	9.4793	

4.3 Kameranın Yenileme Hızının Artırılması Analizi

Bu bölümdeki deney düzeneğinde çalışmada kullanılan kameranın saniyedeki görüntü alma sıklığının artırılması karşısında sistemin performansının nasıl değiştiği analiz edilmiştir.

Kullanılan deney düzeneği Şekil 4.1’de kurulan düzenek ile aynı olup, sarsma tablasından önceki analizlerde olduğu gibi 0,1 mm’den 10 mm’ye kadar tanımlı hem statik hem de dinamik hareket profilleri uygulanmıştır.

Bu analizin asıl amacı, aynı kamera ve görüntü çözünürlüğü kullanılarak, kameranın bir saniyede aldığı görüntü sayısının artırılmasının, önerilen görüntü işleme metodu sonuçları üzerindeki etkisinin gözlemlenmesidir.

Şekil 4.1’de gösterilen kurulum yapıldıktan sonra dijital kameranın çözünürlüğü “2080x1552” piksele ayarlanıp, görüntü yenileme hızı “60 Hz” olarak seçilmiştir. Sarsma tablasından öncelikle Bölüm 4.2’de bahsedilen 0,1 mm yer değişimi farkından başlayarak, 10 mm’ye kadarki basamak profilli statik yer değişimleri sarsma tablasından uygulanmıştır. Statik hareketler tamamlandıktan sonra, yine bölüm 4.1’de bahsedilen 0.1 mm tepe genliğinden 10 mm tepe genliğine kadar olan dinamik hareket profilleri uygulanmıştır.

Uygulanan statik ve dinamik hareket profilleri sonucunda kameradan ve sarsma tablasından alınan kayıtlar, bölüm 3.2 ve 3.3’te bahsedilen işlemlerden geçirilmiştir. Statik hareket profili sonuçları için bölüm 4.2’dekine benzer bir çizelge, dinamik hareket profilleri sonuçları için bölüm 4.1’e benzer başka bir çizelge oluşturulmuştur.

Aşağıda önce statik hareket profilleri için oluşturulan çizelge, sonrasında ise dinamik hareket profilleri sonrasında oluşturulan çizelge görülmektedir. Çizelge 4.4’teki yüzde bağıl hata değerleri ilk bakışta incelendiğinde statik hareket profillerinin sonuçları için oluşturulan Çizelge 4.3 verileriyle benzerlik göstermektedir. Her iki çizelgede de sarsma tablasından uygulanan genlik değeri düştükçe hata oranı artmaktadır. Çizelgeye bakıldığında, 10 mm genlik değerinden 0,5 mm genliğine kadar olan basamak hareket profilleriyle, tezde önerilen sistemin görüntü işleme yazılımı sonucundan elde edilen hareket profillerinin toplam yer değiştirme sonuçlarının arasındaki yüzde bağıl hata değerinin en yüksek seviyesi %20,66 ile 0,9 mm’lik hareket profilinde olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.4 : Düzenek -5- için dinamik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.

Uygulanan Sinyaller	Kullanılan Yöntem	Düşük Kısım Ortalaması (mm)	Yüksek Kısım Ortalaması (mm)	Toplam Yer Değiştirme Δd (mm)	Bağlı Hata (%)
0,1 mm Basamak	Sarsma tablası	0.0014	0.0984	0.0970	125,15
	Önerilen Metod	0.1280	0.3464	0.2184	
0,2 mm Basamak	Sarsma tablası	0.0013	0.1988	0.1975	77,77
	Önerilen Metod	0.144	0.4951	0.3511	
0,3 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0038	0.2952	0.2914	17,33
	Önerilen Metod	0.1269	0.3678	0.2409	
0,4 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0039	0.3955	0.3916	20,38
	Önerilen Metod	0.1536	0.4654	0.3118	
0,5 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0014	0.4994	0.4980	24,42
	Önerilen Metod	0.1724	0.5488	0.3764	
0,6 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0040	0.5973	0.5933	14,07
	Önerilen Metod	0.0442	0.5540	0.5098	
0,7 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0040	0.6969	0.6929	8,92
	Önerilen Metod	0.1204	0.7515	0.6311	
0,8 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0034	0.7968	0.7934	2,12
	Önerilen Metod	0.2310	1.0412	0.8102	
0,9 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0012	0.8987	0.8975	20,66
	Önerilen Metod	0.3120	1.0241	0.7121	
1,0 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0012	0.9988	0.9976	13,59
	Önerilen Metod	0.2553	1.1173	0.8620	
2 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0014	1.9985	1.9971	15,28
	Önerilen Metod	0.1922	1.8842	1.6920	

Çizelge 4.4. –devam : Düzenek -5- için dinamik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.

Uygulanan Sinyaller	Kullanılan Yöntem	Düşük Kısım Ortalaması (mm)	Yüksek Kısım Ortalaması (mm)	Toplam Yer Değiştirme Δd (mm)	Bağlı Hata (%)
3 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0017	2.9986	2.9969	11,26
	Önerilen Metod	0.0959	2.7554	2.6595	
4 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0012	3.9987	3.9975	5,52
	Önerilen Metod	0.2081	3.9850	3.7769	
5 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0010	4.9990	4.9980	6,72
	Önerilen Metod	0.0799	4.7418	4.6619	
6 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0016	5.9987	5.9971	4,22
	Önerilen Metod	0.2258	5.9700	5.7442	
7 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0012	6.9988	6.9976	6,77
	Önerilen Metod	0.1493	6.6733	6.5240	
8 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0014	7.9988	7.9974	6,62
	Önerilen Metod	0.1752	7.6433	7.4681	
9 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0012	8.9987	8.9975	4,68
	Önerilen Metod	0.1970	8.7738	8.5768	
10 mm Basamak	Sarsma tablası	-0.0014	9.9987	9.9973	5,09
	Önerilen Metod	0.1377	9.6266	9.4889	

Ayrıca 1,0 mm genliğindeki testlere kadar yüzde bağıl hata değerleri, statik hareket profillerinin karşılaştırıldığı Çizelge 4.3'teki yüzde bağıl hata değerlerine oldukça yakın değerlerde olduğu da görülmektedir. Fakat Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.3'deki 1.0 mm ile 0.5 mm genlik değerleri arasındaki testlerin sonuçlarına bakıldığında,

Çizelge 4.4'teki hata değerlerinin diğer teste göre oldukça düşük kaldığı gözlemlenmiştir. Bu değerlerde 60 fps'li "Düzenek -5-", 30 fps'li "Düzenek -1-"e göre avantajlı kalmaktadır.

Görüntü yenileme hızının 60 fps olduğu Çizelge 4.4'teki özellikle 0.5 mm genlikli testten itibaren 0,4 mm ve 0,3 mm genlikli testlerin bağıl hata oranları, aynı genlik değerlerinde ama 30 fps ile yapılan testlerdeki bağıl hata oranlarından daha düşük çıkmıştır. Bu farkta 60 fps görüntü alma hızında çalışan kamera diğer deney düzeneğinden saniyede 2 kat daha fazla veri almasının rol oynadığı değerlendirilmiştir.

Önerilen sistemin 0,2 ve 0,1 mm genlikli testlerdeki bağıl hata oranı değeri, basamak hareketindeki yüksek ve düşük kısımlar düzgün belirlenemediği için oldukça fazla çıkmıştır. Önerilen sistem bu genliklerde başarılı çalışmamaktadır.

Tez çalışmasındaki kameranın görüntü yenileme sıklığı iki katına çıkartılıp "60 Hz" yapıldığında statik hareket testlerinde yapılan hata seviyesi, 10 mm'den 0,9 mm genlikli testlere kadar 30 fps'li sistemin başarısına benzer olarak karşımıza çıkmaktadır. Fakat 0,9 mm genlikli testlerden 0,3 mm genlikli testlere doğru hata oranı, kadar 30 fps'li sistemin hata oranından çok daha düşük çıkmıştır.

