

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS
PROGRAMI**

**NANOMETRE HASSASİYETİNDE ROBOTİK TAŞIMA SİSTEMİ
TASARIMI**

HAZIRLAYAN

SİNAN KÖKSU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2022

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS
PROGRAMI**

**NANOMETRE HASSASİYETİNDE ROBOTİK TAŞIMA SİSTEMİ
TASARIMI**

HAZIRLAYAN

SİNAN KÖKSU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. SEDAT NAZLIBİLEK

ANKARA - 2022

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı Sinan KÖKSU tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 04 / 01 / 2022

Tez Adı: NANOMETRE HASSASİYETİNDE ROBOTİK TAŞIMA SİSTEMİ TASARIMI

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Prof.Dr. Hasan Şakir BİLGE , Gazi Üniversitesi

.....

Prof.Dr. Sedat NAZLIBİLEK, Başkent Üniversitesi

.....

Dr.Öğr.Üyesi Murat ÜÇÜNCÜ, Başkent Üniversitesi

.....

ONAY

Ömer Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... / 2022

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 28/01/ 2022

Öğrencinin Adı, Soyadı: Sinan KÖKSU

Öğrencinin Numarası: 21920157

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Prof.Dr Sedat NAZLIBİLEK

Tez Başlığı: Nanometre Hassasiyetinde Robotik Taşıma Sistemi Dizaynı

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 78 sayfalık kısmına ilişkin, 28 / 01 / 2022 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %5'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: ... / ... / 2022

Öğrenci Danışmanı Unvan, Ad, Soyad, İmza:

.....

TEŐEKKÖR

Bu tez çalışmasının ortaya çıkmasında büyük emeği olan, tecrübe ve zamanını benimle paylaşarak yol gösterici olan değerli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Sedat Nazlıbilek hocama ;

Hayatım boyunca bana her konuda maddi ve manevi destek veren, bugünlere gelmemi sağlayan aileme; sonsuz teşekkür ederim.



ÖZET

Bu tez kapsamında nanometre hassasiyetinde istenen değerde doğrusal biçimde bir uzama hareketi yapabilen doğrusal bir piezoelektrik motor sistemi ve denetimi için piezoelektrik eyleyici tasarlanmıştır. Bu çalışmada sadece maddenin hareketinin mikroskop görüntüleri ile ölçülmesi ve istenilen konuma gelip orada kalabilecek kadar kararlı bir denetleyici tasarımı olacaktır.

Nanometre hassasiyetinde bir motorun tasarlanması için Piezoelektrik madde kullanılmalıdır. Diğer tür motorlarda istenilen hassasiyetin yakalanması piezoelektrik maddeye göre çok daha zordur. Piezoelektrik maddenin özelliği gereği yüksek gerilimlerde düşük yer değiştirme oranlarına sahip olmalarıdır. Bu tezde kullanılan piezoelektrik madde için önerilen voltaj değişimi 0 – 150*volt* aralığında olup bu gerilim değişiminde uzama miktarı kullanılan piezoelektrik malzemeye göre 0 – 40 *mikrometre* yer değiştirmeye sahiptir.

Bu tez kapsamında ilk önce piezoelektrik madde için bir sürücü devresi tasarlanmıştır. Bu sürücü devresi PWM tekniği ile çalışan bir sürücü devresidir. Tasarlanan sürücü devresi Bilgisayar ortamında modellenerek PWM tekniği ile nasıl çalıştığı ve istenilen şartları sağladığı kontrol edilmiştir.

Piezoelektrik madde çok az yer değiştirmeye sahip olduğu için görüntü işleme teknikleri ile yerdeğiştirme miktarı ölçülmüştür. Bu ölçüm tasarlanan geribeslemeli denetim sisteminin geribesleme bilgisi olarak kullanılarak, istenilen uzama miktarı ile arasındaki hata en aza indirilmeye çalışılmıştır.

Denetim algoritması olarak PID denetleyici—kullanılmıştır. Kamera ile ölçülen yerdeğiştirme bilgisi arzu edilen uzama değerinden çıkarılarak PID denetleyiciye gönderilmiş ve istenilen yerdeğiştirmeye göre bir denetim sinyalinin üretilip PWM tekniği ile piezoelektrik sürücüye gönderilmesi sağlanmıştır.

ANAHTAR KELİMELER :

PID,Piezoelektrik sürücü,Nanometre, Görüntü işleme

ABSTRACT

Within the scope of this thesis, a linear piezoelectric motor system capable of linear elongation at the desired value with nanometer precision and a piezoelectric actuator for its control were designed. In this study, only the motion of the substance will be measured with microscope images and there will be a controller design that is stable enough to come to the desired position and stay there.

Piezoelectric material should be used to design an engine with nanometer precision. In other types of motors, it is much more difficult to achieve the desired sensitivity than piezoelectric material. Due to the characteristic of piezoelectric materials, they have low displacement ratios at high voltages. The voltage change recommended for the piezoelectric material used in this thesis is in the range of 0-150 volts, and the amount of elongation in this voltage change has a displacement of 0-40 micrometers according to the piezoelectric material used.

In this thesis, firstly, a driver circuit for piezoelectric material is designed. This driver circuit is a driver circuit working with PWM technique. The designed driver circuit has been modeled in the computer environment and it has been checked how it works with the PWM technique and provides the desired conditions.

Since the piezoelectric material has very little displacement, the amount of displacement was measured by image processing techniques. By using this measurement as the feedback information of the designed feedback control system, the error between the desired elongation amount and the desired elongation has been tried to be minimized.

PID controller is used as control algorithm. The displacement information measured by the camera is subtracted from the desired elongation value and sent to the PID controller, and a control signal is generated according to the desired displacement and sent to the piezoelectric driver by PWM technique.

ANAHTAR KELİMELER :

PID, Piezoelectric Driver, Nanometer, Image Processing

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLolar LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1.GİRİŞ	1
2. Piezoelektrik Motorlar	4
2.1 Piezoelektrik maddelerin özellikleri ve kontrolü	5
2.1.1 DC Bias.....	5
2.1.2 Histerisiz Hatası.....	6
2.1.3 Yerdeğiştirme Hatası	7
2.1.4 Kontrol Teknikleri.....	7
3. Sayısal Görüntü İşlemi	10
3.1 Sayısal Görüntü	10
3.2 RGB Renk Uzayı.....	11
3.3 Gri Renk Uzayı.....	12
3.4 Görüntü Bölütleme	14
3.4.1Histogram.....	14
3.4.2 Eşikleme ile Görüntü Bölütleme.....	15
3.5 Sayısal Görüntü Üzerinde Matematiksel İşlemler	17
4 Ölçüm Algoritması	18
4.1 Kullanılan Malzemeler	18
4.1.1 Arduino Uno	19
4.1.2 Piezoelektrik madde.....	19
4.1.3 Kamera.....	20
4.4.4 Güç Kaynağı.....	20
4.2 Kontrol Devresinin Çalışma Mantığı	21
4.3 Kalibrasyon	24
4.3.1 Resim Bölütleme	24
4.3.2 Çalışma Alanının Belirlenmesi	24
4.3.3 Kalibrasyon Ölçüsünün Bulunması	25

4.4 Ölçüm Yöntemi.....	27
4.4.1 İlk resmin alınması.....	27
4.4.2 Ölçüm Yapılacak Resmin Çekilmesi	29
4.4.3 Çıkarma İşleminin Yapılması.....	29
4.4.4 Resmin Normalize Edilmesi.....	30
4.4.5 Resimden Uzaklığın Bulunması	30
4.5 Hata Oranı ve Tekrarlanabilirlik	32
4.5.2 Eşik Değerin Etkisi	33
4.5.3 Başlangıç Hatası.....	35
4.5 Ölçüm Değerleri	36
5 Denetleyici Tasarımı.....	40
5.1 Arayüz Programı	43
5.2 PID Denetleyicilerin Uygulanması	45
6 Değerlendirme ve Sonuç	55
KAYNAKLAR	57
EKLER	
EK-1: Görüntü işleme için python kodu	
EK-2: PID ve Uyarlamalı denetim için python kodu	

Tablolar Listesi

Tablo 4.1 0V ve 100 V uygulanan piezoelektrik maddenin uzama miktar verileri	32
Tablo 4.2 0V ve 100V değerlerinde alınan verilerin a)ortalam değer verisi b) Standart Sapması c) İdeal Ölçüm Aralığı.....	33
Tablo 4.3: Farklı eşik değerlerinde ve farklı voltaj değerlerinde alınan ölçümlerin a) ortalama değeri b) standart sapma değerleri.....	35
Tablo 4.4 Piezoelektrik maddenin uzama Verileri	36
Tablo 4.5 Piezoelektrik maddenin kısalma verileri	37
Tablo 5.1 $K_p = 0.033555$, $K_d = 0.0068513$, $K_i = 0.015515$ ve $x(t)=1200$ için uzama ölçümleri.....	46
Tablo 5.2 Değişken Yapılı Histerisiz Denetleyici ile $x(t)=1200$ için uzama değerleri.....	48
Tablo 5.3 $x(t)=3000\text{nm}$ için a)uzalma denklem parametreleri b) kısalma denklemi parametreleri için kısalma değerleri	51
Tablo 5.4: $x_1(t) = 1200$ değerinde iken $x_2(t) = 800$ değerine gelen sistemin ölçülen değerleri.....	53

Sekiller Listesi

Şekil 2-1 Farklı Piezoelektrik maddelerin histerisizlik doğrular[15].....	6
Şekil 2-2 İleri Beslemeli Piezo motor sistemi[14]	7
Şekil 2-3 Geri Beslemeli Piezo motor sistemi[14]	8
Şekil 2-4 Histerisiz Kontrol Teknikleri[14]	9
Şekil 3-1 a) RGB uzayında renk karışımları b) RGB uzayının matematiksel şekli [18]....	12
Şekil 3-2 Görüntüleme Sensörü (Kamera)’nün Çalışması [18]	13
Şekil 3-3 (a): az aydınlatılmış sayısal görüntünün histogram verisi (b) çok aydınlatılmış sayısal görüntünün histogram verisi[19]	15
Şekil 3-4 a) iyi ışıklandırma sonucu oluşan resim b) iyi olmayan ışıklandırma sonucu olan resim [19]	16
Şekil 3-5 a) iyi ışıklandırma sonucu oluşan histogram b) kötü ışıklandırma sonucu oluşan histogram[19].....	16
Şekil 4-1 Kullanılacak Tasarım Şeması	18
Şekil 4-2 Piezo stack AE050516DF	19
Şekil 4-3 Deney Düzeneği	20
Şekil 4-4 Uygulamada kullanılan Flyback Konverter	21
Şekil 4-5 Mikroskop altındaki Piezoelektrik Madde(Olympus 10x Lens ile birlikte)	21
Şekil 4-6 Anahtarlama elemanı 490 Hz için fourier analizi	22
Şekil 4-7 Filtreleme sonrası Farklı görev sürelerindeki çıkış voltajı	23
Şekil 4-8 Devre çizimi	23
Şekil 4-9 Çalışma alanının belirlenmesi (Kırmızı çizgiler çalışma alanının gösterir.)	25
Şekil 4-10 Thorlabs 0.1 mm aralıklı cetvel görüntüsü	25
Şekil 4-11 Kalibrasyon Flow Chart	26

Şekil 4-12 0V uygulandığında oluşturulan sayısal görüntünün $th=89$ eşik değeri uygulanarak bölütleme işlemine tabi tutulmuş resim	27
Şekil 4-13 İlk Resim Algoritması Akış Diagramı	28
Şekil 4-14 Verilen voltajlara göre Piezoelektrik maddenin uzama miktarları	29
Şekil 4-15 Ölçüm Akış diagramı	31
Şekil 4-16 100V uygulandığında oluşan uzama miktarında çekilen resmin referans resimden çıkartılmış hali.....	33
Şekil 4-17 a) Treshold Değeri Çok Yüksek b) Treshold değeri normal c) treshold değeri çok yüksek	34
Şekil 4-18 Referans noktası olarak kaydedilen ilk resim	35
Şekil 4-19 Tablo 4.4 ve Tablo 4.5 deki verilere göre uzama ve kısalma eğrileri	38
Şekil 4-20 Alınan verilerin toplam yer değiştirmeye dönüştürülmesi ve iki yer değiştirme için farklı voltajlardaki farklar.....	39
Şekil 5-1 Denetleyici Algoritması Şeması	41
Şekil 5-2 Matlab Ortamında Denetleyici Algoritmasının Modellenmesi	41
Şekil-5-3 Verilen parametrelere göre sistemin adım cevabı	42
Şekil 5-4 Arayüz Programı	43
Şekil 5-5 Kalibrasyon için eşik değer bulunması	44
Şekil 5-6 Çalışma alanı belirlenen kalibrasyon resminin gri formattaki hali	45
Şekil 5-7 $K_p = 0.033555$, $K_d = 0.0068513$, $K_i = 0.015515$ ve $x(t)=1200$ için uzama grafiği.....	47
Şekil 5-8 Değişken Yapılı Histerisiz Denetleyici ile normal denetleyicinin ile $x(t) = 1200$ için uzama grafiği.....	49
Şekil 5-9 $x(t)=3000$ nm için kısalma parametreleri ile tasarlanmış denetleyicinin cevabı.....	50

Şekil 5-10 $x(t)=3000$ nm için uzama parametreleri ile tasarlanmış denetleyicinin cevabı..	52
Şekil 5-11 $x_1(t) = 1200$ değerinde iken $x_2(t) = 800$ değerine gelen sistemin yer değiştirme grafiği	54



Simgeler ve Kısaltmalar

CRT	Katot ışın tüpü (Catode Radiation Tupe)
RGB	Kırmızı,yrşil ve mavi renk uzayı (Red,Green,Blue)
PWM	Sinyal Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
R	Direnç
C	Kapasitör
r_k	k'nıncı parlaklık dğerini
n_k	k'nıncı parlaklık değeriine sahip piksel sayısı
s_0	İlk resim
s_i	i' ninci resim
$s_{\text{çıkarma}}$	Çıkarma işlemi yapılmış resim
μm	Mikrometre
nm	Nanometre
$x[n]$	İstenilen değeri
$e[n]$	Hata değeri
$u[n]$	Kontrol sinyali
$y[n]$	Çıkış değeri

1 GİRİŞ

Piezoelektrik motorlar robotik [1], [2] , mikroskobi [3], [4] ve hassas imalat gibi birden fazla alanda çokça kullanılmaktadır. Bu tarz motorlar nanometre hassasiyetinde çalıştıkları için çok hassas işlerde kullanılır. Yüksek voltajlarda düşük yer değiştirme miktarına sahip olduğundan hareketleri daha hassas olmaktadır. Ancak daha hassas sistemlere ihtiyacımız olduğunda seramik veya quartz malzemelerden yapılmış motorlar da bulunmaktadır. Fakat bu tür sistemlerin enerji ihtiyacı çok fazla olduğundan (1-10Kv) kullanımı özel işlemler ile sınırlı kalmıştır. Piezoelektrik motorlar ise mikroskoplarda veya hassas üretim sistemlerinde daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

Piezoelektrik maddenin kontrol edilmesinde birçok yöntem kullanılmıştır. Kapalı döngü ile [5]–[7]veya açık döngü [8], [9] ile birden fazla deneme yapılmıştır .Kapalı döngü sistemlerinde birden fazla sensör kullanılabilinmektedir

Robotik alanında kullanılan piezoelektrik maddeler birden fazla amaç için kullanılabilir. Bunlardan bir tanesi mikrometre hassasiyetine sahip tutuculardır[1]. Bu tutucular mikron hassasiyette yüksek kuvvet elde edebildikleri için mobil mikro sistemlerin delikli montajı sırasında oluşan yanlış hizalanmış pimleri doğrultabilirler Bir diğer kullanım alanlarından birisi ise nanometryre konumlama sistemleridir[2]. Bu sistemlere örnek olarak mikroskoplarda kullanılan lenslerin nanometre hassasiyetinde konumlandırılması gerekmektedir. Bu tür uygulamalar genellikle geribeslemeli denetleyici sistemlere sahip olurlar.

Bir diğer kullanım alanı olan mikroskobi alanında ise atomik kuvvet mikroskobu(AFM)' dur. Bu mikrosoplarda ölçüm piezoelektrik maddenin yerdeğiştirme prensibine göre çalışır[3]. Bir diğer özellik ise daha önceden bahsedilen taramalı tünel mikroskoplardır[4]. Bu mikroskoplarda AFM' deki gibi yüzey ölçümleri için kullanılır ve hassas ölçüm sonuçları için piezoelektrik maddenin yerdeğiştirme prensibine dayanır.

Doğrusal harekette kullanılan piezoelektirk motorların iki amacı vardır. Bunlar nanometre hassasiyetinde konumlama[5] ve mikrometre hassasiyetinde konumlamaıdır[6].Ancak bu iki onumlamada da en büyük sorun histerisiz özelliğidir ve bundan dolayı genellikle geribeslemeli sistemler kullanılır ancak bu sistemlerde kullanılan sesnsörlerin gürültüsü sistemin kontrolünü zorlaştırabilir[5].