O yüzden bu deney düzeneğindeki duruma, bölüm 4.2'deki sonuçlar incelenerek bakıldığında, 0,9 mm genlik değerinden daha düşük genlik değerlerindeki değişimlerin ölçümündeki hata oranının daha az olması isteniyorsa, daha yüksek fps değerli kamera görüntülerinin alınması ortaya çıkmıştır.

Çizelge 4.5'e bakıldığında, 10 mm tepe genliğinden 0.6 mm tepe genliğine kadar olan sinüzoidal hareket profilleriyle, tezde önerilen sistemin görüntü işleme yazılımından elde edilen hareket profillerinin sonuçlarının normalize çapraz ilinti değeri oldukça yüksek olup, en düşük değer "%83,63" olarak 0,6 mm 1 Hz'lik test verisinde gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.5 : Düzenek -2- için dinamik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.

Uygulanan Sinyaller	Kullanılan Yöntem	1. Periyot Δd (mm)	2. Periyot Δd (mm)	3. Periyot Δd (mm)	4. Periyot Δd (mm)	5. Periyot Δd (mm)	Ortalama Yer Değiştirme Δd (mm)	Hareket Profillerinin Normalize Çapraz İlinti Değeri (%)	FFT Maksimum Genlik (mm)	FFT Frekans Değeri (Hz)	FFT Grafiklerinin Normalize Çapraz İlinti Değeri (%)
0.1 mm_1hz	Sarsma tablası Önerilen Metod	0.1010 0.0681	0.1010 0.071	0.1010 0.059	0.0995 0.0643	0.1010 0.0773	0.1007 0.0679	24.03	0.0629 0.0415	0.8203 0.6972	45.03
0.2 mm_1hz	Sarsma tablası Önerilen Metod	0.2010 0.1426	0.2010 0.1180	0.2010 0.1338	0.2010 0.1490	0.1995 0.1675	0.2007 0.1422	90.79	0.1050 0.0688	1.0195 1.0195	95.97
0.3 mm_1hz	Sarsma tablası Önerilen Metod	0.2990 0.2727	0.2990 0.2941	0.2990 0.3035	0.3005 0.2455	0.2980 0.2515	0.2991 0.2735	91.63	0.1472 0.1091	1.0547 0.9375	93.45
0.4 mm_1hz	Sarsma tablası Önerilen Metod	0.4000 0.3232	0.4000 0.3262	0.4015 0.3379	0.3990 0.3369	0.4000 0.3299	0.4001 0.3308	95.95	0.2169 0.1536	1.0195 1.0195	96.83
0.5 mm_1hz	Sarsma tablası Önerilen Metod	0.5000 0.4339	0.5000 0.4297	0.5000 0.4941	0.5015 0.4199	0.5000 0.4088	0.5003 0.4373	96.88	0.2161 0.1695	0.9375 0.9375	98.89
0.6 mm_1hz	Sarsma tablası Önerilen Metod	0.6000 0.5720	0.5995 0.5731	0.5995 0.5971	0.5995 0.5761	0.5995 0.5407	0.5996 0.5718	83.63	0.2423 0.2084	0.9375 0.9375	96.22
0.7 mm_1hz	Sarsma tablası Önerilen Metod	0.6995 0.6826	0.6995 0.6560	0.6995 0.7131	0.6995 0.7034	0.6985 0.7160	0.6993 0.6942	92.75	0.3305 0.2726	0.9375 0.9375	98.01
0.8 mm_1hz	Sarsma tablası Önerilen Metod	0.7980 0.7263	0.7995 0.7410	0.7995 0.7157	0.7980 0.7188	0.7980 0.7088	0.7986 0.7221	96.65	0.3076 0.3892	0.9375 0.9375	98.44
0.9 mm_1hz	Sarsma tablası Önerilen Metod	0.8965 0.8667	0.8980 0.8291	0.8990 0.8365	0.8980 0.8460	0.8990 0.8046	0.8981 0.8366	99.04	0.4498 0.4007	0.9375 0.9375	99.42

Çizelge 4.5.-devam : Düzenek -2- için dinamik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.

Uygulanan Sinyaller	Kullanılan Yöntem	1. Periyot Δd (mm)	2. Periyot Δd (mm)	3. Periyot Δd (mm)	4. Periyot Δd (mm)	5. Periyot Δd (mm)	Ortalama Yer Değiştirme Δd (mm)	Hareket Profillerinin Normalize Çapraz İlinti Değeri (%)	FFT Maksimum Genlik (mm)	FFT Frekans Değeri (Hz)	FFT Grafiklerinin Normalize Çapraz İlinti Değeri (%)
1.0 mm_1hz	Sarsma tablası	0.9975	0.9975	0.9985	0.9985	0.9985	0.9981	94.99	0.3337	0.9375	97.30
	Önerilen Metod	0.9397	0.9632	0.9617	0.9722	0.9159	0.9505		0.4333	0.9375	
2 mm_1hz	Sarsma tablası	1.9940	1.9940	1.9955	1.9940	1.9930	1.9941	98.07	0.9725	1.0547	98.07
	Önerilen Metod	1.8629	1.8393	1.8161	1.8555	1.8616	1.8471		1.1246	0.9375	
3 mm_1hz	Sarsma tablası	2.9915	2.9905	2.9905	2.9915	2.9900	2.9908	96.37	1.5654	1.0547	96.94
	Önerilen Metod	2.8087	2.8237	2.8493	2.8004	2.7997	2.8164		1.3985	0.9375	
4 mm_1hz	Sarsma tablası	3.9855	3.9865	3.9845	3.9855	3.9875	3.9859	95.04	1.3514	1.0547	96.35
	Önerilen Metod	3.8595	3.8364	3.8546	3.8717	3.8853	3.8615		1.1723	0.9375	
5 mm_1hz	Sarsma tablası	4.9830	4.9820	4.9845	4.9820	4.9840	4.9831	93.07	2.1792	1.0547	96.02
	Önerilen Metod	4.7484	4.7387	4.7493	4.7731	4.7385	4.7496		1.9695	0.9375	
6 mm_1hz	Sarsma tablası	5.9845	5.9815	5.9795	5.9805	5.9805	5.9813	96.71	2.0862	1.0547	97.20
	Önerilen Metod	5.7960	5.8046	5.7924	5.8481	5.8333	5.8149		1.8994	0.9375	
7 mm_1hz	Sarsma tablası	6.9760	6.9755	6.9755	6.9760	6.9755	6.9757	94.62	3.1194	1.0547	97.60
	Önerilen Metod	6.7614	6.7748	6.7809	6.7611	6.7751	6.7707		2.8682	0.9375	
8 mm_1hz	Sarsma tablası	7.9745	7.9745	7.9745	7.9745	7.9745	7.9745	92.12	2.8350	1.0547	94.95
	Önerilen Metod	7.7003	7.7545	7.7012	7.7071	7.6832	7.7093		2.5619	0.9375	
9 mm_1hz	Sarsma tablası	8.9695	8.9720	8.9700	8.9710	8.9685	8.9702	90.57	3.3066	1.0547	98.54
	Önerilen Metod	8.6046	8.5639	8.5504	8.5922	8.5555	8.5733		3.0795	0.9375	
10 mm_1hz	Sarsma tablası	9.9660	9.9660	9.9660	9.9660	9.9660	9.9660	92.73	3.8389	1.0547	96.34
	Önerilen Metod	9.6477	9.6888	9.6740	9.6756	9.6828	9.6738		3.4787	0.9375	

Hareket profili çıktılarının arasındaki bu yüksek benzerlik değeri, Matlab programında üst üste çizdirilen hareket profilleriyle de gözlemlenmiştir. 0,6 mm 1 Hz'lik test verisinin komşuluklarındaki testlere bakıldığında 0,5 mm ve 0,7 mm tepe genlikli değerlerde normalize çapraz ilinti oranı oldukça yüksek çıkmaktadır. Ayrıca 0,6 mm'lik test verisinin Fourier dönüşümü sonrası karşılaştırılan FFT grafiği benzerlik değeri “%96,22” olarak bulunmuştur. Bu test verisinin zaman bölgesindeki normalize çapraz ilinti değerinin düşüklüğün nedeni, önerilen görüntü işleme metodu lazer ışığının parlaklık değerinden etkilendiği, bu testin yapıldığı andaki ortamın parlaklığının aniden değişimi olabileceği şeklinde yorumlanmıştır. 10 mm'den 0,2 mm'ye kadar 0,6 mm'deki test sonucu elendiğinde normalize çapraz ilinti değerinin en düşük başarı oranı “%90,57” olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.5'te asıl dikkat edilmesi gereken normalize çapraz ilinti değerleri, 0,4 mm'lik tepe genlik testlerden itibaren 0,1 mm tepe genlikli testlere kadar olan verilerdir. 0,4 mm'lik tepe genliğine kadar “düzenek -1-”in sonuçlarıyla oldukça benzerlik gösteren değerler 0,4 mm'lik testlerden sonra 0,1 mm'e kadar “%90”ın üzerinde benzerlik oranına sahip olduğu görülmektedir. 0,1 mm tepe genliğindeki testte önerilen sistem başarısız kalmaktadır. Çizelge 4.5'teki 60 fps'li statik test sonuçlarına paralel şekilde 0,4 mm'den sonra sistemin başarısı yüksek kalmıştır.

Ayrıca Çizelge 4.5'te hareket profillerinin FFT grafiklerinin arasındaki benzerliğine bakıldığında, zaman eksenindeki benzerliğe paralel olarak, 10 mm tepe genlikli profillerden itibaren 0,2 mm tepe genlikli hareket profiline kadar benzerlik oranı “%93,45”den düşük olmayıp, benzerlik değeri oldukça yüksektir.

Çizelge 4.5 verilerinde temel olarak “Hareket Profillerinin Normalize Çapraz İlinti Değeri” ve “Hareket Profillerinin Normalize Çapraz İlinti Değeri” sütunları incelendiğinde çalışmada bahsedilen görüntü işleme sistemi, sarsma tablasından uygulanan dinamik hareketleri 0,2 mm tepe genliğine kadar yüksek oranda algılayıp hareket çıktısı olarak üretebilmekte olduğu sonucuna varılabilmektedir.

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.2'nin ortak sonucu olarak kamera hızının 60 fps'ye çıkartılması 1.0 mm'ye kadarki hem statik hemde dinamik sonuçların başarısını çok değiştirmeyip, asıl etkiyi 1.0 mm'den düşük genlikli testlerde göstermiştir. Bu başarı farkı statik testlerde kendisini daha çok göstermektedir. Dolayısıyla kamera görüntüleme hızının yükseltmesi çalışma üzerinde olumlu olduğu değerlendirilmiştir.

4.4 Kamera ile Lazer İşaretçinin Yer Değiştirilmesi Testi

Yapılardaki mesafe değişimi, hareketli bir yapının bu harekete görece sabit bir yerden alınan ölçümüyle hesaplanmaktadır. Birden fazla sensörlerin kullanıldığı yer değişimi ölçümlerinde bile mutlaka bir sensör diğerlerine görece yapının en hareketsiz noktasında olur ve bu nokta hareket hesabı için sıfır noktası yani referans olarak belirlenir.

Tüm yer değiştirme ölçüm sistemlerinde olduğu gibi bu tezde de önerilen sistemle hesaplanan yer değiştirme ölçümü için görecelilik kavramında söz edilebilir. Tezde önerilen sistemle toplam yer değiştirme kavramından bahsedilirken, kamera platformu ya da lazer işaretçiden birisinin diğerine göre sabit olması gerekmektedir. Sabit olan donanım, hareketli olan donanıma göre referans ölçüm olmalıdır ve yer değişimi hesaplanırken sabit olan donanıma görece yer değiştirmeden bahsedilmelidir.

Bu deney düzeneğindeki temel amaç, kamera platformunun veya lazer işaretçinin birbirine göre birinin sabit tutulduğu iki farklı durumda sistemin performansının analiz edilmesi ve değerlendirilmesidir. Çünkü önerilen sistemin gerçek hayatta kullanılmasıyla yapılar üzerinden alınacak yer değiştirme ölçümlerinde yapının tipine göre montaj kolaylığı veya zorluğuyla karşılaşılabilmektedir. Örneğin önerilen görüntü işleme sistemiyle “yüksek katlı bir gökdelenin en üst kattaki bir noktanın yer değiştirmesinin, zemin kattaki bir noktaya göre değişiminin incelenmesi” istendiğinde kamera platformu en üst kata, lazer işaretçi ise zemin kata yerleştirilebilir. Veyahut tam tersine, yapının montaj müsaitliğine bağlı olarak, kamera platformu zemin kata, lazer işaretçi ise gökdelenin en üst katına da yerleştirilebilir. Bu karar o esnada hangi kurumun daha kolay ve hızlı yapılacağına bağlıdır. İşte bu değişik durumlarda düzeneklerinde sistemin başarımlı performansını incelemek bu deneyin yapılmasındaki temel amaçtır. Bu bölümdeki ölçümün yapılması için deney düzeneği aşağıdaki şematikteki ve Resim 4.1’deki gibi yerleştirilmiştir. Bölüm 4.1 ve 4.2’deki ölçüm düzeneğinden farklı olarak bu sefer kamera sarsma tablası üzerine yerleştirilmiş, lazer işaretçi kamera platformunda 2 metre uzaklığa konumlandırılmıştır. Bölüm 4.1 olduğu gibi kameranın çözünürlüğü “2080x1552” piksele ayarlanıp, görüntü yenileme hızı “30 Hz” seçilmiştir.

Kurulum işlemleri tamamlandıktan sonra lazer işaretçi açılıp, sarsma tablasından 0.1 mm tepe genliğinden 10 mm tepe genliğine kadar dinamik hareket profilleri uygulanmıştır.



Resim 4.1 : Kamera hareketli, lazer işaretçi sabit kurulum resmi.

Uygulanan dinamik hareket profilleri esnasında alınan sarsma tablası ve video kamera kayıtları bölüm 3.2 ve 3.3'te anlatılan işlemlerden geçirilip, karşılaştırılmak üzere hareket profilleri çıkartılmıştır. Aşağıda Çizelge 4.6'da hareket profillerinin sonuçlarını içeren karşılaştırma tablosu görülmektedir. Çizelge 4.6'ya bakıldığında, 10 mm tepe genliğinden 0.4 mm tepe genliğine kadar olan sinüzoidal hareket profilleriyle, tezde önerilen sistemin görüntü işleme yazılımından elde edilen hareket profillerinin sonuçlarının normalize çapraz ilinti değeri oldukça yüksek olup, en düşük değer “%85.04” olarak 0.5 mm 1 Hz test verisinde gözlemlenmiştir. 0.4 mm'lik tepe genlik değerinden itibaren benzerlik oranı düşmekte ve 0.1 mm genlikte bu değer “%34,71” ile en düşük seviyesini almaktadır.

Çizelge 4.6 : Düzenek -7- için dinamik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.