Piezoelektrik tabanlı pozisyonlama sistemleri için genellikle bükülme tabanlı mekanizmalar kullanılır. Bu mekanizmalar hassas ve sürtünmesiz ortamlar yarattığı gerekçesi ile daha hassas çalışmaktadır. Geri besleme mekanizması olarak görüntü işleme kullanıldığında iyi sonuçlar elde edilmektedir. Bu sonuçlara göre 138 nanometre ile 343 nanometre arası hatalar ile adaptif denetleyiciler ile sistem kontrol edilebilir.[6]

Piezoelektirk maddelerin doğrusal konumlandırma için kullandıkları tek mekanizma bükülme tabanlı mekanizmalar değildir. Bir diğer mekanizma ise stick-slip mekanizmasıdır. Bu mekanizma içerisinde bir veya daha fazla piezoelektrik madde bir mile sürekli olarak yerdeğiştirme etkisi uygular ve mili sürükler.[8]

Hassas lineer hareket için kullanılan piezoelektirk maddenin yer değiştirmesi, birden fazla yöntem ile sağlanmıştır. Bu yöntemler daha çok kapalı döngü sistemler için kullanılsada açık döngü sistemler içinde kullanılmıştır. Kapalı döngü sistemlerinde PID denetleyiciler [5], adaptif denetleyiciler [6] veya akıllı sistemler [7] kullanılabiliriz. Bu üç denetleme sisteminde de istenilen sonuçlar elde edilmiştir ve piezoelektrik maddenin histerisiz özelliğine karşı çok etkili olmaktadır.

Ancak bu özellikler açık döngü sistemlerinde gözleyici tasarlanarak ta gerçekleştirilebilir[9]. Açık döngü sistemlerinde kullanılan bir yöntem ise daha önceden belirlenmiş histerisiz modellerin tersini alıp ona göre bir dengeleyici tasarlanabilir ve buna ek olarak bir bozulma gözlemleyicisi eklenebilir. Bu ikisinin bir arada kullanılmasının nedenlerinden biride histerisiz modelin tam anlamıyla piezoelektirk maddenin davranışlarını modelleme konusunda eksikleri olduğundan kullanılır.[9]

Piezoelektrik maddelerin doğrusal hareketi sağlamak için kullanılan bir yöntem ise katman yöntemi olarak söylenebilir. Bu yöntem ile uçuca eklenmiş piezoelektrik maddeler birlikte yerdeğiştirme hareketi yapar ve hareket ettirilecek malzeme doğrudan en sonraki piezoelektirk maddenin ucuna bağlanır. Böylelikle hiçbir mekanik bağlantıya ihtiyaç kalmadan doğrusal hareket sağlanmış olur[12].

Doğrusal hareket ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda piezoelektirk maddeler 3 eksen veya 6 eksenli robotik sistemlerde de hassas konumlandırmada kullanılabilir. Bu işlemler doğrusal hareket için tasarlanmış bir veya daha fazla piezoelektirk maddenin birlikte çalışması sonucu elde edilir. Bu sistemlerde de doğrusal hareketler için yapılan çalışmaların sonuçlarına benzer sonuçlar almak mümkündür. Bu çalışmalarda yapılan

modellemeler ile piezoelektirik maddelerin yerdeğiştirme miktarları sırasıyla kontrol edilerek tek eksen yerine birden fazla eksen de çalışan robotik manipülasyon işlemleri gerçekleştirilir.[11]

Bu tez kapsamında bir piezoelektrik maddenin uzaması ve kısalması mikroskop altında incelenecek ve ona uygun bir denetleyici tasarlanacaktır. Piezoelektrik maddenin motor olarak kullanılması için bazı hassas mekanik sistemlere ihtiyaç duymaktadır. Bu tez kapsamında mekanik bağlantıların tasarımı yerine piezoelektrik maddenin yer değiştirmesi nanometrik olarak kontrol edilecek ve ona uygun denetleyici tasarlanacaktır.

Bilgisayarlı gr ile bir çok sistem kontrol edilebilir. Bu tez kapsamında geribeslemeli bir kapalı döngü sistemi tasarlanacaktır. Dijital görüntü ile kontrol edilen çalışmalar 200-300nm hassasiyette çalışan 2 boyutlu veya 3 boyutlu sistemler vardır. [6], [10]

2 Piezoelektrik Motorlar

Piezoelektrik Motorlar Piezoelektrik etkiye sahip kristallerin voltaj değişimindeki yer değiştirme prensibine göre çalışırlar. Piezoelektrik etkiye sahip kristal malzemeler yüksek voltaj değişimlerde düşük yer değiştirmeye sahiptirler. Bu  zellik sayesinde voltaj girişi kontrol edilerek piezoelektrik etkiye sahip kristalin boyu kontrol edilir. [11]

Bu etkiye sahip maddeler çok hassastırlar ve darbeye karşı dayanıksızdırlar. Gerilme dirençlerinin çok düşük olmasına karşın uyguladıkları sıkma kuvveti ise çok yüksektir. Sıkma kuvvetinin y ksekliliğinden dolayı motor olarak kullanılabilinmektedir.

Piezoelektrik motorların birden fazla çeşidi bulunmaktadır. Bunlardan birkaçı yapışma yöntemi, ultrasonik yöntemi, stack yöntemi olarak söylenbilir.

Yapışma yöntemi ile piezo elektrik etkiye sahip kristal malzeme bir mile yada lineer hareket yapan malzemeye yapışık olarak hareket eder ve hareket süresince de bu etki korunur. Elektrik verildiğinde piezo elektrik maddenin uzaması sonucu mil de yerdeğiştirme miktarı kadar hareket etmiş olur. Piezoelektrik maddeye uygulanan voltaj değeri son noktaya geldiğinde piezo elektrik kristal milden ayrılarak tekrar sıfır noktasına gelir. Bu olay sırasında mil sabit kalır ve hareket etmiş olmaz. Bu işlem istenilen miktarda tekrar edilerek lineer hareket sağlanmış olur. Ters hareketinde ise piezo elektrik etkiye sahip kristal malzemeye verilen voltaj en son noktada iken mil piezoelektrik malzemeye yapışır ve voltaj sıfıra ulaşmaya kadar bu durum korunur. Voltaj sıfır noktasına vardıda ise mil ile piezoelektrik madde ayrılır ve piezoelektrik maddeye tekrardan tam voltaj verilir. Bu arada milde bir hareketlenme olmaz. [8]

Ultrasonik yöntemi ise piezoelektrik etkiye sahip kristal doğrudan mile yada linner hareket sağlayacak malzemeye bağlanmaz. Piezoelektrik etkiye sahip kristal malzeme uzama ve kısıalma hareketini devamlı olarak yapmaya başlar, kendisine bağlı bir mekanik düzenek sayesinde piezoelektrik maddenin sadece belirli voltajlarda tek bir yönde mile teması sağlanır. Böylelikle mile bağlanma veya     lme olayı olmaz. Bu yöntem hassas sistemler için kullanılmamaktadır. Nedeni ise mekanik yollardan milin hareketi sağlandığından dolayı istenmeyen hatalar ve kayıplar meydana gelmektedir.

Yığın yönteminde ise herhangi bir işlem gerçekleşmez. Direkt olarak hareket ettirecek malzeme piezoelektrik etkiye sahip kristal maddeye bağlanır ve piezoelektrik maddenin uzaması veya kısılması sayesinde malzemede hareket eder. Bu yöntemin dezavantajı hareket

mesafesinin Piezoelektrik maddenin uzama miktarına ve uçuca eklenen piezoelektrik maddenin sayısına bağlıdır. Bundan dolayı hareket mesafesi çok kısadır. Ancak herhangi bir mekanik bağlantı olmadığından en az hata veren yöntem bu yöntemdir.[12]

2.1 Piezoelektrik maddenin Özellikleri ve Kontrolü

Piezoelektrik etkiye sahip kristallerin boyunun uzamasını kontrol etmek için birkaç yöntem vardır, ve bu yöntemler bir veya daha fazla hatayı minimize etmek amacıyla oluşturulmuştur. Bu hatalar Histerisiz ve yer değiştirme hatası olarak karşımıza çıkar. Aynı zamanda Piezoelektrik etkiye sahip malzemeler Dc voltaj altında çalışırlar. Uygulanan Dc voltajın değerine göre boylarında uzama veya kısalma meydana gelir.

2.1.1 DC Bias

Piezoelektrik etkiye sahip kristallerin kontrolünde DC Bias yöntemi kullanılmaktadır. Dc motorlarda kullanılan PWM tekniğinin piezoelektrik etkiye sahip kristallerde işe yaramamaktadır. Bunun nedeni ise malzemedeki boy değişimi uygulanan Dc voltajın değerine bağlıdır.

Bunun için birkaç kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygını ise belirli bir frekansa sahip bir sinüzoidal dalgasına DC bias eklenerek Dc voltaj değerinin artırılması, değiştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Ancak bu yöntem ile piezoelektrik etkiye sahip kristal malzemenin ısınması veya rezonans frekansına girmesi gibi hatalar meydana gelebilmektedir. Bu hataları önlemek için Dc voltaj değerine eşlik eden sinüzoidal dalganın frekansının düşük seçilmesi gerekmektedir, ancak frekansının düşük olması için dalga boyunun yüksek olması gerekmektedir.

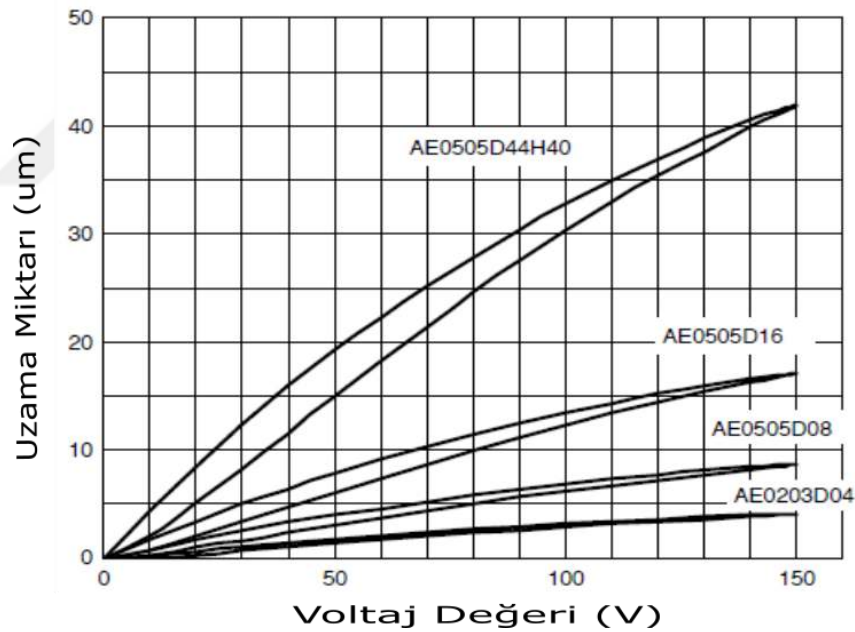
Diğer bir yöntem ise PWM yükselteç yöntemi ile oluşturulan PWM dalgasının filtrelenebilmesi yöntemi ile gerçekleştirilmektedir.[13] Bu yöntem ile Dc bias yöntemi ile gelen ısınma ve rezonans frekans hataları engellenebilir. Filtrelenen PWM dalgasına sadece Ripple voltajı eşlik etmektedir. Ripple voltajının frekansı ise Pwm voltajına uygulanan alçak geçiren filtrenin frekansına eşit olmaktadır. Ayrıca Ripple voltajının dalga boyunda filtrenin frekansı düşüktüğü düşmektedir. Böylelikle ısınma ve rezonans frekansa yakalanma sorunları meydana gelmemektedir.

Bu tekniklerin geliştirilmesindeki asıl sebep ise yüksek voltaj kaynağıdır. Piezoelektrik etkiye sahip kristal malzemeler genel olarak 75V ile 150 V arasında maksimum uzama miktarına ulaşır.

2.1.2 Histerisiz Hatası

Piezoelektrik etkiye sahip kristaller tam olarak doğrusal bir şekilde boyları değişmez ve uzama değişimi ile kışalma değişimi arasında aynı voltaj değerlerinde aynı değerlere gelmezler. Bu durum piezoelektrik motorlarda histerisiz hatası olarak adlandırılır. Her bir piezoelektrik etkiye sahip kristalin farklı sıcaklık ve frekans değerlerinde farklı uzama ve kışalma fonksiyonlarına sahiptirler, ve bu fonksiyonlar lineer değildir.[14]

Histerisiz etkisine sahip bir diğer önemli madde ise ferromanyetik malzemelerin manyetik alanlarındaki değişim ve birbirleri arasındaki çekim kuvvetinin uzaklığa bağlı değişimidir.



Şekil 2.1 Farklı Piezoelektrik maddelerin histerisizlik doğrular[15]

Bundan dolayı piezoelektrik motorların matematiksel modelleri ile ferromanyetik malzemelerin manyetik alanlarındaki uzaklığa bağlı değişimini gösteren matematiksel modeller arasında benzerlik vardır. Piezoelektrik motorların kontrolünde kullanılan matematiksel modellerin çoğu ferromanyetik malzemelerin uzaklığa bağlı manyetik alanların değişimini gösteren matematiksel modellerden çıkarılmış veya onlar kullanılmıştır.

2.1.3 Yerdeğiştirme Hatası

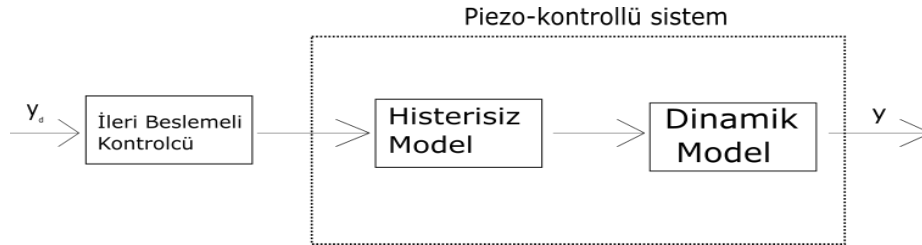
Yerdeğiştirme hatası Piezoelektrik etkiye sahip kristallerin boylarının değişimi verilen sabit voltaj değerinde sabit kalmaması problemini anlatmaktadır. Yerdeğiştirme hatası incelendiğinde piezoelektrik motora herhangi bir sabit voltaj uygulandığına hareket anlık olarak geręekleřtikten sonra hareket küçük adımlarda hala devam etmektedir. Bundan dolayı Piezoelektrik etkiye sahip kristaller fiziksel olarak modellenirken kapasitör olarak modellenir. Kapasitöre sabit bir voltaj uygulandığında ilk önce kendisini şarj eder, bu durum piezomotorun anlık hareketini temsil eder. Komple şarj olan kapasitör daha sonra deşarj olmaya başlar, bu ise yerdeğiştirme hatasını oluşturur. [16]

2.1.4 Kontrol Teknikleri

Piezoelektrik etkiye sahip kristallerin kullanılmasında oluşan yer değiştirme hatası ve histerisiz sorunlarının düşürölmesi için birkaç yöntem bulunmuştur. Bütün yöntemler iki ana gruba ayrılabilir, bunlar açık ve kapalı kontrol sistemleri olarak adlandırılır. Açık kontrol sistemler günümüzde pek fazla tercih edilmesede kapalı kontrol sistemleri ile birlikte hatanın tespit edilip modellerin daha doğru ęalıřması şeklinde kullanılır.

Açık kontrol sistemleri oluşturulan model üzerinden hatanın ölçölmeden oluşturulan denetleyici sistemleridir. Kendi arasında tekrardan iki gruba ayrılır. Bunlar fiziksel modellere dayalı denetleyiciler ve matematiksel modellere dayalı denetleyicilerdir.

En önemli dezavantajları ise sistem kontrolü açık olduğundan herhangi bir hata verisi olmamasıdır. Böylelikle yapılan en küçük hatalar daha sonrasında modelin ęalıřmamasına neden olmaktadır.



şekil 2.2 İleri Beslemeli Piezo motor sistemi[14]

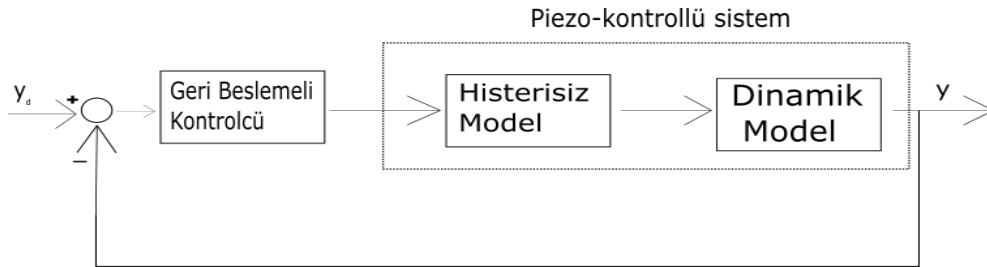
Bu sistemlerin arasındaki en önemli fark ise fiziksel modele dayalı sistemlerde tamamen piezoelektrik etkiye sahip kristal malzemenin daha önceden ölçölerek ve oluşturulan bilgilere dayalı bir modele sahip olmasıdır.