Uygulanan Sinyaller	Kullanılan Yöntem	1. Periyot Δd (mm)	2. Periyot Δd (mm)	3. Periyot Δd (mm)	4. Periyot Δd (mm)	5. Periyot Δd (mm)	Ortalama Yer Değiştirme Δd (mm)	Hareket Profillerinin Normalize Çapraz İlinti Değeri (%)	FFT Maksimum Genlik (mm)	FFT Frekans Değeri (Hz)	FFT Grafiklerinin Normalize Çapraz İlinti Değeri (%)
0.1 mm_1hz	Sarsma tablası	0.1025	0.101	0.101	0.1015	0.1015	0,1015	34.71	0.0584	1.0195	48.71
	Önerilen Metod	0.0673	0.072	0.079	0.071	0.081	0,0000		0.0187	0.6875	
0.2 mm_1hz	Sarsma tablası	0.1985	0.1990	0.1995	0.1995	0.1995	0,0000	60.5715	0.109	0.9375	74.63
	Önerilen Metod	0.1841	0.1752	0.1936	0.1676	0.1654	0,0000		0.072	0.9375	
0.3 mm_1hz	Sarsma tablası	0.2995	0.3005	0.3005	0.3005	0.3005	0,3003	57.71	0.1384	1.0195	71.14
	Önerilen Metod	0.2491	0.2617	0.2524	0.2369	0.2556	0,2511		0.1037	0.8473	
0.4 mm_1hz	Sarsma tablası	0,3990	0,3980	0,4000	0,4000	0,4000	0,3994	74,76	0,2518	0,9063	82,15
	Önerilen Metod	0.3944	0.3687	0.3884	0.4021	0.3466	0,3800		0,1487	1,0195	
0.5 mm_1hz	Sarsma tablası	0,5000	0,5000	0,5015	0,5000	0,5015	0,5006	85,04	0,2887	1,0195	94,44
	Önerilen Metod	0.4792	0.4562	0.504	0.4501	0.4453	0,0000		0,2095	1,0195	
0.6 mm_1hz	Sarsma tablası	0,6020	0,6000	0,6010	0,6000	0,6000	0,6006	93,89	0,2959	1,0195	94,61
	Önerilen Metod	0,5619	0,5888	0,5587	0,5518	0,5348	0,5592		0,2234	1,0195	
0.7 mm_1hz	Sarsma tablası	0,6995	0,6995	0,6995	0,6995	0,6995	0,6995	88,36	0,2694	1,0195	90,22
	Önerilen Metod	0,6449	0,6146	0,6435	0,6521	0,6351	0,6380		0,3311	0,9063	
0.8 mm_1hz	Sarsma tablası	0,7990	0,7990	0,7990	0,7990	0,7990	0,7990	88,58	0,3226	0,9063	90,78
	Önerilen Metod	0,7677	0,7629	0,7847	0,7850	0,7748	0,7750		0,2838	1,0195	
0.9 mm_1hz	Sarsma tablası	0,8980	0,8980	0,8990	0,8990	0,8980	0,8984	94,35	0,5036	1,0195	96,98
	Önerilen Metod	0,8609	0,8520	0,8534	0,8487	0,8333	0,8497		0,4602	1,0195	

Çizelge 4.6-devam : Düzenek -7- için dinamik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.

Uygulanan Sinyaller	Kullanılan Yöntem	1. Periyot Δd (mm)	2. Periyot Δd (mm)	3. Periyot Δd (mm)	4. Periyot Δd (mm)	5. Periyot Δd (mm)	Ortalama Yer Değişirme Δd (mm)	Hareket Profillerinin Normalize Çapraz İlti Değeri (%)	FFT Maksimum Genlik (mm)	FFT Frekans Değeri (Hz)	FFT Grafiklerinin Normalize Çapraz İlti Değeri (%)
1.0 mm_1hz	Sarsma tablası	0,9975	0,9965	0,9975	0,9990	0,9975	0,9976	96,73	0,5698	1,0195	98,48
	Önerilen Metod	0,9316	0,9148	0,9522	0,9229	0,9677	0,9378		0,5035	1,0195	
2 mm_1hz	Sarsma tablası	1,9955	1,9940	1,9955	1,9955	1,9955	1,9952	97,45	1,0655	1,0195	98,23
	Önerilen Metod	1,9507	2,0627	1,9711	1,9045	1,9402	1,9658		1,0232	1,0195	
3 mm_1hz	Sarsma tablası	2,9890	2,9915	2,9905	2,9915	2,9915	2,9908	94,59	1,5528	1,0195	97,95
	Önerilen Metod	2,8829	2,8441	2,8502	2,8615	2,8653	2,8608		1,4663	1,0195	
4 mm_1hz	Sarsma tablası	3,9865	3,9865	3,9840	3,9865	3,9865	3,9860	98,12	1,9346	1,0195	99,43
	Önerilen Metod	3,8234	3,8824	3,8578	3,8395	3,8610	3,8528		1,8449	1,0195	
5 mm_1hz	Sarsma tablası	4,9830	4,9830	4,9830	4,9815	4,9815	4,9824	95,34	3,0542	1,0195	97,49
	Önerilen Metod	4,8657	4,8855	4,8677	4,8509	4,8537	4,8647		2,9679	1,0195	
6 mm_1hz	Sarsma tablası	5,9795	5,9795	5,9805	5,9805	5,9795	5,9799	93,98	3,0797	1,0195	94,59
	Önerilen Metod	5,8122	5,8065	5,8403	5,8441	5,8114	5,8229		3,0378	1,0195	
7 mm_1hz	Sarsma tablası	6,9805	6,9795	6,9770	6,9795	6,9780	6,9789	95,76	3,5919	1,0195	96,82
	Önerilen Metod	6,8011	6,8372	6,8310	6,8651	6,8171	6,8303		3,5116	1,0195	
8 mm_1hz	Sarsma tablası	7,9730	7,9745	7,9745	7,9720	7,9770	7,9742	98,33	4,3228	1,0195	98,54
	Önerilen Metod	7,8106	7,8134	7,7881	7,7763	7,8263	7,8029		4,1989	1,0195	
9 mm_1hz	Sarsma tablası	8,9685	8,9695	8,9680	8,9670	8,9680	8,9682	96,02	4,5936	1,0195	98,03
	Önerilen Metod	8,7619	8,7600	8,7570	8,7918	8,7615	8,7664		4,4773	1,0195	
10 mm_1hz	Sarsma tablası	9,9685	9,9650	9,9660	9,9660	9,9645	9,9660	98,71	4,5866	1,0195	98,82
	Önerilen Metod	9,7484	9,7473	9,7871	9,8050	9,7540	9,7684		4,4490	1,0195	

Ayrıca Çizelge 4.6’da hareket profillerinin FFT grafiklerinin arasındaki benzerliğine bakıldığında, zaman eksenindeki benzerliğe paralel olarak, 10 mm tepe genlikli profillerden itibaren 0,4 mm tepe genlikli hareket profiline kadar benzerlik oranı “%82.15”ten düşük olmayıp, benzerlik değeri yüksektir. Fakat normalize çapraz ilinti sonuçlarına paralel şekilde, 0,4 mm tepe genlikli hareket profilinden itibaren, fourier dönüşümü sonucu oluşan grafikler arası benzerliklerde düşüş görülmektedir. Ayrıca önerilen görüntü işleme ile çıkartılan hareket profillerinin 0,4 mm’den düşük profillerin FFT’leri arasındaki benzerliği, 0,4 mm’den yüksek genlikli profillerdeki kadar başarıyla oluşturulamamaktadır.