Matematiksel modele dayalı sistemlerde ise daha önceden oluşturulmuş matematiksel modellerin piezoelektrik etkiye sahip kristallere uyarlanması sonucu oluşmuştur. Daha önceden oluşturulan ve piezoelektrik etkiye sahip kistallerin uzama değişimine uygulanan matematiksel modeller arasında genellikle histerisiz için oluşturulan matematiksel modeller yer almaktadır. [14]

Bu modeller piezoelektrik etkiye sahip kristallerin üzerinde uygulanmadan önce ferromanyetik malzemelerin uzaklığa bağlı manyetik kuvvetlerin açıklanmasında kullanıldığından dolayı matematiksel modellere dayalı piezoelektrik etkiye sahip kristallerin voltaj altındaki uzama miktarlarını gösteren modeller ile ferromanyetik malzemelerin uzaklığa bağlı manyetik alan değişimini anlatan modeller arasında benzerlik görülmektedir. [14]

Kapalı kontrol sistemlerinde ise bir sensöre bağlı olarak hata miktarı ölçülür ve hata miktarına göre sistemin kontrol sinyali değiştirilir [17]

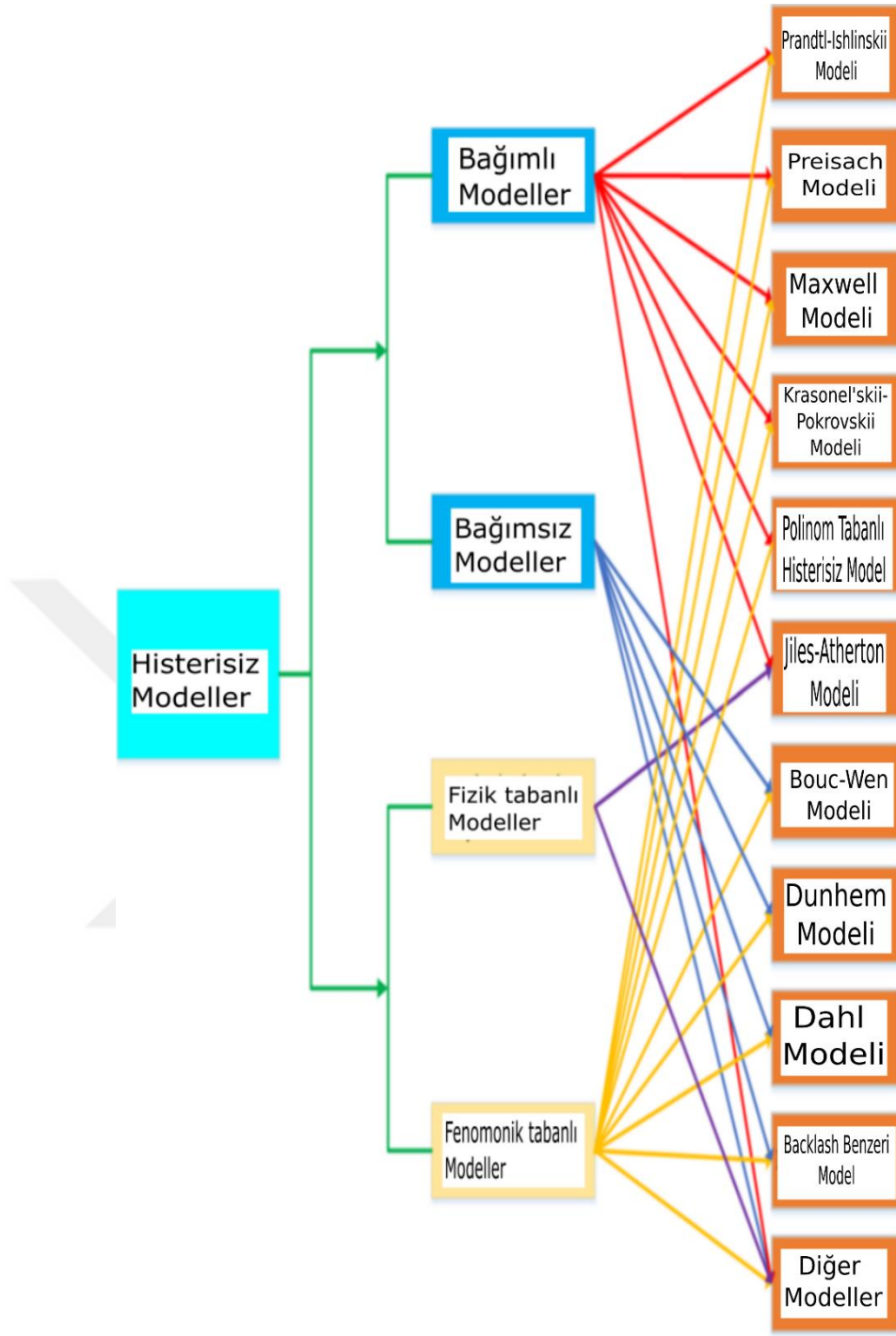
Piezoelektrik etkiye sahip malzemelerin voltaj altındaki uzama miktarı bizim kontrol etmek istediğimiz değerdir ve hata değeri ise ölçülen uzama miktarının daha önceden belirlenmiş değerden ne kadar sapmasıdır. Bu sapma ile kotrol sinyali değiştirilerek uzama miktarı kontrol edilebilir.



Şekil 2.3 Geri Beslemeli Piezo motor sistemi[14]

Bu tarz kontrol sistemlerin dezavantajı ise uzama miktarının ölçülmesidir. Piezoelektik malzemeler genellikle en fazla 15-20 um uzadığından dolayı ölçüm yöntemi asıl zorluğu oluşturmaktadır. Bunun için kullanılacak sensörler pek fazla değildir.

Piezoelektrik motorların kontrolünde bu iki yöntem tek başlarına kullanılabileceği gibi ikisi aynı anda da kullanılabilmektedir. Matematiksel veya fiziksel modele dayalı açık kontrol sistemleri asıl denetleyici olarak çalışırken sensörler vasıtası ile hata miktarı ölçülerek asıl denetleyici içerisindeki model adapte edilebilir.



Şekil 2.4 Histerisiz Kontrol Teknikleri[14]

3.Sayısal Görüntü İşleme

3. 1 Sayısal Görüntü

$C(x, y, t, \lambda)$ bir görüntü kaynağının uzamsal enerji dağılımını temsil etsin, (x, y) görüntünün uzaysal koordinatlarını, t zamanı ve λ dalga boyunu temsil etsin.[18]

Işık yoğunluğu gerçek bir pozitif nicelik olduğundan, yani yoğunluk elektrik alanının modülünün karesiyle orantılı olduğundan, görüntü ışığı işlevi gerçektir ve negatif değildir. Ayrıca, tüm pratik görüntüleme sistemlerinde, her zaman az miktarda arka plan ışığı mevcuttur. Fiziksel görüntüleme sistemi ayrıca, örneğin film doygunluğu ve katot ışın tüpü (CRT) fosfor ısıtması gibi bir görüntünün maksimum yoğunluğu üzerinde bir miktar kısıtlama dayatır. A maksimum görüntü yoğunluğudur.[18]

$$0 < C(x, y, t, \lambda) \leq A \quad (3.1)$$

Fiziksel bir görüntünün kapsamı, görüntüleme sistemi ve görüntü kayıt ortamı tarafından zorunlu olarak sınırlandırılır. Matematiksel basitlik için, tüm görüntülerin yalnızca dikdörtgen bir bölge üzerinde sıfırdan farklı olduğu varsayılır.[18]

$$-L_x \leq x \leq L_x \quad -L_y \leq y \leq L_y \quad (3.2)$$

Fiziksel görüntü, yalnızca belirli bir sonlu zaman aralığında gözlemlenebilir.

$$-T \leq t \leq T \quad (3.3)$$

Bu nedenle görüntü ışığı işlevi, sınırlı bağımsız değişkenlerle sınırlı dört boyutlu bir işlevdir. Son bir kısıtlama olarak, görüntü fonksiyonunun tanım alanı boyunca sürekli olduğu varsayılır.[18]

Standart bir insan gözlemcinin bir görüntü ışık fonksiyonuna verdiği yoğunluk tepkisi, genel olarak, aşağıdaki denklemde tanımlandığı gibi ışık alanının anlık parlaklığı açısından ölçülür.[18]

$$Y(x, y, t) = \int_0^\infty C(x, y, t, \lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (3.4)$$

$V(\lambda)$, görelî ışık verimliliği fonksiyonunu, yani insan görüşünün spektral tepkisini temsil eder. Benzer şekilde, standart bir gözlemcinin renk tepkisi, renkli bir ışığı eşleştirmek için

gereken kırmızı, yeşil ve mavi ışık miktarlarıyla doğrusal olarak orantılı olan bir dizi tristimulus değeri cinsinden ölçülür. Rastgele bir kırmızı-yeşil-mavi koordinat sistemi için, anlık tristimulus değerleri [18]

$$R(x, y, t) = \int_0^\infty C(x, y, t, \lambda) R_s(\lambda) d\lambda \quad (3.5)$$

$$G(x, y, t) = \int_0^\infty C(x, y, t, \lambda) G_s(\lambda) d\lambda \quad (3.6)$$

$$B(x, y, t) = \int_0^\infty C(x, y, t, \lambda) B_s(\lambda) d\lambda \quad (3.7)$$

3.5, 3.6 ve 3.7 numaralı eşitliklerde görülmektedir. Eşitliklerdeki $R_s(\lambda), G_s(\lambda), B_s(\lambda)$ kırmızı, yeşil ve mavi primerler kümesi için spektral tristimulus değerleridir. Spektral tristimulus değerleri, aslında, dalga boyunda birim miktarda dar bant ışığı eşleştirmek için gereken tristimulus değerleridir. Bir multispektral görüntüleme sisteminde, gözlemlenen görüntü alanı, görüntü ışık fonksiyonunun spektral ağırlıklı bir integrali olarak modellenir.[18]

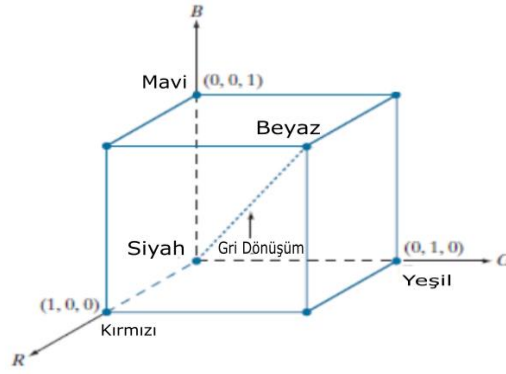
3.2 RGB Renk Uzayı

RGB renk uzayında sensörden alınan görüntünün her bir pikseli 3 ana renk ile ifade edilir. Bunlar Kırmızı, Yeşil ve mavi renkleridir. Geri kalan bütün renkler bu 3 ana rengin birleşmesi ile oluşur. Bütün renklerin hepsinin aynı anda bulunması ile beyaz rengi olur ve hepsini sıfır olması ile de siyah rengi oluşur.[19]

Bu renk uzayında her bir piksel 3 ana renk ile ifade edildiği için içerisinde birbirine geçmiş 3 resim barındırmaktadır. Her bir ana renk ile bir resim oluşturulabilir.[19]



(a)



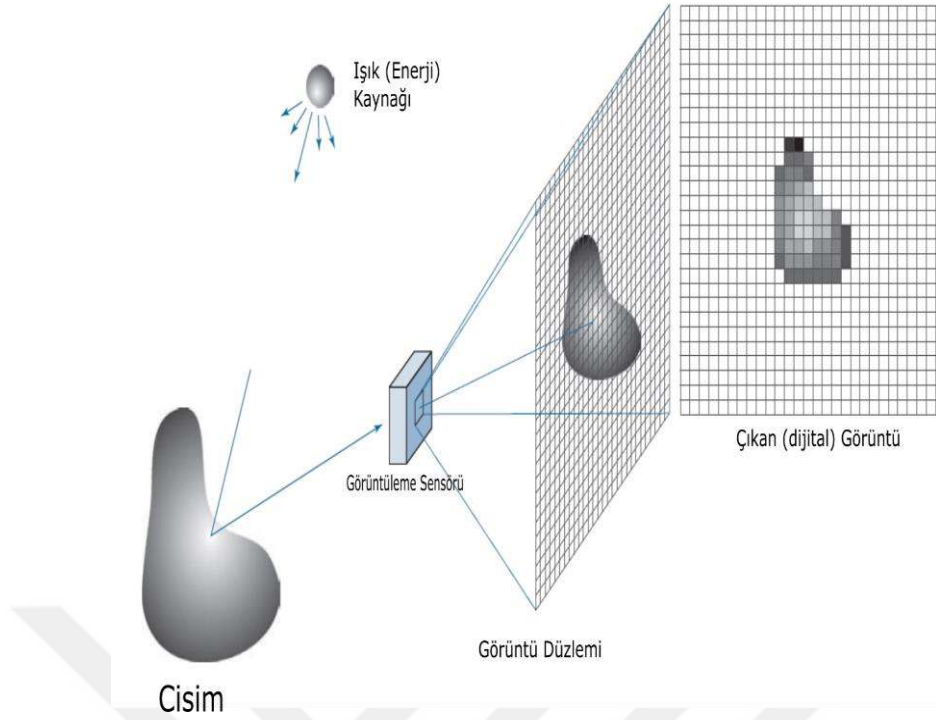
(b)

Şekil 3.1 a) RGB uzayında renk karışımları b) RGB uzayının matematiksel şekli [19]

3.3 Gri Renk Uzayı

Bir kamera üzerinden resim çekildiğinde bilgisayar ortamına aktarılan değerler, kameradaki her bir pikselin yakalamış olduğu görüntünün renklerinden tarifiidir. Her bir piksel üzerine düşen ışığın renklerinin pikseller üzerinde bulunan sensörler vasıtası ile üç ana renge ayrılarak gönderilir, bu ana renkler ise kırmızı, yeşil ve mavi renklerdir. Bir kamera ile resim çektiğimizde görüntülenen matris her bir piksel üzerine düşen ışık demetinin hangi oranda ne kadar renk içerdiğini göstermektedir.[19]

Bu tür bir matris ile işlem yapmak hem zor hemde çok uğraş gerektirdiğinden bu değerler belirli algoritmalar ile tek renge dönüştürülür.



Şekil 3.2 Görüntüleme Sensörü (Kamera)’nün Çalışması [19]

Gri formata dönüştürme işleminde belirli algoritmalar ortaya atılmıştır, bunlar, Ortalama yöntemi ve Parlaklık yöntemidir.

Ortalama yöntemi, her bir piksel değerindeki kırmızı, mavi ve yeşil değerlerinin ortalamasını almaktadır. Teoride kesinlikle çalışması gereken bir formüldür, Ancak insan gözü renkleri farklı dalga boylarında seçer. Meselaki kırmızı renk 625-740 Nm dalgaboyunda seçilirken mavi renk ise 430-500 nm dalga boyları arasında seçilebilir. Bundan dolayı teoride kesinlikle çalışması gereken bu dönüştürme formülünde gerçek uygulamalarda kesin çalışmamaktadır. [20]

$$(R + G + B)/3 \quad (3.9)$$

Parlaklık yöntemi ise bir piksel üzerine düşen ışık demetinde algılanan renkler her bir rengin dalga boyu hesaba katılarak ortalaması alınır. Bu algoritma gerçeğe daha yakın sonuçlar vermektedir.[21]

$$0.21R + 0.72G + 0.07B \quad (3.10)$$

Bu yöntemde bir insan gözünün hangi renge ne kadar tepki verdiği bilinerek ortaya atılmıştır. İnsan gözü en fazla yeşil rengini seçtiği için en fazla ağırlık yeşil renginde bulunmaktadır.

3.4 Görüntü Bölütleme (Segmentation)

Bir görüntüyü, görüntüyü oluşturan parçalara veya nesnelere ayırma işlemine görüntü bölütleme denir . Başka bir deyişle görüntü bölütleme, homojen bir küme içerisinde aynı karakteristiğe sahip alanların çıkartılması, arka plandan ayrılması, belirgin bir hale getirilmesi işlemidir . Görüntü işleme uygulamalarının büyük kısmında ön işlemlerde görüntünün içerdiği detaylarla ilgilenilmez. Önemli olan görüntü üzerindeki ilgili nesnelerin alanlarıdır. Bu alanlar görüntünün geri kalanından başarılı bir şekilde ayrıldıktan sonra, üst seviye işlemler ile ilgili alanın detaylarına inilir. Bu sebeple, görüntü işleme uygulamalarında kullanılacak olan nesne tanıma gibi üst seviye işlemlerde ilk ve en zor adım görüntü bölütlemedir. Nesne tanıma işleminde daha sonradan yapılacak olan, öznitelik çıkarımı, görüntü tanıma gibi yüksek seviyeli uygulamaların başarısı nesne bölütleme işleminin başarısına bağlıdır. Başarılı bir bölütlemeden, görüntüdeki nesnelerin arka plandan ayrıştırılması, aynı doku ve renk özelliklerine sahip alanların oluşturulması beklenir . [22]

Literatürde birden fazla görüntü bölütleme tekniği olmakla birlikte bu tekniklerin her biri farklı uygulama alanlarında istenilen sonucu vermektedir. Uygulanan her tekniğin kendine göre avantajı ve dezavantajı bulunmaktadır. Görüntüden istenilen ayrıntının bulunması veya çıkarılması için her teknikteki avantaj veya dezavantaj kullanılarak en uygun sonuç veren teknik seçilmelidir. Bu teknikler görüntünün gürültüsüne, aydınlık değerine, seçilmek istenilen ayrıntının büyüklüğü veya arkaplan ile olan ilişkisine göre değiştirilebilir.