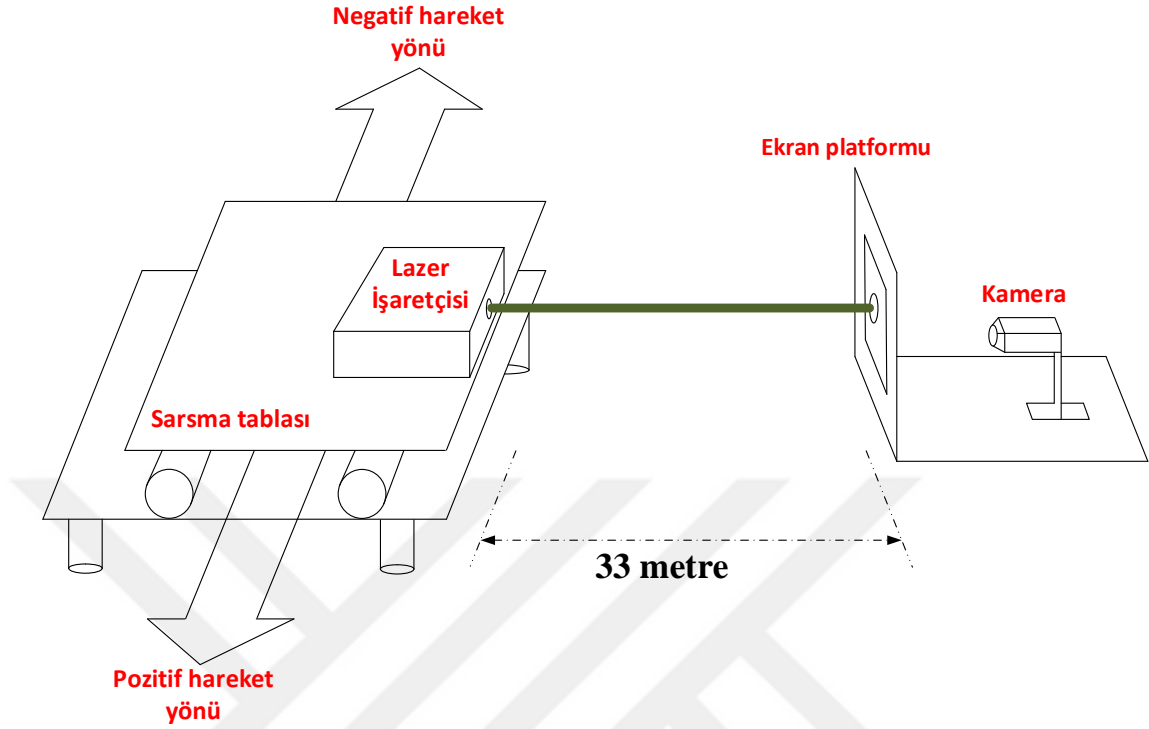
Çizelge 4.6 verileri ile Çizelge 4.2 verileri karşılaştırıldığında, normalize çapraz ilinti değerlerinin birbirine yakın olduğu, aradaki farkların dikkat çekecek seviyede olmadığı görülmüştür. Bu karşılaştırma sonucunda önerilen görüntü işleme yazılımında, hareketli sistemin lazer işaretçi yerine kamera platformu olması sistemin performansına olumlu veya olumsuz bir etki yaratmadığı değerlendirilmiştir.

4.5 Kamera Platformu İle Lazer İşaretçi Arası Mesafeye Göre Sistemin Performansının Analizi

Bu bölümde tezde önerilen görüntü işleme metodunun gerçek hayatta kullanımı esnasında, kamera platformu ile lazer işaretçi arası mesafe değişkenlik gösterebilmektedir. Bu değişkenliğin ise sistemin performansını etkileyebileceği düşünülmektedir. Bu yüzden bu analiz çalışmasında kamera ile platform arasındaki mesafenin değişiminin sistemin performansını nasıl değiştirdiğine yönelik testler yapılmıştır. Kamera platformu, lazer işaretçi ile arasındaki mesafe yaklaşık “33 metre” olacak şekilde konumlandırılarak Şekil 4.2’deki test düzeneği oluşturulmuştur. Daha sonra sarsma tablasından Bölüm 4.2’de anlatılan 0,1 mm’den 10 mm’ye kadar statik hareket profilleri uygulanmıştır. Görüntü işleme yönteminden çıkan sonuçlar Bölüm 3.3.2’de anlatılan yöntemler kullanılarak Çizelge 4.7 oluşturulmuştur. Bu sonuçlar kamera ile lazer işaretçi arasındaki mesafenin 2 metre olduğu Bölüm 4.3’deki sonuçlar ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Lazer işaretçi Şekil 4.2’de gösterildiği gibi sarsma tablası üzerine monte edilmiştir. Kamera platformu lazer işaretçiden yaklaşık 33 metre uzağa konumlandırılmıştır.

Daha sonra lazer işaretçinin pozisyonu HMC5883L manyeto ölçer sensörüyle ölçülüp, tablanın kuzeyle yaptığı açının yaklaşık “195” derece olduğu kaydedilmiştir.



Şekil 4.2 : Kamera platformu lazer işaretçi arası 33 metre olduğu deney düzeneği.

Kamera platformunun doğrultusu ise bu açı derecesine karşılık gelecek şekilde üç ayak (tripod) ile ayarlanıp sabitlenmiştir. Daha sonra dijital kameranın çözünürlüğü “2080x1552” piksele ayarlanıp, görüntü yenileme hızı “60 Hz” seçilmiştir. Bölüm 4.2’deki profillere benzer şekilde sarsma tablasından 0,1 mm yer değişimi farkından başlayarak, 10 mm’ye kadarki basamak profilli statik yer değişimleri uygulanmıştır. Görüntü işleme yönteminden alınan sonuçların ve sarsma tablası kayıtlarının işlenmesiyle aşağıdaki çizelge oluşturulmuştur. Çizelge 4.7’ye ilk bakıldığında diğer analizlerdeki sonuçlara benzer şekilde uygulanan hareketin genlik değeri düştükçe yüzde bağıl hata oranı artmaktadır. 10 mm’den 3 mm genlik değerine kadar ölçülen hata oranları birbirine benzer seviyelerde olup, maksimum hata seviyesi “%10,27” ile 10 mm’lik yer değişiminde görülmüştür. Yine Çizelge 4.7’ye bakıldığında 3 mm’den 0,5 mm’ye kadar olan testlerde hata oranı gitgide artmaktadır. 0,5 mm’den sonra hata “%100” seviyelerinin üzerine çıktığı sonuçlar görülmektedir. Bu değerlerde önerilen görüntü işleme metodu belirtilen kamera platformu-lazer işaretçi arası mesafede anlamlı sonuçlar üretememektedir.

Çizelge 4.7 : Düzenek -8- için statik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.

Uygulanan Sinyaller	Kullanılan Yöntem	Düşük Kısım Ortalaması (mm)	Yüksek Kısım Ortalaması (mm)	Toplam Yer Değiştirme Δd (mm)	Bağıl Hata (%)
0.1 mm Basamak	Sarsma tablası	0,0014	0,0984	0,0970	116,19
	Önerilen Metod	0,3634	0,3477	-0,0157	
0.2 mm Basamak	Sarsma tablası	0,0013	0,1988	0,1975	100,51
	Önerilen Metod	0,1361	0,1351	-0,0010	
0.3 mm Basamak	Sarsma tablası	0,0011	0,2975	0,2964	89,41
	Önerilen Metod	0,2077	0,2391	0,0314	
0.4 mm Basamak	Sarsma tablası	0,0012	0,3981	0,3969	124,01
	Önerilen Metod	0,3866	0,2913	-0,0953	
0.5 mm Basamak	Sarsma tablası	0,0011	0,4999	0,4988	104,45
	Önerilen Metod	0,3732	0,3510	-0,0222	
0.6 mm Basamak	Sarsma tablası	0,0013	0,6002	0,5989	62,40
	Önerilen Metod	0,2975	0,5227	0,2252	
0.7 mm Basamak	Sarsma tablası	0,0011	0,6999	0,6988	88,94
	Önerilen Metod	0,2797	0,3570	0,0773	
0.8 mm Basamak	Sarsma tablası	0,0011	0,7990	0,7979	50,07
	Önerilen Metod	0,3184	0,7168	0,3984	
0.9 mm Basamak	Sarsma tablası	0,0011	0,8987	0,8976	29,84
	Önerilen Metod	0,2305	0,8603	0,6298	
1.0 mm Basamak	Sarsma tablası	-0,0013	0,9984	0,9971	38,32
	Önerilen Metod	0,1642	0,7792	0,6150	

Çizelge 4.7-devam : Düzenek -8- için statik hareket profili sonuçları ve karşılaştırma tablosu.