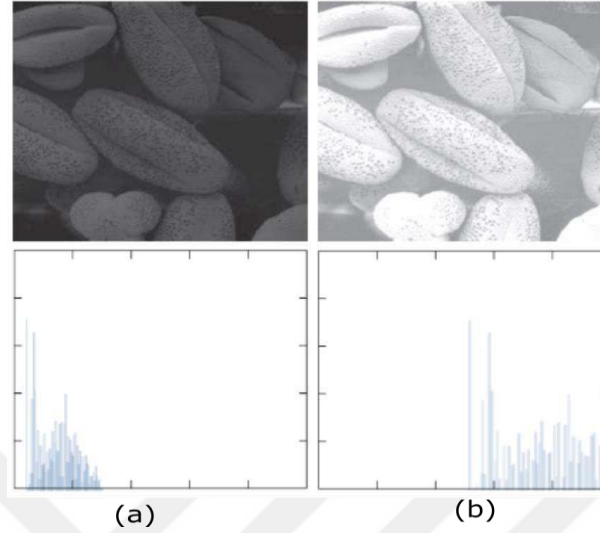
3.4.1 Histogram

Görüntü histogramı sayısal bir görüntü içerisindeki her pikselin renk değerlerini gösteren bir grafikdir. Histogramı incelenen sayısal görüntüdeki renk yoğunluğu olarakta söylenebilir. Hiatogram özellikle bölütleme işleminde olmak üzere görüntü işleme uygulamalarının çoğunda kullanılmaktadır. Histogram işleminin matematiksel ifadesi eşitlik 3-11' de verilmektedir[19]

$$h(r_k) = n_k \quad (3.11)$$

Bu ifadede r_k : k'nıncı parlaklık dğerini ve n_k ise k'nıncı parlaklık değerine sahip piksel sayısını ifade eder[19]

Histogram grafiğinde x ekseni incelenen renk değerinin minimum ile maksimum değeri arasında değişir, y ekseni ise minimum ve maksimum değer arasında kaç tane piksel bulunduğunu gösterir.



Şekil 3.3 (a): az aydınlatılmış sayısal görüntünün histogram verisi (b) çok aydınlatılmış sayısal görüntünün histogram verisi[19]

Histogram verisi alınan sayısal görüntünün parlaklık durumu, ortamın aydınlığı ve ışığın vurduğu cismin tonlarına göre değişkenlik gösterir. Histogram verisini etkileyen en önemli özellik ise aydınlatmadır. Sayısal görüntüsü alınan cismin aydınlatması iyi değilse histogram verileri bir yere toplanarak herhangi bir ayırım yapılması zorlaşır. Verilerin en düşük değere doğru toparlanması karanlık olması, en yüksek değere doğru toparlanması ise çok aydınlık olduğu bilgisini verir.

3.4.2 Eşikleme ile Görüntü Bölütleme

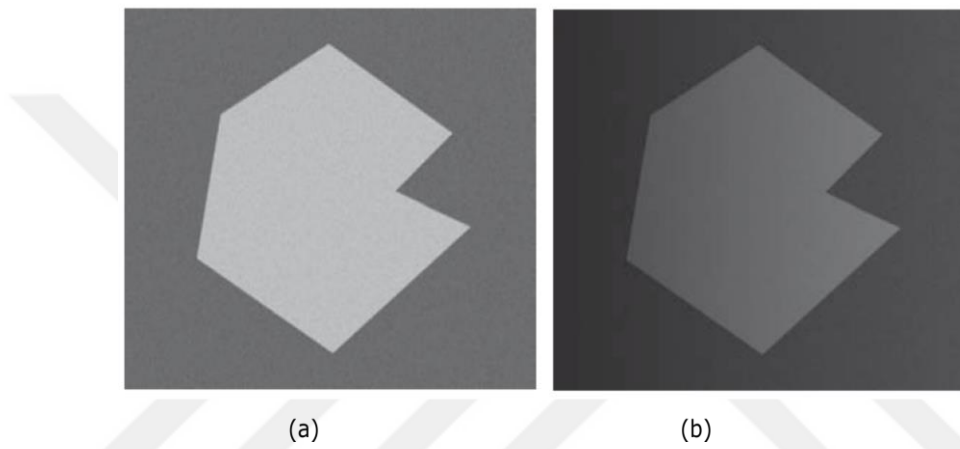
Eşikleme ile bölütleme tekniği kullanım kolaylığı ve işleme hızından dolayı diğer tekniklere göre daha merkezde bulunmaktadır.

Bölütleme yapılacak resim üzerindeki histogram değeri şekil 3.3 ‘deki gibi olduğunu kabul ederssek T değerine eşit veya büyük bütün değerler bizim arka planımız olduğunu düşünebiliriz bundan dolayı resimdeki her bir piksel değerini T değeri ile karşılaştırıp küçük olanları 0, büyük veya eşit olanları ise 1 değerine eşitleyebiliriz.

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{eger } f(x, y) \geq T \\ 0 & \text{eger } f(x, y) < T \end{cases} \quad (3.12)$$

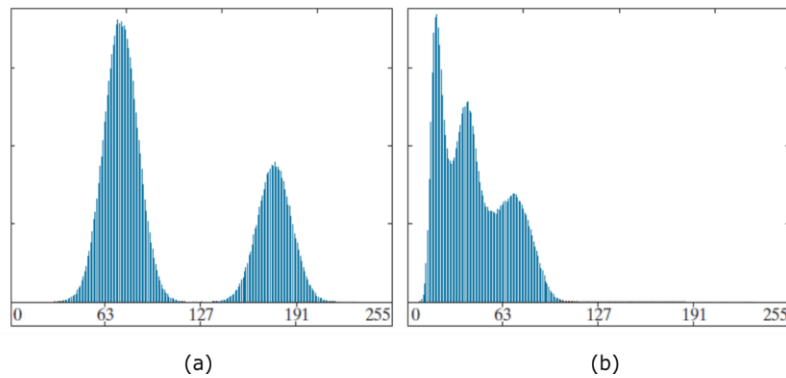
Bazı durumlarda bölütlenmesi istenilen resmin histogram değeri tek bir değer ile değil birden fazla değer ile ayrılabilir. Bu gibi durumlarda her bir pikselin kendisi veya komşuluk durumlarına göre birden fazla değer ile karşılaştırılması yapılır.

$$g(x, y) = \begin{cases} a, & \text{eğer } f(x, y) > T_2 \\ b, & \text{eğer } T_1 < f(x, y) \leq T_2 \\ c, & \text{eğer } f(x, y) \leq T_1 \end{cases} \quad (3.13)$$



Şekil 3.4 a) iyi ışıklandırma sonucu oluşan resim b) iyi olmayan ışıklandırma sonucu olan resim [19]

Işıklandırmanın etkisi eşikleme ile yapılan bölütlemenin en önemli faktörlerinden biridir. Şekil 3.4 (b)' deki resmin histogram verisine baktığımızda ise herhangi bir optimal eşik değeri gözükmemektedir



Şekil 3.5 a) iyi ışıklandırma sonucu oluşan histogram b) kötü ışıklandırma sonucu oluşan histogram

3.5 Sayısal Görüntü Üzerindeki Matematiksel İşlemler

Sayısal görüntüler sensörler vasıtası ile dış ortamdaki görüntünün bilgisayar ortamına dönüştürülmesi sonucu her bir elemanı piksel olarak isimlendirilen bir matris formuna dönüşmektedir. Bu matrislerde istenilen işlemlerin yapılması istenmektedir. Bu işlemler ise görüntü üzerinde istediğimiz özelliklerin çıkartılması veya birden fazla resim üzerinde işlem yapmamıza olanak sağlar.

Birden fazla resim üzerinde yapılan işlemler daha çok aritmetik işlemler olmak ile birlikte bu aritmetik işlemler vektörel işlemler olmayabilirler.

Bir veya daha fazla görüntüyü içeren öge bazında bir işlem, piksel temelinde gerçekleştirilir. Herhangi iki matrisi ele aldığımızda elementler arası işlem yapıldığında her iki matriste aynı indise sahip elemanlar arasında işlem yapılırken, denklem 3.14 , matris operasyonlarında matris kurallarına göre,denklem 3.15 , işlem yapılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}b_{11} & a_{12}b_{12} \\ a_{21}b_{21} & a_{22}b_{22} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} & a_{11}b_{12} + a_{12}b_{22} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} & a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

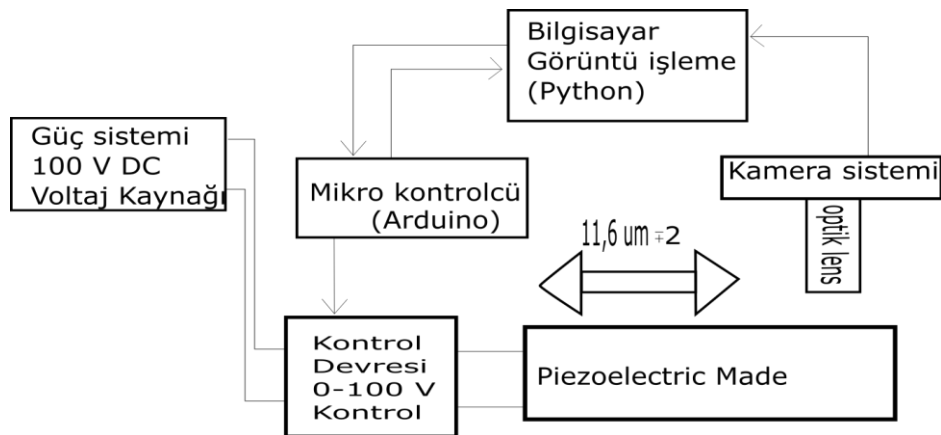
$f(x,y)$ ve $g(x,y)$ olarak tanımlanan iki resim arasındaki toplama, çıkarma ,çarpma ve bölme işlemleri elementler arası operasyonlar olarak yapılmaktadır. Temel dört işlem için her iki resimde karşılık gelen piksel çiftleri arasında yapılmaktadır. $x=0,1,2,...M-1$ ve $y=0,1,2,3,...,N-1$ olmak üzere M ve N her iki resimdeki satır ve sütun sayılarını belirtmektedir, bundan dolayı her iki resimde $M \times N$ matris ile ifade edilir ve aritmetik işlem sonucunda $M \times N$ matris olarak ifade edilir.[19]

4. Ölçüm Algoritması

Ölçüm algoritması ve kontrol teknikleri geliştirilirken kapalı kontrol teknikleri kullanılarak hata oranı en aza indirilmek istenmiştir. Ölçüm için kullanılabilecek birden fazla sensör çeşidi bulunmaktadır. Bu sensör çeşitleri kendi aralarında iyi ve kötü yanlarını barındırmaktadır. Ölçüm algoritmalarında kullanılan sensörün hassasiyetine ve çeşidine göre değişiklik göstermektedir. Bu tez kapsamında yapılan çalışma da geri bildirim sensörü olarak kamera kullanılacaktır. Kameraya bağlı bir mikroskop altında yapılan ölçümler sonucunda PID denetleyici yardımı ile Piezoelektrik maddeyi istenilen konuma getiren ve gelen konumda sabit kalmayı başaran, sürekli, bir denetleyici için ölçüm algoritması geliştirilmiştir.

4.1 Kullanılan Malzemeler

Piezoelektrik maddenin motor olarak kullanılması için Şekil 4.1 da görülen şema kullanılacaktır. Bu şemaya göre bir güç sisteminden alınan 100V voltaj değeri bir anahtarlamalı güç sistemine gönderilecektir. Bu güç sistemi kendisine uygulanan PWM dalgasını besleme voltajı olan 100V yardımı ile 0-100V arasına yükseltecektir. Yükseltilecek PWM sinyali filtrelendikten sonra piezoelektrik maddeye uygulanacaktır ve piezoelektrik maddenin boyunda değişim meydana gelecektir. Bu değişim ölçülerek motorun ne kadar hareket ettiği görülecektir.



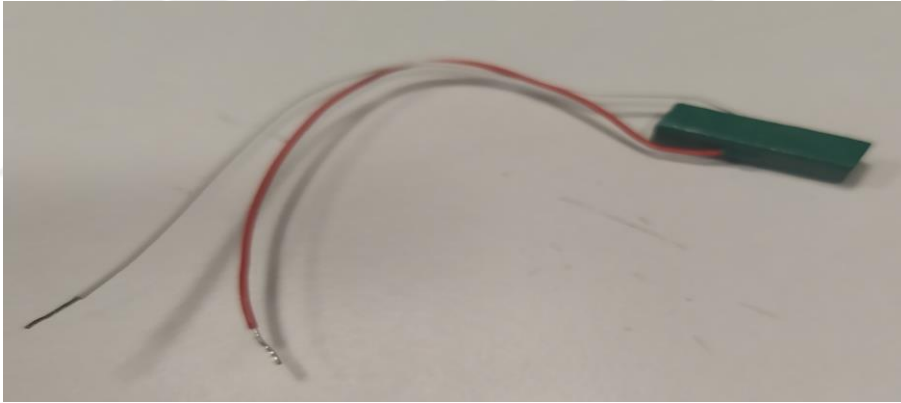
Şekil 4.1 Kullanılacak Tasarım Şeması

4.1.1 Arduino Uno

Dijital denetleyici olarak kullanılan Arduino Uno' da 8 bit PWM üretici bulunmaktadır. Böylelikle Piezoelektrik maddenin ilk değeri olan sıfır değeri ile son değeri olan en fazla voltaj değeri arasında 256 eşit adım olduğu kabul edilerek denetleyici tasarlanmıştır. Denetleyicideki PWM üreticisinin bit sayısı artırılarak daha hassas bir piezoelektrik motor elde edilebilir.

4.1.2 Piezoelektrik Madde

Deneylerde kullanılan Piezoelektrik madde Thorlabs tarafından üretilen AE0505D16F markalı piezoelektrik maddedir. Önerilen voltaj değeri olan 100 V değerinde toplamda 11.6 um uzama görüldüğü söylenmektedir. Bundan dolayı her bir adım yaklaşık 45 nm olarak hesaplanmaktadır. Ancak belirlenen adım değeri değişkenlik gösterebileceğinden kontrol algoritmasında bu değer her seferinde değişmektedir.



Şekil 4.2 Piezo stack AE050516DF

4.1.3 Kamera

Hata değerini ölçmek için kamera kullanıldığından hata oranı da belirli bir değerin altında olmamaktadır. Mikroskopların çeşitlerine ve kullanılan ışık kaynaklarına göre kameradaki her bir pikselin görebileceği minimum alan büyür veya küçülür. Tüplü mkroskoplarda beyaz ışık kullanıldığından minimum 200 nm' lik bir yer değiştirme gözlemlenir. Bu değer görünür ışığın dalga boyunun yarısına tekabül eder. Eğerki florasan mikroskobu veya elektron mikroskobu kullanılırsa bu mikroskoplarda kullanılan ışığın dalga boyu görünür ışığın dalga boyundan daha düşük olduğundan daha küçük hatalarda tespit edilebilir.



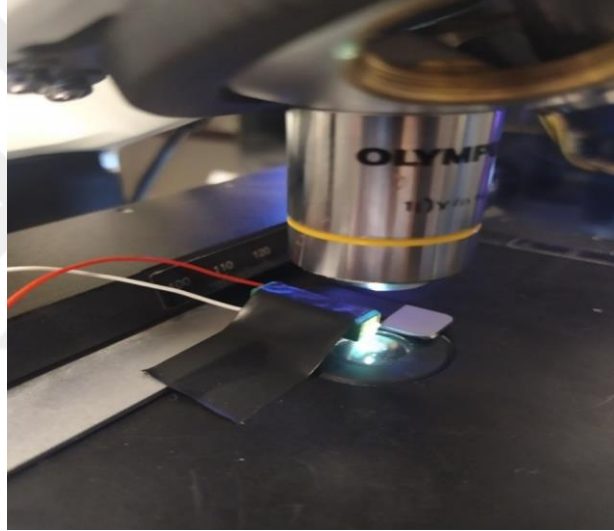
şekil 4.3 Deney Düzeneği

4.1.4 Güç Kaynağı

Anahtarlamalı güç sisteminin besleme voltajını üretmek için bir flyback dönüştürücü kullanılmıştır. Bir adaptör vasıtası ile 12/24 V arası değişen DC voltaj değeri flyback dönüştürücü ile 100V değerine yükseltilmiştir. Bu işlem ile birlikte piezoelektrik maddeye verilebilen en yüksek voltaj değeri sınırlandırılarak piezoelektrik madde fazla voltaj değerine karşı korunmak istenmiştir.



Şekil 4.4 Uygulamada kullanılan Flyback Konverter



Şekil 4.5 Mikroskop altındaki Piezoelektrik Madde(Olympus 10x Lens ile birlikte)

4.2 Kontrol Devresinin Çalışma Mantığı

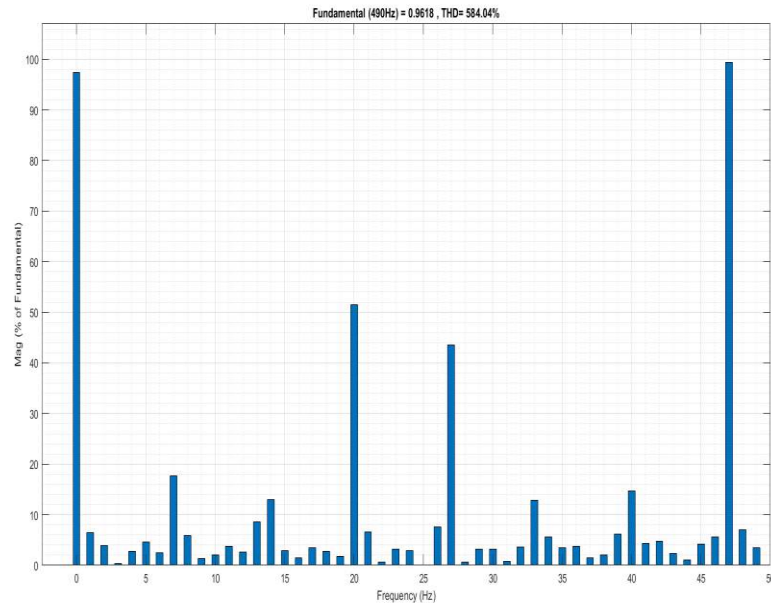
Kontrol devresi 3 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama voltaj kaynağıdır. Voltaj kaynağı sisteme 12/24 V arasında bir voltaj uygulanır ve üzerinde bulunan flyback DC/DC dönüştürücü ile 100 V değerine yükseltilir. Bu voltaj değeri kullanılan piezoelektrik etkiye sahip kristal maddenin önerilen maksimum voltaj değeridir. Bu değer istenirse 120 V değerine kadar yükseltilebilir.

İkinci aşama ise Pwm sinyalinin üretilmesi ve anahtarlama elemanının kontrolüdür. Normalde Piezo Driver olarak kullanılan denetleyicilerde op-amp devreleri kullanılmaktadır. Çünkü op-amp'lar düşük anahtarlama gürültüsüne sahiptirler ve PWM

sinyalinin frekansından dolayı bir gürültü oluşturmamalarıdır. Bu devrede ise op-amp devresine en yakın anahtarlama elemanı olan mosfetler kullanılacaktır.

Kullanılan mosfet N bölgesi mosfettir. Bundan dolayı mosfet'in gate terminaline voltaj uygulandığında mosfet iletme geçecektir ve diğer zamanlarda kapalı kalacaktır. PWM sinyali ise dijital denetleyici tarafından üretilecek ve anahtarlama elemanına uygulanacaktır. PWM sinyalinin frekansı anahtarlama elemanı için önemli olduğundan 490 Hz 'dir. Dijital denetleyici ünitesi olarak Arduino Uno kullanılacağından PWM frekansı önceden belirlenmiştir.

Üçüncü adım ise alçak geçiren filtrenin tasarımıdır. Alçak geçiren filterenin kullanılmasının sebebi ise piezoelektrik maddenin uzaması için DC voltaj gereklidir, ancak PWM sinyali AC sinyal olarak işlev yapmaktadır. Görev döngüsünü değiştirdiğimizde ise AC sinyalin DC eşleniğini değiştirmiş oluruz. DC voltaj elde edebilmek için anahtarlama elemanında oluşturulan PWM sinyalinin bütün AC harmoniklerinin filtrelenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.6 Anahtarlama elemanı 490 Hz için fourier analizi

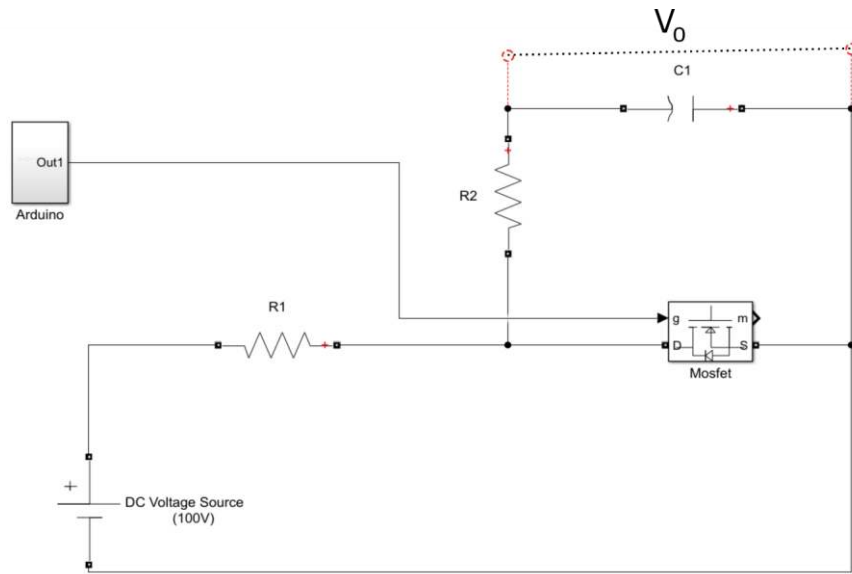
Ac harmonikleri bulmak için anahtarlama elemanından çıkan PWM sinyalinin Fourier analizinin yapılması gerekmektedir. Şekil 4.6' dan görüldüğü gibi fourier analizi ile ilk harmonik değeri 20Hz te bulunmaktadır. 20 Hz dahil diğer harmonikler ise bizim kurtulmak istediğimiz PWM sinyalinin AC bileşenleridir. Bu analize göre, yapılacak alçak geçiren

süzgecin en az 20 Hz ve üstündeki frekans değerlerine sahip bütün sinyalleri engellemesi istenmektedir. Bundan dolayı tasarlanacak alçak geçiren süzgecin kesme frekansı en fazla 20 Hz olmalıdır. Kesme frekansını 20 Hz yaparsak Dc sinyali tam anlamıyla yakalayamayız, çünkü anahtarlardan dolayı oluşacak ripple voltajı çok fazla olacaktır, ancak kesme frekansını çok az yaparsak PWM sinyalinde bulunan görev döngüsündeki değişimleri çok uzun zamanlarda yakalayacaktır. Bundan dolayı devrede kullanılan alçak geçiren filtre 9 Hz'e ayarlanmıştır.



Şekil 4.7 Filtreleme sonrası Farklı görev sürelerindeki çıkış voltajı

9Hz lik alçak geçiren süzgeç ile hem ripple voltajı engellenmiş olmaktadır hem de PWM sinyalindeki görev döngüsü değiştirildiğinde sistemin cevabı hızlı olmuştur.



Şekil 4.8 Piezoelektrik maddenin yer değiştirmesi kontrol eden sürücü devresi

Bu devrede kullanılan anahtarlama elemanı N kanallı MOSFET olduğundan sistemin toprağı kontrol edilmiştir. Bundan dolayı alçak geçiren filtre MOSFET'ten önce yerleştirilmiştir ve PWM sinyali ile Piezoelektrik etkiye sahip kristale giden voltaj (V_o) arasında ters bir ilişki vardır.

$$V_o = (1 - D) * V_i \quad (4.1)$$

4.3 Kalibrasyon

Kalibrasyon işlemi kameradan gelen görüntü ile uzama miktarının ölçülmesi için kullanılır. Ölçüm yönteminde kullanılacak olan eşik değeri belirlenerek her bir ölçüm sırasında eşik değeri belirli olur.

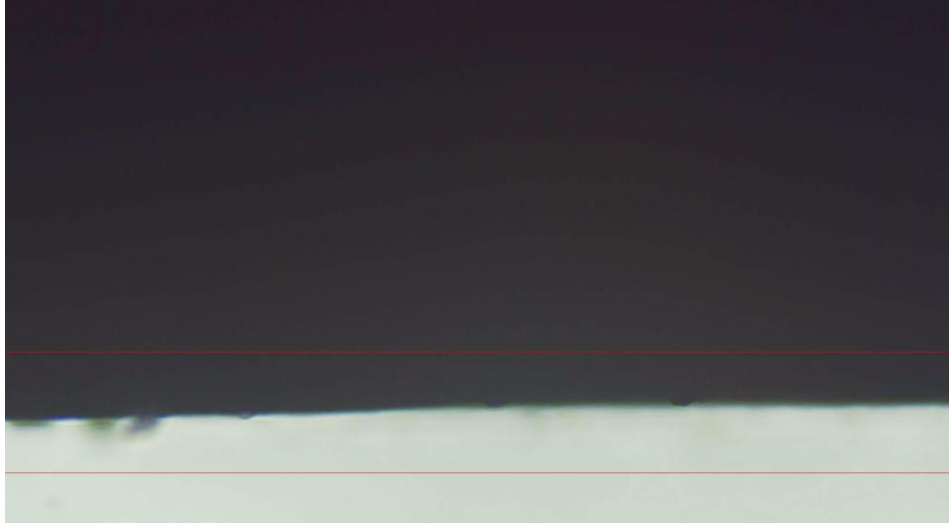
4.3.1 Resim bölütleme

Mikroskop altında bulunan piezoelektrik maddenin görüntüsü kamera tarafından sayısal görüntü olarak bilgisayar ortamına aktarıldıktan sonra resim üzerinde oluşan arkaplan görüntüsünü piezoelektrik maddeden ayırmamız gerekmektedir. Bunun için sayısal görüntüyü RGB uzayından gri formata çevrilmesi ve bölütleme işlemi ile piezoelektrik maddeyi ayırmamız gerekmektedir. Bölütleme işlemi için eşikleme yöntemi kullanılmıştır.

Bu yöntem ile birlikte alınan sayısal görüntü üzerinde bir eşik değeri belirlenerek belirli bir değerin üstündeki pikseller 255 değeri alırken onun altında kalan pikseller 0 değerine ulaşır. Böylelikle resim binarize edilerek resimde sadece piezoelektrik maddenin görüntüsü siyah ve geri plan ise beyaz olarak kalır.

4.3.2 Çalışma Alanının belirlenmesi

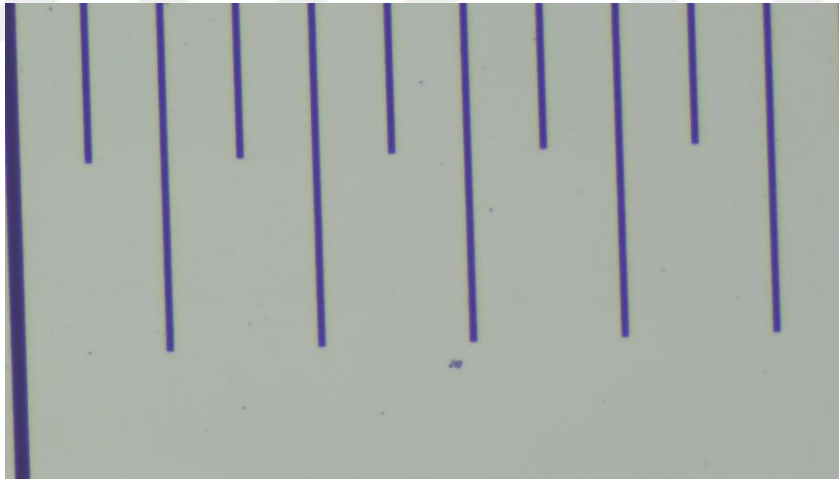
Bir piezoelektrik maddenin ne kadar uzayıp kısılacığı belirlidir. Bundan dolayı her bir ölçümde resmin hepsine bakmamız gerekmez, resmin sadece uzama ve kısalma yapacağını tahmin ettiğimiz bölgesine bakarsak hem işlem yükünden hemde işlem zamanında kazanılabilir.



Şekil 4.9 Çalışma alanının belirlenmesi (Kırmızı çizgiler çalışma alanının gösterir.)

4.3.3 Kalibrasyon ölçüsünün bulunması

Mikroskop altında kamera tarafından çekilen resimlerde her bir pikselin bir değeri bulunmaktadır. Bu değer her bir piksel değerinde eşit olmaktadır. Bu değer mikroskop ile kamera tarafından çekilen bir cetvel ile ölçülebilir.

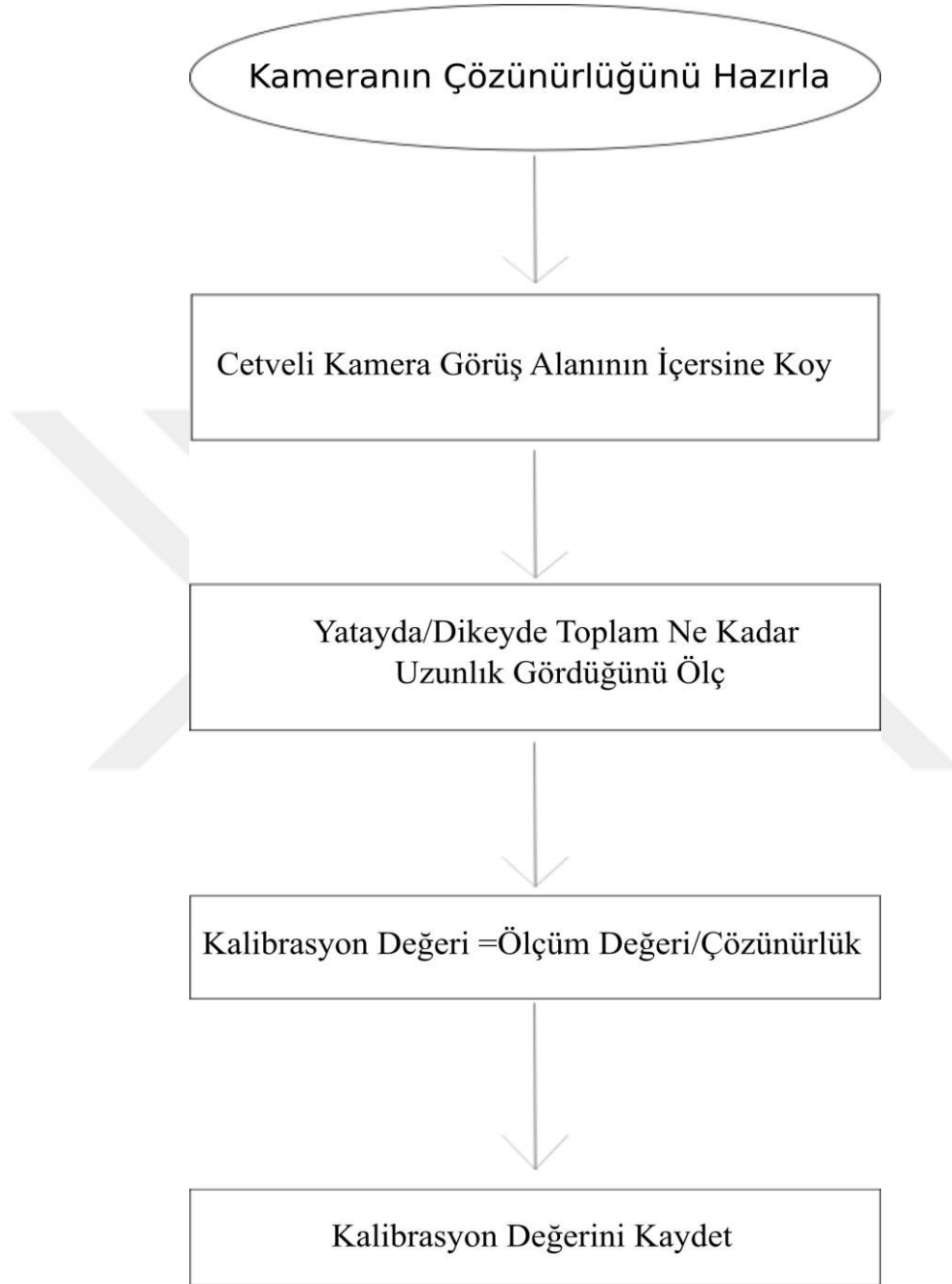


Şekil 4.10 Thorlabs 0.1 mm aralıklı cetvel görüntüsü

Bu cetvel yardımı ile bir sıra veya sütun sayısı boyunca kameranın ne kadar uzaklıktaki bir alayı gördüğünü tespit edebiliriz. Bu uygulama kapsamında bir satır piksel boyunca kamera 550 μm 'lik bir alan görmektedir.