Uygulanan Sinyaller	Kullanılan Yöntem	Düşük Kısım Ortalaması (mm)	Yüksek Kısım Ortalaması (mm)	Toplam Yer Değişirme Δd (mm)	Bağlı Hata (%)
2 mm Basamak	Sarsma tablası	-0,0017	1,9988	1,9971	24,68
	Önerilen Metod	0,3300	1,8342	1,5042	
3 mm Basamak	Sarsma tablası	-0,0011	2,9987	2,9976	18,81
	Önerilen Metod	0,3162	2,7499	2,4337	
4 mm Basamak	Sarsma tablası	-0,0013	3,9990	3,9977	8,89
	Önerilen Metod	0,1717	3,8140	3,6423	
5 mm Basamak	Sarsma tablası	-0,0016	4,9987	4,9971	10,01
	Önerilen Metod	0,3917	4,8886	4,4969	
6 mm Basamak	Sarsma tablası	-0,0015	5,9989	5,9974	7,06
	Önerilen Metod	0,1963	5,7700	5,5737	
7 mm Basamak	Sarsma tablası	-0,0015	6,9985	6,9970	8,06
	Önerilen Metod	0,0720	6,5049	6,4329	
8 mm Basamak	Sarsma tablası	-0,0011	7,9988	7,9977	7,90
	Önerilen Metod	0,3614	7,7273	7,3659	
9 mm Basamak	Sarsma tablası	-0,0011	8,9985	8,9974	5,82
	Önerilen Metod	0,1451	8,6191	8,4740	
10 mm Basamak	Sarsma tablası	-0,0013	9,9991	9,9978	10,27
	Önerilen Metod	0,4731	9,4437	8,9706	

Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.3 verileri doğrultusunda, kamera platformu ile lazer işaretçinin arasındaki mesafenin 2 metreden 33 metreye çıkartıldığında, 10 mm genlik değerinden 1 mm genlik değerine kadar olan hata oranları artış eğilimi gösterip, kimi testlerde neredeyse iki katına çıkmaktadır. Fakat 10 mm'den 3 mm'ye kadar hata oranı nispeten kabul edilebilir seviyede görülmektedir. 1 mm'den düşük testlerde ise hata oranı oldukça artıp 0,5 mm'den sonra ise hata oranı “%100”ün üstüne çıkmakta olup, alternatif yer değişimi metodlarına göre kabul edilebilir bir seviyede değildir.

Bu test sonrasında kayıtlı videolar incelendiğinde, kamera platformuna düşen lazer ışının parlaklık miktarının, aynı video kaydı içerisinde anlık değişimler gösterdiği görülmüştür. Yani kamera platformuna düşen yeşil lazer ışığının alanı bazı çevresel faktörlerden dolayı değişmektedir. Örneğin, kamera platformuna bir nesnenin gölgesinin düşmesi, lazer ışınının oluşturduğu yeşil bölgenin miktarını değiştirmektedir. Tam tersine, kamera platformuna düşen güneş ışını miktarı arttıkça yeşil bölge miktarı artmaktadır. Çünkü gün ışığı içerisinde tüm renk bileşenleri içerdiğinden görüntü işleme yöntemi, ekran platformuna düşen lazerin yeşil ışık miktarından daha fazla miktarda yeşil ışık düştüğünü sanmaktadır. Dolayısıyla görüntü karesindeki parlaklık merkezinin değeri bir önceki video çerçevesinden çok farklı çıkmaktadır.

Ekran platformuna düşen yeşil renkli lazer ışının alanını değiştiren bir diğer faktör ise kamera platformu ile lazer işaretçi arası mesafenin artırılmasından dolayı, kamera platformuna ulaşan lazer ışını miktarının azalmasıdır. Örneğin Bölüm 4.1 ve 4.2 de yapılan 2 metre mesafeli testlerde, Bölüm 3.2.2 de anlatılan belirli bir eşik değerinin üstündeki yeşil renkli bölge tespiti sonucunda ortaya çıkan piksel sayısı belirli bir büyüklükteyken, kamera platformu-lazer işaretçi arası “33 metre” yapıldığında aynı eşik değerini aşan piksellerin sayısında dört kata varan düşmeler görülmüştür. Bu düşüşün sonucunda, görüntü işleme yönteminin hataya yatkınlığı artırmaktadır. Çünkü mesafe arttıkça lazer ışınlarının etrafa saçılması artıp, kamera platformuna ulaşan lazer ışını sayısı azalmaktadır. Hatanın değerlerinin yükselmesinin nedenlerinden birisinin bu olduğu düşünülmektedir.

Bu deney düzeneğinde testler yapılırken ortamdaki ışık miktarı değişikliğinin etkisini minimuma indirmek için aydınlık ve güneşli havada denemeler yapılmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, Şekil 4.1’de gösterilmekte ve Bölüm 3.2 de detaylarıyla anlatılmakta olan dijital kamera ve lazer işaretleyici kullanılarak görüntü işleme yöntemiyle yer değiştirmenin ölçülmesi yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemin performansı, kurulan çeşitli deney düzenekleriyle ve çeşitli genliklerde uygulanan statik ve dinamik hareketlere karşı analiz edilmiştir. Yapılan testler ve değerlendirmeler sonucunda önerilmekte olan metodun, çok hassas hareket değişimlerini gerçekleştirebilen sarsma tablasının yer değişimi hareketlerini büyük benzerlikle ölçebildiği görülmüştür. Böylece önerilen yöntemle yüksek katlı yapıların yer değiştirmesinin ölçülebilmesi için mevcut literatürde olan yer değişimi ölçüm sistemlerine göre daha kolay kurulum yapılabilen, daha ekonomik, kurulumu esnasında yapıya daha az zarar veren ve daha az sayısal işlem gerektiren bir alternatif sistem olarak kullanılabilmesi değerlendirilmektedir.

Önerilmekte olan yöntemin başarımı, bazı konular üzerinde yapılacak geliştirmelerle daha da artabileceği öngörülmektedir. Bu konulardan birisi piksel-mm dönüşümünü esnasında kullanılan dönüşüm parametresinin çıkarımında daha farklı ve başarılı bir yöntemin kullanılmasıdır. Böylece dijital kamera ve kamera lensi arasındaki küçük uyumsuzlukların, kalibrasyon parametresine olan etkisi minimuma indirilecek ve görüntüdeki balık gözü etkisi yok edilebilecektir.

Sistemin performansının iyileştirilmesi için önerilen bir diğer parametre ise kamera çözünürlüğünün artırılmasıdır. Kamera çözünürlüğü artırıldığında, görüntülerdeki 1 mm’lik yer değişime karşılık denk gelen piksel sayısı artacağından sistemin yer değişimi fark edilebilirliği artacaktır.

Bahsedilen görüntü işleme yöntemi, kameradan toplanan kayıtların sonradan işlenmesi (post process) yöntemiyle çalışmaktadır. Bölüm 3.2’de bahsedilen işlemlerin bir elektronik donanıma gömülerek yüksek işlem kapasiteli bir işlemciye yaptırılmasıyla, yapıların hareket profilleri gerçek zamanlı olarak hesaplanıp, gözlem yapılabilir. Böylelikle önerilen sistemin kullanılabilirliği çok daha artıp, pratikliği bakımından diğer yöntemlere göre bir adım daha öne çıkacaktır.