Bu ölçülen değer bir satırda bulunan toplam piksel sayısına bölünürse bir pikselin ne kadar uzunluk ölçtüğü bulunabilir. Bir başka deyişle bir piksel değeri 0' dan 1' e gelmesi

durumunda o cisim bir piksel boyunca yol kat etmiş diyebiliriz ve o pikselin boyutunu bilirsek o cismin ne kadar yol katettiğini bulabiliriz. Bu uygulamada bir satırda toplam 1920 adet piksel bulunduğundan bir piksel yaklaşık olarak 286nm uzunluğa sahiptir.



Şekil 4.11 Kalibrasyon Akış Diagramı

4.4 Ölçüm yöntemi

Ölçüm yöntemi çekilen iki resim arasındaki farktan uzaklığın hesaplanmasıdır. Çekilen ilk resim çalışma alanı tanımlandıktan sonra bellekte saklanır. Bu adımdan sonra çekilen her resim ilk resimden çıkarılarak ilk duruma göre ne kadar uzama gerçekleştirildiği tespit edilir.

4.4.1 İlk resmin alınması

Mikroskop altında incelenen Piezoelektrik maddenin referans alınacak noktada ilk resminin çekilmesi gerekmektedir. Bu tez kapsamında referans noktası uzama miktarının maksimum olduğu noktadadır.

Tasarlanan denetleyici devresinde üretilen PWM sinyalinin görev süresi sıfır (0)' a ayarlanarak piezoelektrik madde üzerinde maksimum voltaj gerilimi sağlanmış olur. Bu voltaj değerinde Piezoelektrik madde maksimum uzama noktasına ulaşacaktır. Bu durumdayken kamera ile resim çekilerek sayısal görüntüye çevrilir.

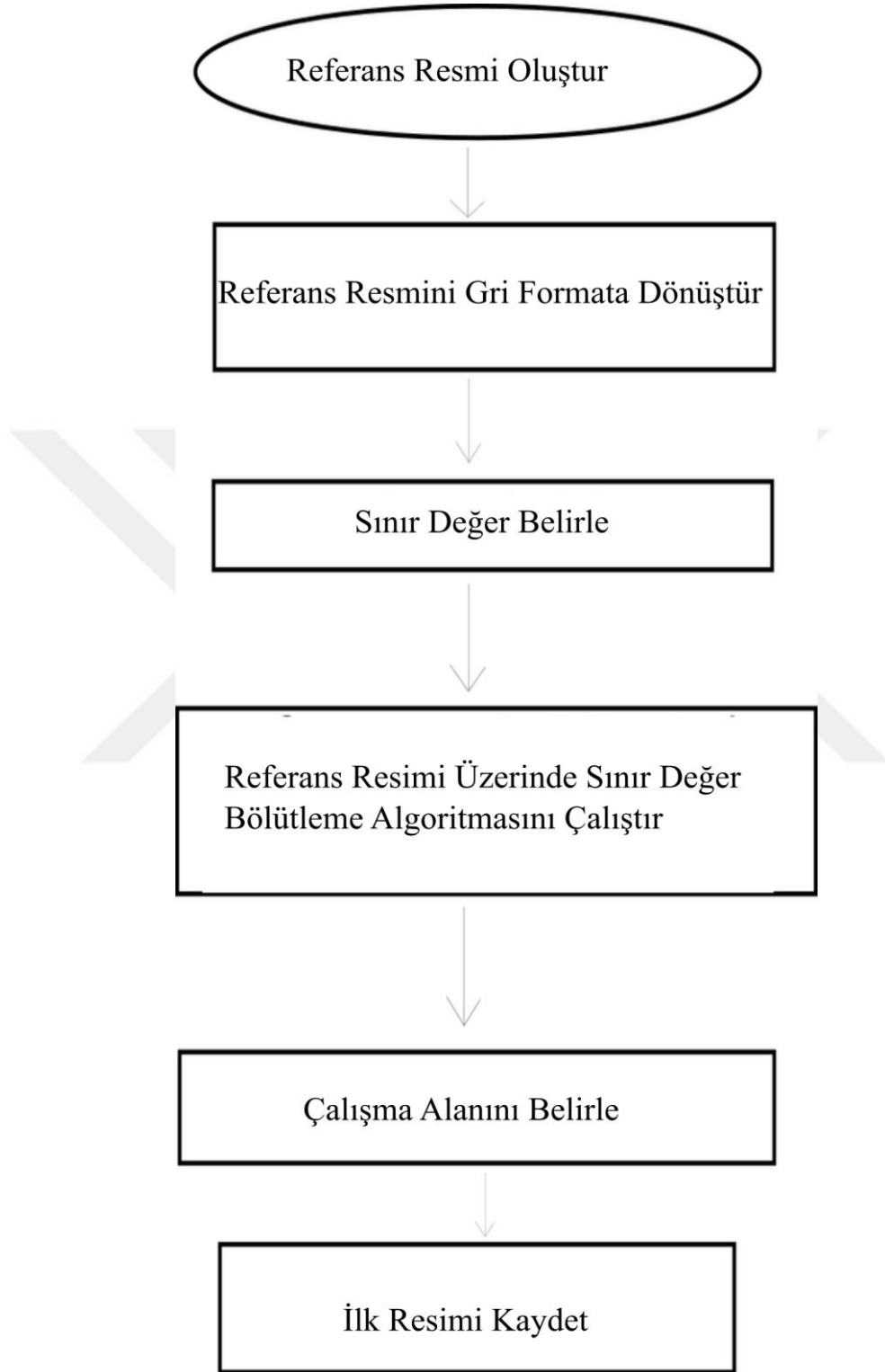
Daha sonraki işlemler için çekilen resim RGB uzayından Gri formata dönüştürülür. Gri formata dönüştürülen resim üzerinde eşikleme yöntemi ile bölütleme işlemi daha kolay bir şekilde yapılmaktadır.



Şekil 4.12 0V uygulandığında oluşturulan sayısal görüntünün $th=89$ eşik değeri uygulanarak bölütleme işlemine tabi tutulmuş resim

Hesaplamanın daha kolay olması ve matematiksel olarak bilgisayarın daha az yorulması için bir çalışma alanı belirlenmesi gerekir. Bu çalışma alanı sayısal görüntünün bütünü olacağı gibi sayısal görüntünün sadece belirli bir kısmı olarak seçilebilir. Teorik olarak Piezoelektrik maddenin uzama miktarı en fazla 18 piksel olabilir. Bundan dolayı seçilen alan

en az 18 piksel olmalı ve piezoelektrik maddenin uzama veya kısılma yapacağı bölgede olmalıdır.

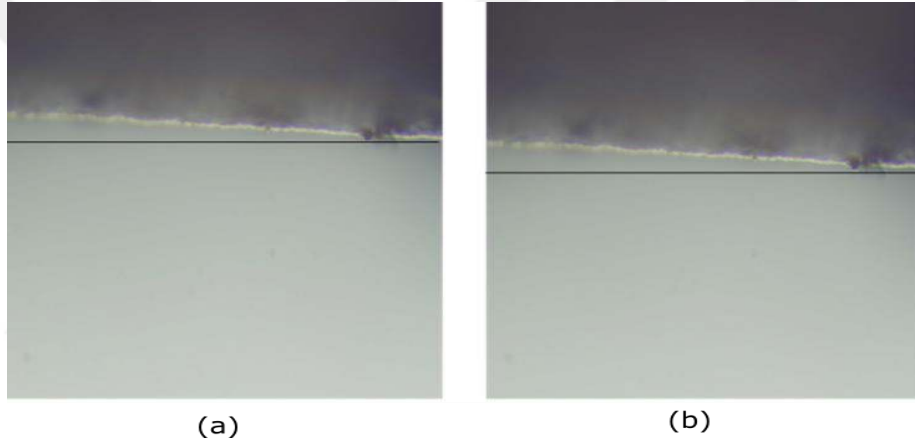


Şekil 4.13 İlk Resim Algoritması Akış Diagramı

4.4.2 Ölçüm Yapılacak Resmin Çekilmesi

İlk adıma göre boyunda değişiklik olan piezoelektrik maddenin resmi mikroskop altında kamera tarafında sayısal görüntü olarak kaydedilmelidir. Kaydedilen resim ilk adımda bulunan çalışma bölgesine düşürülmelidir. Sayısal görüntüler üzerinde yapılacak olan matematiksel işlemler için her iki resiminde satır ve sütun sayılarının eşit olması gerekmektedir.

Çalışma bölgesi belirlenen piezoelektrik maddenin sayısal görüntüsü eşikleme yöntemi ile görüntü bölütleme işlemine tabi tutulur. Referans sayısal görüntü de kullanılan eşik değeri ile sonradan kaydedilen sayısal görüntüde uygulanan eşik değerlerin aynı olması gerekmektedir.



Şekil 4.14 a) 0V voltaj uygulandığında b) 100V voltaj uygulandığında Piezoelektrik maddenin uzama miktarları

4.4.3 Çıkarma işleminin yapılması

Çıkarma işlemi iki resim arasındaki farkın bulunması amacıyla kullanılmaktadır. Son çekilen sayısal görüntü ile referans olarak kaydedilen referans görüntü arasındaki farklar sadece piezoelektrik maddenin uzaması ile sağlanabilir, bu etki haricinde dışarıdan gelen bütün etkiler gürültü olarak ölçülür.

$$s_{\text{çıkarma}}(x, y) = s_0(x, y) - s_i(x, y) \quad (4.2)$$

İki sayısal görüntü arasındaki fark sadece tek eksende olmalıdır. Her iki eksen de oluşan farklarda piezoelektrik madde ile ölçüm yapan kamera arasında açısal fark vardır ve

ölçüm yöntemine de bu açı değeri girilmelidir. Bu tezde piezoelektrik madde ile kamera arasındaki açı değeri sıfıra yakın olduğundan açı değeri sıfır alınmıştır.

Çıkarma işlemi sonucunda oluşan sayısal görüntü sadece piezoelektrik maddenin ilk referans uzamasına göre sonradan piezoelektrik maddenin voltaj değişiminden kaynaklanan uzama veya kısılma miktarını gösterir. Çıkarma işlemi sonucunda oluşan resimde beyaz olan bölgedeki her piksel 255 değerini alırken siyah olan alanlar 0 değerini almaktadır. Bu durumda sadece uzunluk değişimi olan bölge elde edilmiş olunur.

4.4.4 Resmin normalize edilmesi

Sayısal görüntü üzerinde sadece tek bir satır veya sütun üzerinde işlem yapmak beraberinde istenmeyen hataları da birlikte getirir. Bundan dolayı oluşan sayısal görüntü üzerinde tahminçiler yardımı ile tek bir satır veya sütun olarak sayısal resmi küçültmeliyiz. Piezoelektrik madde üzerindeki uzama miktarı ile piezoelektrik maddeye uygulanan voltaj değeri arasında doğrusallığa yakın bir ilişki olduğundan dolayı En Küçük Kareler Tahminçisi kullanıldı. (Denlem 4.3)

$$J = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} x[n]}{N} \quad (4.3)$$

Tez kapsamında Piezoelektrik madde kameranın yatay eksenine paralel olarak bağlandığı için sayısal görüntüdeki her bir satır bizim bir verimizi oluşturmaktadır. Her bir satırın toplamının ortalamasını almamızla birlikte En küçük Kareler Tahminçisi yöntemini uygulamış oluruz (Denklemler 4.4)

$$N(y) = \frac{\sum_{i=0}^n s(x_i, y)}{n} \quad (4.4)$$

Tahminci uygulandıktan sonra oluşan sayısal görüntü tek bir sütundan oluşan bir sayısal görüntüdür ve hatalar en aza indirilmiştir.

4.4.5 Resimden uzaklığın bulunması

Kamera tarafından oluşturulan sayısal görüntü üzerinde her bir pikselin temsil ettiği uzaklık aynı boyuttadır. En Küçük Kareler Tahminçisi ile tek bir sütuna indirilen sayısal görüntü ilk daha önceden bulunan kalibrasyon değeri ile çarpılır. Oluşan vektör her piksel üzerinde ne kadar uzama gerçekleştiğini gösterir. (Denklemler 4.5)

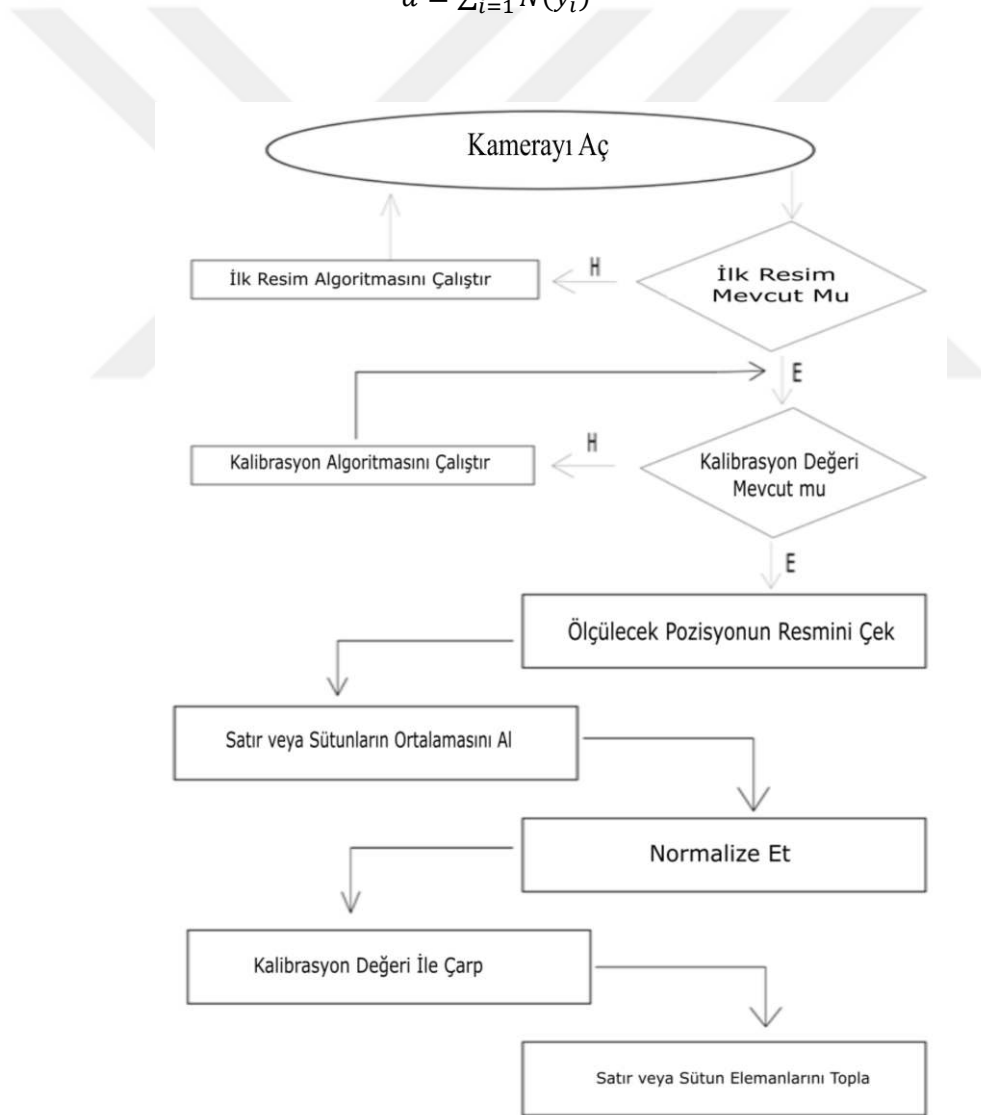
$$N(y_i) = N(y_i) * cc = \text{kalibrasyondeğeri} \quad (4.5)$$

Oluşturulan vektörde işlem yapmadan önce vektörün normalize edilmesi gerekmektedir. Kamera tarafından kaydedilen sayısal görüntüler bölütleme işlemi sonucu 0 ve 255 değerlerinden oluşmaktadır. Yapılacak ölçüm için her pikselin normalize edilmesi gerekmektedir. Vektörü binarize etmek için vektör içerisindeki en yüksek değere sahip eleman vektör içerisindeki bütün elemanlara bölünerek vektör 0 ile 1 değerleri arasında değere sahip olur (Denklem 4.6)

$$N(y_i) = \frac{N(y_i)}{\max [s(y)]} \quad (4.6)$$

Bu işlemden sonra normalize edilen vektör içerisindeki bütün elemanlar toplanarak uzama miktarı ölçülür. (Denklem 4.7)

$$d = \sum_{i=1}^n N(y_i) \quad (4.7)$$



Şekil 4.15 Ölçüm Akış diagramı

4.5 Hata oranı ve Tekrarlanabilirlik

Hata değerini ölçmek için ilk önce doğru eşikleme bölütleme değeri bulunmalıdır. Bulunan değerden sonra Piezoelektrik madde üzerine uygulanan voltaj değeri sabit bırakılarak arka arkaya ölçüm alındı. Ölçümler sonucunda alınan değerlerin ortalaması alınırdır ve ölçülen değerlerin ortalama dan ne kadar hatalı çıktığı gözlemlendi

Tablo 4.1 0V ve 100 V uygulanan piezoelektrik maddenin uzama miktar verileri

Uygulanan voltaj /Deneme Sayısı	0V	100 V
1	271,69	6016,64
2	259,54	6050,06
3	216,84	6079,81
4	335,69	6108,16
5	306,87	6137,28

Yapılan denemeler doğrultusunda ideal eşikleme bölütleme işleminde yapılan ölçümlerin standart sapmasının fazla değişmediği gözlemlenmiştir. İdeal olmayan eşikleme bölütleme işlemlerinde standart sapmalar ve ideal ölçüm aralıklarının birbirinden çok farklı çıktığı gözlemlenmiştir.

Alınan ölçümlerde ayrıca standart sapma verisi de bakıldı. Alınan ölçümler piezoelektrik maddeye hiç voltaj uygulanmadığında ve 100V uygulandığında yapıldı.

Tablo 4.2 0V ve 100V değerlerinde alınan verilerin a)ortalam değer verisi b) Standart Sapması c) İdeal Ölçüm Aralığı

Uygulanan Voltaj Değeri	Ortalama Değer Verisi	Standart Sapması	İdeal Ölçüm Aralığı	Eşik Değeri
0V	278,125	45,504	+ -60 nm	89
100V	6078,388	47,359	+ -60nm	

Kullanılan piezoelektrik maddenin verilen veri sayfasında farklı sıcaklıklar altında 9,6 um ile 13,6 um aralığında uzadığı tespit edilmiştir. Yapılan sistemde piezoelektrik maddenin her iki ucu hareketli olduğundan her iki ucunda da uzama görülmektedir, bu özelliğe göre piezoelektrik maddeye 100 V uygulandığında gözlemlenmesi gereken uzama miktarlarının 4.8 um ile 6.8 um aralığında olması beklenir. Piezoelektrik maddeye 100 V uygulandığında yapılan tüm ölçümler 4.8 um ile 6.8 um aralığında kalmıştır. Bu aralık belirlenen eşik değer verisine göre değişkenlik göstermekle birlikte eşik değer verisinin ideale yakın olduğu durumlarda ölçüm değerleri istenen değerlere yakınlık göstermektedir.



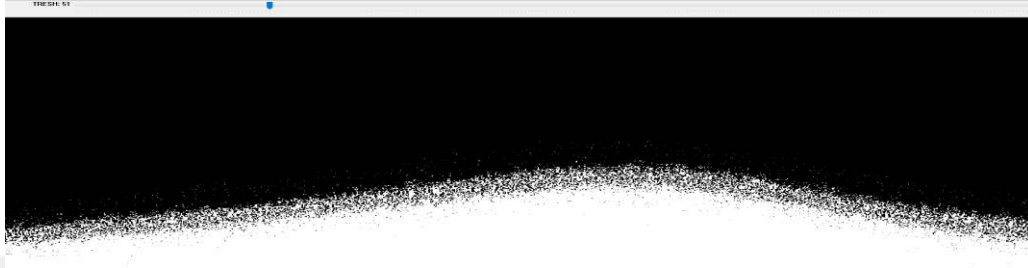
Şekil 4.16 100V uygulandığında oluşan uzama miktarında çekilen resmin referans resimden çıkartılmış hali

4.5.1 Eşik değer etkisi

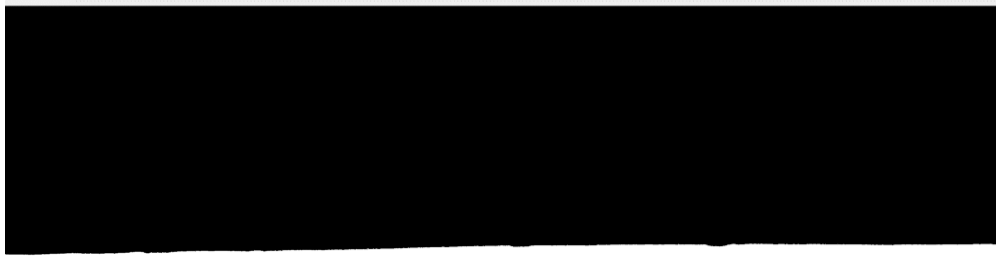
Ölçüm verisini etkileyen bir diğer unsur ise ayarlanan Eşik değer bilgisidir. Farklı eşik değer verileri ile farklı hata değerleri elde edilir. Bu farklar oluşturulan sayısal görüntü üzerinde piezoelektrik maddenin tüm geometrik özelliklerinin çıkmamasıdır. Bu

özelliklerin çıkartılması için belirlenen eşik değerin oluşturulan sayısal görüntüde görünen piezoelektrik maddeye en yakın görüntü elde edilmelidir.

Farklı eşik değerlerinde aynı özelliklere sahip bulgular karşılaştırıldığında ideal ölçüm aralığımız yani ölçüm yapıldıktan sonra üstüne konulacak hata payımız değişmektedir.



(a)



(b)



(c)

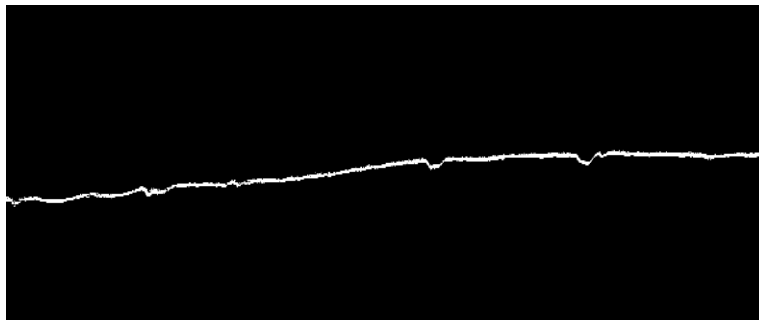
Şekil 4.17 a) Eşik Değeri Çok Yüksek b) Eşik değeri normal c) Eşik değeri çok yüksek

Tablo 4.3: Farklı sışıkır değerlerinde ve farklı voltaj değerlerinde alınan ölçümlerin a) ortalama değeri b) standart sapma değeri

Eşik Değeri	Voltaj Değeri	Ortalama Değer Verisi	Standart Sapması
89	0	278,125	45,504
	100	6078,388	47,359
120	0	40,879	67,149
	100	6266,573	17,698

4.5.2 Başlangıç Hatası

Şekil 4.8 den görüldüğü üzere anahtarlama elemanından gelen sinyal filtrelendiğinde ripple etkisine çok fazla maruz kalmadığı görülür, ancak anahtarlama elemanı sınır değerlerinde hiçbir zaman 0V değerine ulaşmadığı görülmektedir. Bunun nedeni anahtarlama elemanında oluşan kayıplardan meydana gelmektedir. Bu kayıplar anahtarlama elemanına uygulanan PWM sinyalinin frekansına bağlı olduğundan frekansın çok düşük olduğu şartlarda filtrelenmiş sinyalin 0V değeri ne daha fazla yaklaştığı gözlemlenebilir. Bu durumda filtrelemek ve ripple etkisinden kurtulmak için daha büyük kapasitörlerin kullanılması gerekmektedir



Şekil 4.18 Referans noktası olarak kaydedilen ilk resim

Bu hatanın diğer bir önemli nedeni ise yer değiştirme hatasıdır. Piezoelektrik madde bir kapasitör olarak modellendiği için ve voltaj altında bir kapasitörün davranışlarını sergilediği için uzama veya kısalma miktarı çok uzun zamanlarda sabit kalmaktadır. Piezoelektrik

maddeye voltaj uygulandığı anda uzama veya kısalma olayı hemen gerçekleşir ancak yer değiştirme hatasından dolayı sonlanmaz ve uzamaya veya kısılmaya devam eder.

4.6 Ölçüm Değerleri

Piezoelektrik maddenin belirli voltajlarda oluşan uzama miktarları kaydedilerek uzama ve kısalma grafikleri elde edilmektedir.

Kullanılan dijital denetleyici Arduino Uno olduğundan içerisinde 8-bit PWM generatör bulunmaktadır. Bundan dolayı 0 konumundan başlayarak 255 değerine kadar PWM sinyalinin görev süresini arttırılması ile uzama eğrisi elde edilmiştir.

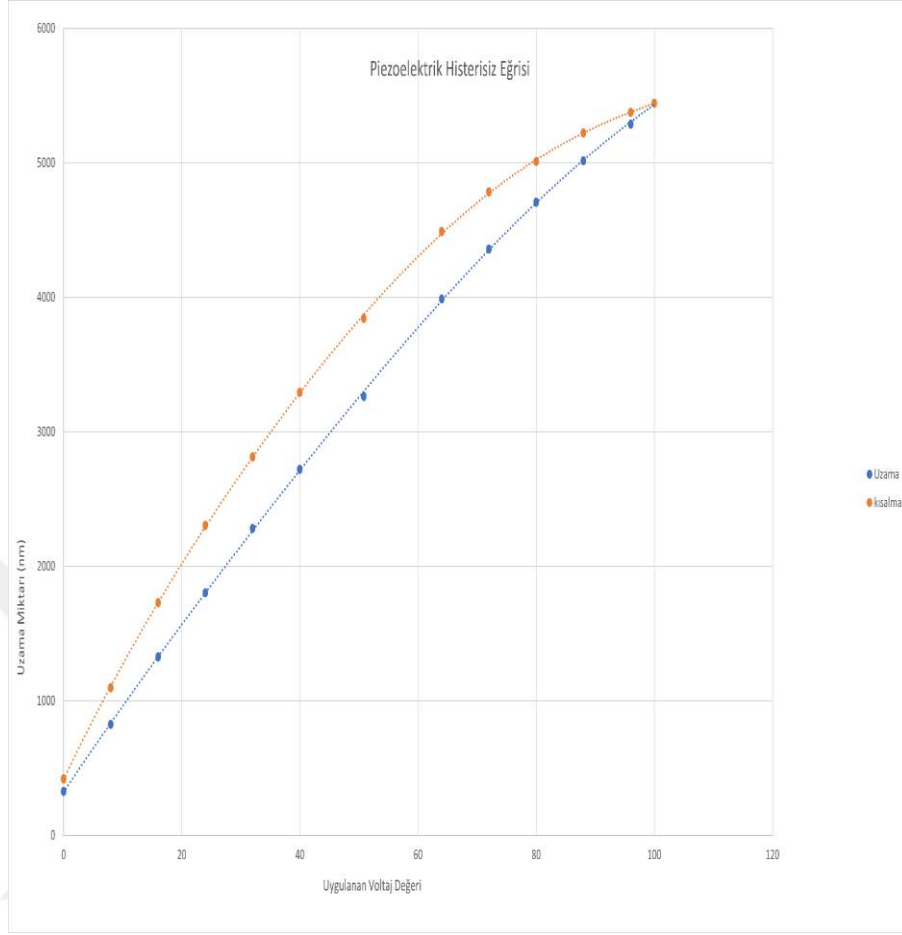
Tablo 4.4 Piezoelektrik maddenin uzama Verileri

PWM Görev Süresi	Uzama Miktarı (nm)
0	325,79
20	825,12
40	1325,09
60	1802,71
80	2282,12
100	2721,84
127	3262,94
160	3987,54
180	4358,66
200	4708,77
220	5014,62
240	5289,04
255	5443,77

En son nokta olan 255 değerinden PWM görev süresi 0 değerine düşürülerek kısalma eğrisi elde edilmiştir.

Tablo 4.5 Piezoelektrik maddenin kısalma verileri

PWM Görev Süresi (1/255)	Uzama Miktarı (nm)
255	5443,77
240	5374,95
220	5221,87
200	5010,77
180	4782,59
160	4489,97
127	3842,99
100	3293,43
80	2814,3
60	2303,94
40	1728,98
20	1098,43
0	419,36

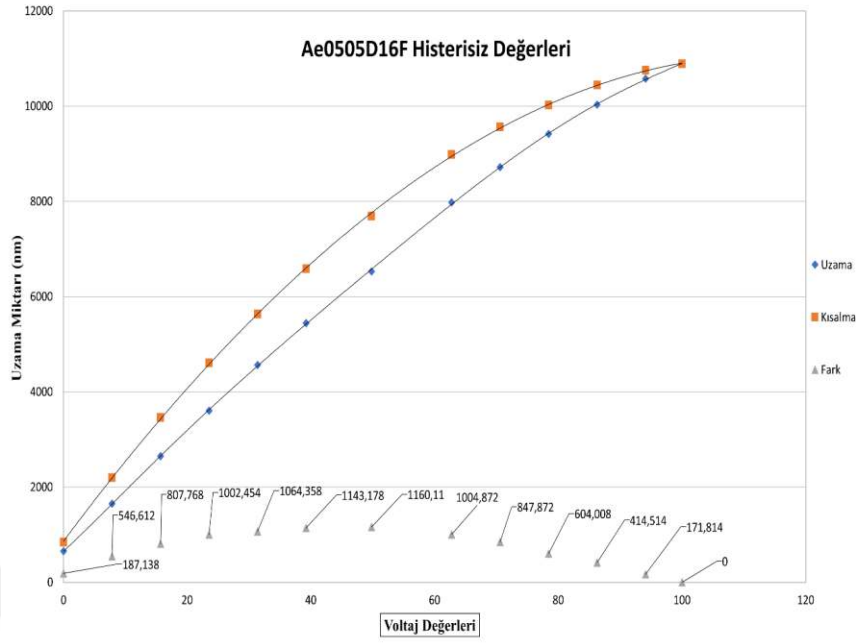


Şekil 4.19 Tablo 4.4 ve Tablo 4.5 deki verilere göre uzama ve kısalma eğrileri

Tablo 4.4 ve Tablo 4.5 deki uzama ve kısalma verileri kullanılarak oluşturulan uzama ve kısalma grafiklerini oluşturursak birbirlerinden farklı iki denklem elde edilir.

Farklı iki denklem edilmesinin sebebi ise kullanılan piezoelektrik maddenin histerisiz özelliğinden kaynaklanmaktadır. Histerisiz özelliği ile birlikte doğrusal olmayan bir grafik ortaya çıkar. Bu grafiğin doğrusal olmaması histerisiz özelliğinden kaynaklanmaktadır.

Piezoelektrik maddeye voltaj uygulandığında piezoelektrik madde her iki tarafından da yer değiştirme hareketi yapar. Bu özellikten dolayı tablo 4.4 ve tablo 4.5’ te bulunan yer değiştirme verileri voltajlar sabit bırakılıp yer değiştirme verileri iki ile çarpılırsa piezoelektrik maddede ki toplam yer değiştirme verisini elde etmiş oluruz. Histerisiz özelliğinden dolayı her iki denklem arasındaki fark farklı voltaj değerlerinde farklı değerler almalıdır.



Şekil 4.20 Alınan verilerin toplam yer değiştirmeye dönüştürülmesi ve iki yer değiştirme için farklı voltajlardaki farklar

Şekil 4.20’ de görüldüğü üzere en fazla fark 7. adımda ,49.8V değerinde, gözlemlenmiştir. 49.8 V’ ta ölçülen fark değeri 1160,11 nanometre yani 1,16 mikrometre değerindedir. Yapılan başka ölçümlerde[23] Fark değerinin en fazla olduğu değerin 45V’ ta 1.15 mikrometre ölçülmüştür.Bizim fark değerlerimize baktığımızda bu değere çok yakın olduğu gözlemlenir.

Her histerisiz sistemde bir histerisiz değeri vardır. Bu değer ölçülen en fazla farkın toplam yer değiştirmeye olan oranıdır[23]. Kullandığımız piezoelektrik maddenin histerisiz değeri %10,65 çıkmaktadır.

5 Denetleyici Tasarımı

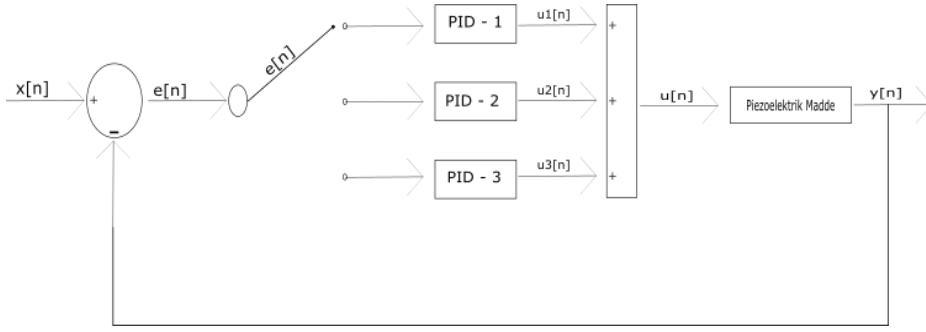
Piezoelektrik maddenin uzama miktarı, tüplü mikroskobun 10x büyütme merceği yardımıyla nanometre hassasiyetinde ölçülmüştür. Bu ölçümler piezoelektrik motor için ölçüm miktarının istenilen değere getirilmesi ve bu değerde tutulması için denetleyici tasarımında yardımcı olmaktadır.