Tezde sunulan sistemde geliştirilmesiyle yöntemin başarısının artacağı bir diğer konu ise kamera platformunun içerisinde bulunan kamera, ekran ve kamera lensinin daha sıkı bir yapıda birbirine ve hareketli yapıya monte edilmesidir. Böylece lazer işaretçiden meydana gelebilecek en ufak bir değişim bile kamera platformu tarafından algılanabilir hale gelebilecektir.

Sunulan görüntü işleme metodundaki kamera platformuna düşen lazer ışını miktarının; ortamdaki ışık miktarına, lazer işaretçi kaynağının gücüne, kamera platformu ile lazer kaynağının arasındaki mesafeye göre değiştiği gözlemlenmiştir. Eğer lazer işaretçinin gücü yeterli seviyede değilse, kamera platformuna düşen yeşil renkli bölge miktarı azalmaktadır. Bu durumda sistemin performansı ortamdaki ışık miktarı değişikliğinden oldukça fazla etkilenmektedir. Anlık ışık değişimleri, cisim gölgeleri bile platform üzerine düşen ışın miktarını değiştirmektedir. Benzer şekilde ortamdaki ışık miktarının fazla olması da (örneğin güneşli ve açık bir havada sistemin çalıştırılması) lazer ışını bölgesinin miktarını değiştirebilmektedir. Bu gibi çevresel etmenler yazılımın performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu gibi çevresel etmenlerin yazılımın performansına olan etkisini azaltmak için, kamera platformu lazer işaretçi arası mesafe uzadıkça Bölüm 3.2.2’de anlatılan yeşil bölgenin tespiti için kullanılan eşik değeri azaltılabilir. Böylece daha az lazer ışınının ekran platformuna ulaşması durumunda daha düşük eşik değeri kullanılacağı için eşik değerinin aşan piksellerin sayısı korunabileceği düşünülmektedir. Bu sayede sistemin başarısı artırılıp, kamera platformu-lazer işaretçi arası mesafenin artırıldığı yer değişiminin ölçümü uygulamalarda kullanılabilirliği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Antonelli, K., Ko, J., Ku, S.,** *Resistive Displacement Sensor*, In J. G. Webster (Ed.), *Displacement Measurement, Linear and Angular: Vol.1.*, CRC Press, (1999).
- Arraigada, M., Part, M.,**(2006). Calculation of displacements of measured accelerations, analysis of two accelerometers and application in road engineering, *Proceedings of 6th Swiss Transport Research Conference*, Monte Verità / Ascona, Swiss, March 15-17.
- Brownjohn, J.M.W., Koo, K.Y., Battista, N.D.,** *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*, In M. L. Wang, J. P. Lynch, H. Sohn (Ed.), *Sensing solutions for assessing and monitoring bridges: Vol.1. (Sf.207)*, New York, Elsevier, (2014).
- Bultan, A.,**(2009).Fourier Dönüşümü, *Elektronik Mühendisliği*, 380, 109-118.
- Celebi, M.,** (2000) GPS in pioneering dynamic monitoring of long-period structures, *Soil. Dyn. Earthquake Eng.* 20, 477–483
- Chang C., Ji Y,** (2007).Flexible videogrammetric technique for three-dimensional structural vibration measurement. *J Eng Mechead*, 133, 656–64.].
- Choi, H.S., Cheung, J.H., Kim, S.H., Ahn, J.H.,**(2011).Structural dynamic displacement vision system using digital image processing, , *NDT&E International*, 44, 597-608.
- Dong, Y., Song, R.,** *Bridges Structural Health Monitoring and Deterioration Detection-Synthesis of Knowledge and Technology, PhD thesis*, Alaska University Transportation Center, Alaska, (2010).
- F. Moschas, A. Avallone, V. Saltogianni, S.C. Stiros.,**(2014). Strong motion displacement waveforms using 10-Hz precise point positioning GPS: an assessment based on free oscillation experiments, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43, 12:1853-12:1866.
- Feng, D., Feng, M.Q., Ozer, E., Fukuda, Y.,**(2015). A vision-based sensor for noncontact structural displacement measurement, *Sensors*, 15, 16557-16575.
- Gastineau, A., Johnson, T., Schultz, A.,** *Bridge Health Monitoring and Inspections – A Survey of Methods, Final Report*, University of Minnesota, Minnesota, (2009).
- Gentile, C.,**(2001). Radar-based measurement of deflections on bridges and large structures: advantages, limitations and possible applications, *Proceedings of IV ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials*, Milan, Italy, March 4-8.

- Goyal, D., Pabla, B.S.,**(2016). Development of non-contact structural health monitoring system for machine tools, *Journal of Applied Research and Technology*, 14, 245-258.
- Han, H., Wang, J., Meng, X., Liu, H.,**(2016). Analysis of the dynamic response of a long span bridge using GPS/accelerometer/anemometer under typhoon loading, *Engineering Structures*, 122, 238–250.
- Hong, K., Huang, H., Fu, Y., Zhou, J.,**(2016).A vibration measurement system for health monitoring of power transformers, *Measurement*, 93, 135–147.
- Hu, N., Dai, G.L., Yan, B., Liu, K.,**(2014).Recent development of design and construction of medium and long span high-speed railway bridges in China, *Engineering Structures*, 74, 233–241.
- Hu, W.,H., Thöns, S., Rohrmann, R.G., Said, S., Rücker, W.,**(2015). Vibration-based structural health monitoring of a wind turbine system Part II: Environmental/operational effects on dynamic properties, *Engineering Structures*, 89, 273–290.
- Hwang, J., Yun, H., Park, S.K., Lee, D., Hong, S.,**(2012). Optimal Methods of RTK-GPS/Accelerometer Integration to Monitor the Displacement of Structures, *Sensors*, 12, 1014-1034.
- Hyzak M., Tucker C., Duff K.,**(1997).GPS Networks for Structural Monitoring: From Highway Bridges to Mach 10 Rails, Applied Research Laboratories, University of Texas at Austin, 205.
- Ji Y, Zhang Q.,** (2012). A novel image-based approach for structural displacement measurement. IABMAS'12 – Bridge maintenance, safety, management, resilience and sustainability. Dubrovnik, Croatia;. p. 407–14.
- Ji YF and Chang CC.,**(2008). Nontarget Image-Based Technique for Small Cable Vibration Measurement. *Journal of Bridge Engineering*. 13(1). pp.34-42.
- Jo H, Sim S, Tatkowski A, Spencer B, Nelson M.,**(2012). Feasibility of displacement monitoring using low-cost GPS receivers. *Struct Control Health Monit.*
- Jung W, Shin D, Woo S, Park W, Kim S.,**(2011). Hibrid approach of cameras and GPS for displacement measurements of super long-span bridges. 28th Congress of the international association for automation and robotics in construction. Seoul, Korea.
- Kano Y., Hasebe S., Huang C., Yamada, T.,**(1989) New type of linear variable differential transformer position transducer, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 38 407-409.
- Kavitha, S., Daniel, R.J., Sumangala, K.,**(2015). High performance MEMS accelerometers for concrete SHM applications and comparison with COTS accelerometers, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 66-67, 410–424.

- Kavitha, S., Daniel, R.J., Sumangala, K.,**(2016). Design and Analysis of MEMS Comb Drive Capacitive Accelerometer for SHM and Seismic Applications, *Measurement*, 93, 327–339.
- Khuc, T.,**(2016).Computer Vision Based Structural Identification Framework for Bridge Health Monitoring, *PhD thesis*, University of Central Florida, Florida.
- Kim KY and Kwak MK.,**(2005). Measurement of Large-amplitude and Low-frequency Vibrations of Structures Using the Image Processing Method. *Journal of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering*. 15(3). pp. 338-341.
- Kim, S.W., Kim N.S.,**(2011). Multi-point Displacement response measurement of civil infrastructures using digital image Processing, *Procedia Engineering*, 14, 195–203.
- Knecht, A., Manetti, L.,**(2001). Using GPS in structural health monitoring, *Proceedings of SPIE'S 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach (CA), USA, March 4-8.
- Ko, J.M., Ni, Y.Q.,**(2005).Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges, *Engineering Structures*, 27, 1715–1725.
- Kwon SD, Lee JW, Doh YS, Kim JH.,**(2002). Measurement of Bridge Vibrations by Digital Image Processing. Annual Conference Korean Society of Civil Engineers. pp. 338-341.
- Leach, R.K.,** *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology*, In R. K. Leach (Ed.), *Displacement Measurement: Vol.5.* (Sf. 96), New York, Elsevier, (2014).
- Lee J, Cho S, Shinozuka M, Yun C, Lee C, Lee W.,**(2006b) Evaluation of bridge load carrying capacity based on dynamic displacement measurement using realtime image processing techniques. *Steel Struct* 6,377–85.
- Lee J, Oh J, Park M, Kwon S, Kwark J.,**(2006c) Bridge displacement measurement system using image processing. IABMAS'06 – Bridge maintenance, safety, management, resilience and sustainability. Porto, Portugal;.
- Lee, J.J., Shinozuka, M.,**(2006a).A vision-based system for remote sensing of bridge displacement, *NDT&E International*, 39, 425–431.
- Lowry A., McLeod R.,**(1997).PMos: A real time precise DGPS continuous deformation monitoring system, SAGEM Australasia Pty Ltd
- Maekawa, A., Noda, M., Shintani, M., Suzuki, M.,**(2016).Development of noncontact measurement methods using multiple laser displacement sensors for bending and torsional vibration stresses in piping systems, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 137, 38-45.
- Mazen Wahbeh, A., Caffrey, J.P., Masri, S.F.,**(2004).Direct measurement of displacements in vibrating structures through vision-based approaches, *Emirates Journal for Engineering Research*, 9, 105-110.

- McCullagh, J.J., Galchev, T., Peterson, R.L., Gordenker, R., Zhang, Y., Lynch, J., Najafi, K.,**(2014).Long-term testing of a vibration harvesting system for the structural health monitoring of bridges, *Sensors and Actuators A*, 217, 139–150.
- Mesko, M., Toth, S.,**(2013).Laser spot detection, *Journal of Information, Control and Management Systems*, 11, 35-42.
- Moschas F., S. Stiros.,**(2011). Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer, *Eng. Struct.*, 33, 1:10–1:17.
- Nakamura S.,**(2000) GPS measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements. *J Struct Eng* 126, 1413–9.
- Newman, E.S.,**(2010).Piezoelectric accelerometers in structural health monitoring, *SERG*, 10, 1-19.
- Oetgen, M.E., Goodley, A., Yoo, B., Pines, D.J., Hsieh, A.H.,**(2016).Ultrasonic structural health monitoring to assess the integrity of spinal growing rods in vitro, *Spine Deformity*, 4, 65-69.
- Olaszek, P.,**(1999).Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method, *Measurement*, 25, 227–236.
- Parali, L., Pechousek, J., Sabikoglu, I., Novak, P., Navarik, J., Vutjek, M.,**(2016).A digital measurement system based on laser displacement sensor for piezoelectric ceramic discs vibration characterization, *Optik*, 127, 84–89.
- Park, J.W., Lee, J.J., Jung H.J., Myung, H.,**(2010).Vision-based displacement measurement method for high-rise building structures using partitioning approach, *NDT&E International*, 43, 642-647.
- Park, K.T., Kim, S.H., Park, H.S., Lee, K.W.,**(2005). The determination of bridge displacement using measured acceleration, *Engineering Structures*, 27, 371–378.
- Park, S.W., Park, H.S., Kim, J.H., Adeli, H.,**(2015).3D displacement measurement model for health monitoring of structures using a motion capture system, *Measurement*, 59, 352–362.
- Praher, B., Steinbichler, G.,**(2016). Ultrasound-based measurement of liquid-layer thickness: A novelttime-domain approach, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 82, 166-177.
- Ribeiro, D., Calçada, R., Ferreira, J., Martins, T.,**(2014).Non-contact measurement of the dynamic displacement of railway bridges using an advanced video-based system, *Engineering Structures*, 75, 164–180.
- Santhosh, K.V., Roy, B.K.,**(2011). A smart displacement measuring technique using linear variable displacement transducer, *Procedia Technology*, 4, 854–861.
- Santos, C.A., Costa, C.O., Batista, J.,**(2016).A vision-based system for measuring the displacements of large structures: Simultaneous adaptive calibration

and full motion estimation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 72-73, 678–694.

Son, K.S., Jeon, H.S., Park, J.H., Park, J.W.,(2015).Vibration displacement measurement technology for cylindrical structures using camera images, *Nucl Eng Technol*, 47, 488-499.

Stephen G., Brownjohn J., Taylor C.,(1993). Visual monitoring of the Humber bridge. *Eng Struct*, 15, 197–208.

Thong-un, N., Hirata, S., Orino, Y., Kuribayashi Kurosawa, M.,(2015).A linearization-based method of simultaneous position and velocity measurement using ultrasonic waves, *Sensors and Actuators A*, 233, 480–499.

Vanlanduit, S., Guillaume, P., Van Der Linden, G.,(2003).On-line monitoring of fatigue cracks using ultrasonic surface waves, *NDT&E International*, 36, 601–607.

Wahbeh AM, Caffrey JP, Masri SF. (2003) A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating systems. *Smart Mater Struct*;12:785–94.

Wu, H., Zhang, X., Gan, J., Li, H., Ge, P.,(2016). Displacement measurement system for inverters using computer micro-vision, *Optics and Lasers in Engineering*, 81, 113–118.

Xie, L., Qiu, Z.C., Zhang, X.M., (2016). Vibration control of a flexible clamped-clamped plate based on an improved FULMS algorithm and laser displacement measurement, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 75, 209–227.

Yapar, O., Basu, P.K., Volgyesi, P., Ledeczki, A.,(2015).Structural health monitoring of bridges with piezoelectric AE sensors, *Engineering Failure Analysis*, 56, 150–169.

Ye, X.W., Yi, T.H., Dong, C.Z., Liu, T.,(2016).Vision-based structural displacement measurement: System performance evaluation and influence factor analysis, *Measurement*, 88, 372–384.

Yigit, C.O., Coskun, M.Z., Yavasoglu, H., Arslan, A., Kalkan, Y., (in press).The potential of GPS precise point positioning method for point displacement monitoring: a case study, *Measurement*. 2015.

Url-1<<https://wilcoxon.com/wp-content/uploads/2016/07/Measuring-displacement-using-accelerometers-1.pdf>>, alındığı tarih:27.03.2018.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Cem Mortaş
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 03/06/1989
E-posta : cem_mortas@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölüm

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2014-2016	Teknik Destek Grubu Bilimsel Ölçme Ltd. Şti.	Donanım Ar-Ge Mühendisi
2016-Halen	Roketsan A.Ş.	Aviyonik Sistem Mühendisi

YABANCI DİL: İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN SUNUMLAR

- **Mortaş, C.**, Demirci, F., Gürbüz, Z., Eroğul, O., 2016. Measuring of displacement with image processing methods by using digital camera and laser pointer, Proceedings of 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU), May 16-19, Zonguldak, Turkey.