İstenilen uzama değerinin bir arayüz programı yardımıyla sisteme girilmesi ve ölçüm algoritmasının arka planda çalıştırılması ile hata oranını en düşük değere getirmek istenmiştir. Ölçüm ile istenilen değer arasındaki hata payı ise PID denetleyici ile sıfıra indirilmesi gerekmektedir. Tablo 4.4 ve Tablo 4.5’ te bulunan uzama ve kısalma değerleri üzerinden piezoelektrik maddenin voltaj değişimine göre yer değiştirmesi hesaplanmıştır.

Piezoelektrik maddenin voltaj değerindeki değişimlerine göre oluşturulan yer değiştirme modeline göre bir denetleyici tasarlanarak piezoelektrik maddenin yer değiştirmesi kontrol edilecektir. Ölçümler her 10 saniyede bir alındığından sistemin örnekleme periyodu 10 sn olarak seçilecektir ve bu kabula göre voltaja göre yer değiştirme verilerine dayanarak bir denetleyici tasarlanacaktır.

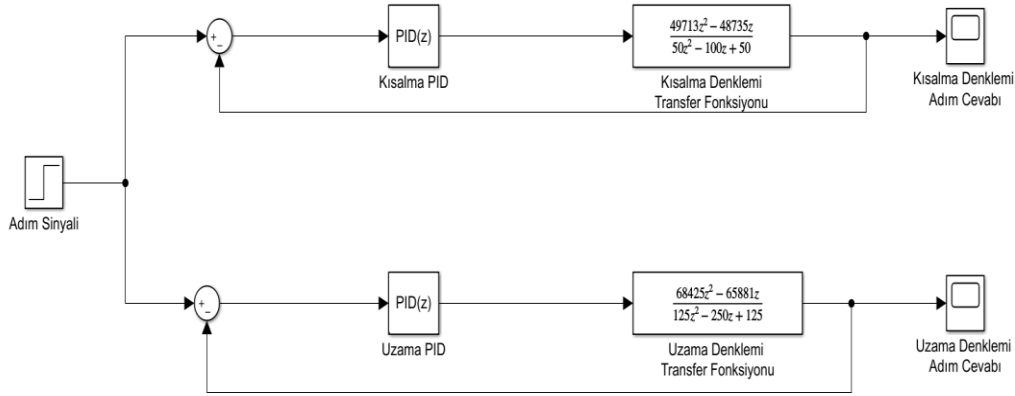
Yapılacak denetleyici histerisiz hatasından dolayı her iki yer değiştirme olayı için, uzama ve kısalma olayları için, iki ayrı denetleyici tasarlanacaktır. Bu denetleyici Değişken Yapılı Histerisiz Denetleyici olacaktır ve hatanın değerine göre 3 farklı denetleyici arasında seçim yaparak hangi denetleyicinin kullanılması gerektiğine karar verecektir.

Değişken Yapılı Histerisiz Denetleyicide ilk iki denetleyici geçici durum tepkisi için tasarlanmıştır. Bu denetleyiciler istenilen değer ile ölçülen değer arasındaki farkın çok olması durumunda kullanılacaktır. Sonuncu denetleyici ise histerisiz özelliği ve yer değiştirme hatasını engellemek için kullanılacaktır. İlk iki denetleyiciden biri kullanılarak hata değeri belirli bir değere yaklaştırıldıktan sonra üçüncü denetleyici devreye girerek daha hassas ayarlamalar yapabilecektir.



Şekil 5.1 denetleyici Algoritması Şeması

Tablo 4.4 ve Tablo 4.5’ te ölçülen veriler voltaj değişimine göre ölçülen verilerdir ancak örnekleme periyodunu 10 sn olarak seçebiliriz. Örnekleme periyodu seçilirken ölçümler arasındaki zaman farkı dikkate alınmıştır. Buna göre yapılan her ölçüm voltaj değişiminden hemen sonra yapılmaktadır ve 8-10 sn arasında sürmektedir. Bundan dolayı ölçümlerin sabit zaman aralıklarında yapıldığını kabul edebiliriz.



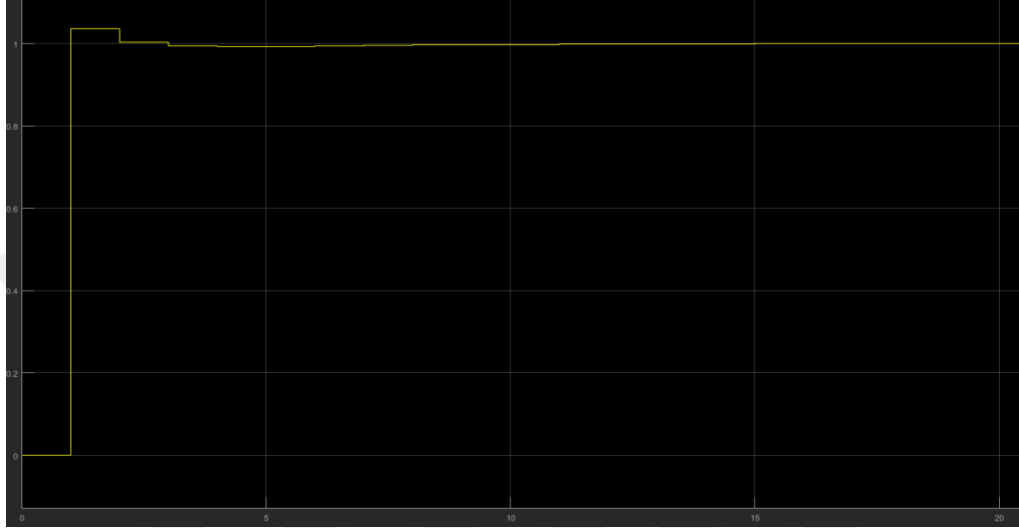
Şekil 5.2 Denetleyici Algoritmasının Modellenmesi

Şekil 5.2’ e göre PID parametrelerini tasarlamamız gerekmektedir. Bu işlem için Matlab/Simulink programında PİD denetleyici sekmesindeki ayarlama işlemi ile yapılmaktadır. Yapılan otomatik ayarlama işleminde ayrık zamanlı işlemler için seçeneği seçilmiştir. Tasarım yapılırken dikkat edilen iki parametre vardır. Bunlar kalıcı-durum hatasının sıfır olması ve en büyük aşmanın olabilecek en düşük değere sahip olmasıdır. Yapılan matematiksel modellere göre her iki denklem içinde en büyük aşmanın en az istenilen değerin 0.1 katına kadar düşürülmüştür.

Uzama denklemi için tasarlanan PID denetleyicisinin parametreleri Sırasıyla

- $K_p = 0.033555$
- $K_i = 0.0068513$
- $K_d = 0.015515$

bulunmaktadır. Bu parametrelere göre uzama sistemin adım cevabı çizdirilmek istenirse şekil 5.3 daki grafik karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 5.3 Verilen parametrelere göre uzama transfer fonksiyonunun adım cevabı

Belirlenen PID parametrelerine göre Şekil 5.1’ de verilen akış şemasında bulunan fonksiyonlar

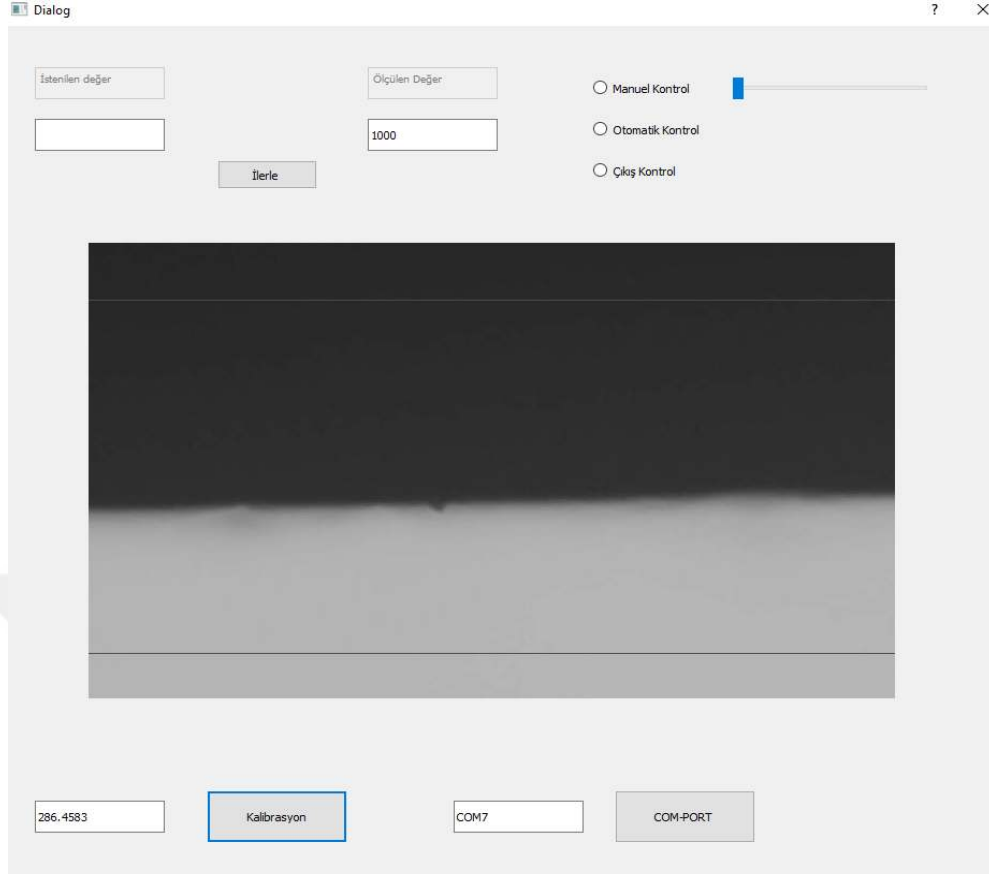
$$e[n] = x[n] - y[n] \quad (5.1)$$

$$u[n] = K_p * e[n] + K_i * \int e[n] + K_d \frac{e[n]}{dn} \quad (5.2)$$

olarak hesaplanabilir.

$x[n]$ değeri istenilen değer, $y[n]$ ise ölçüm sonucu bulunan uzama değeridir. $e[n]$ fonksiyonu ise hata değerini göstermektedir. $u[n]$ fonksiyonu ise denetleyici sinyalinin fonksiyonudur. Denetleyici fonksiyonu PID parametreleri ile oluşturulurken hata fonksiyonu geri besleme olarak kullanılan değerdir.

5.1.Arayüz Programı

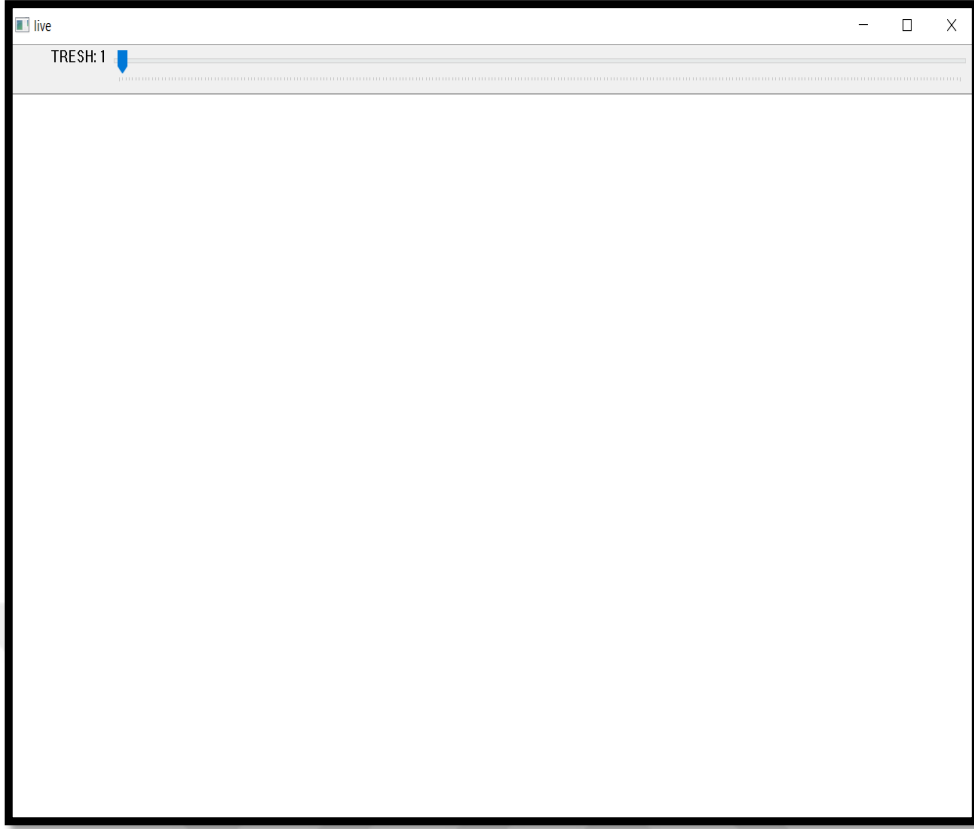


Şekil 5.4 Arayüz Programı

Arayüz programı sayesinde kalibrasyon algoritması ilk resim algoritması ve ölçüm algoritması istenilen özellik için kullanılır.

COM-PORT düğmesi ile denetleyici için kullanılan arduinonun bilgisayar ile haberleşmesi için kullanılan Com-port seçilmelidir. Deney sırasında Arduino ile bilgisayar arasındaki haberleşme bilgisayar tarafından otomatik olarak atanan COM7 portu ile sağlanacaktır.

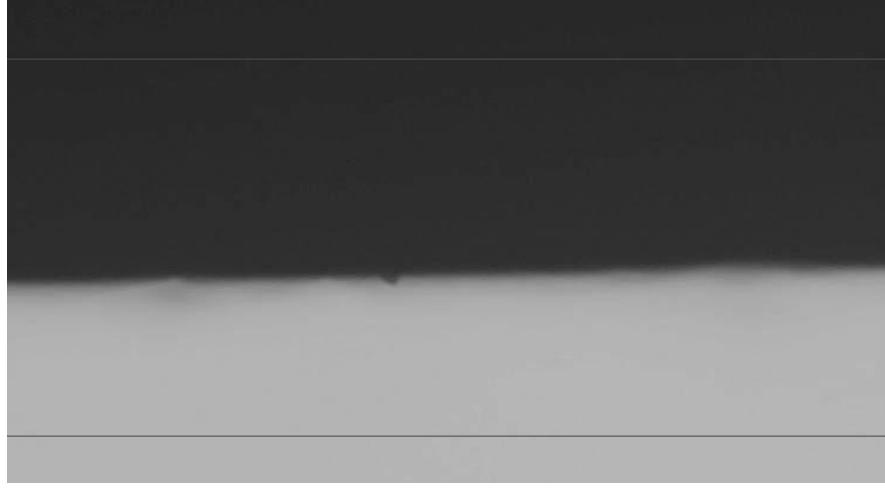
Kalibrasyon işlemi öncesinde bir kalibrasyon değerine ihtiyacımız vardır. Kalibrasyon ölçüsü bir cetvel yardımı ile bulunabilir. Mikroskop üzerinde 10x yakınlaştırıcı lens takılı durumdayken ölçüm ve kalibrasyon işlemleri yapılır. Mikroskop üzerine takılı 10x yakınlaştırma lensi ile bulunan 286,4583 nm lik değer yazılarak kalibrasyon işlemine başlanır .



Şekil 5.5 Kalibrasyon için eşik değeri bulunması

Arayüz programında kalibrasyon değeri girildikten sonra kalibrasyon düğmesi yardımı ile uygun eşik değerin seçilmesi ve çalışma alanının belirlenmesi istenmektedir. Şekil 4.21’ de görüldüğü üzere eşik değeri kameradan gelen bir görüntünün eşik değeri bir kaydırıcı yardımı ile ayarlanabilmektedir.

Ayrıca şekil 5.7 den görüldüğü üzere çalışma alanı kırmızı çizgiler ile belirlenmektedir. Bilgisayara ait farenin her bir sağ tık işlemi ile bir çalışma alanının bir eşik belirlenmektedir.



Şekil 5.6 Çalışma alanı belirlenen kalibrasyon resminin gri formattaki hali

Ölçüm sekmesinden el ile kontrol veya otomatik kontrol seçilmelidir. El ile kontrol seçilirse istenilen değer kısmına 0-255 arası bir değer girilmelidir. Bu değer anahtarlama elemanına giden PWM sinyalinin görev süresini belirler. Arduino üzerinde 8 bit adc olduğundan görev süresi 0-255 arasındaki tam sayılardan oluşmaktadır.

Otomatik kontrolde ise istenilen değer kısmına piezoelektrik maddenin referans noktasından kaç nanometre uzaklıkta olmasını istediğimiz değer yazılır. İlerle butonu ile ölçüm işlemi başlar. Otomatik kontrol seçeneğinde tasarlanan PID denetleyici yardımı ile gelen sinyal direk olarak PWM sinyalinin görev süresindeki değişimi göstermektedir. otomatik kontrol sekmesinde her bir ölçüm yaklaşık olarak 8-10 saniye arasında sürmektedir

5.2 PID Denetlevicilerin uygulanması

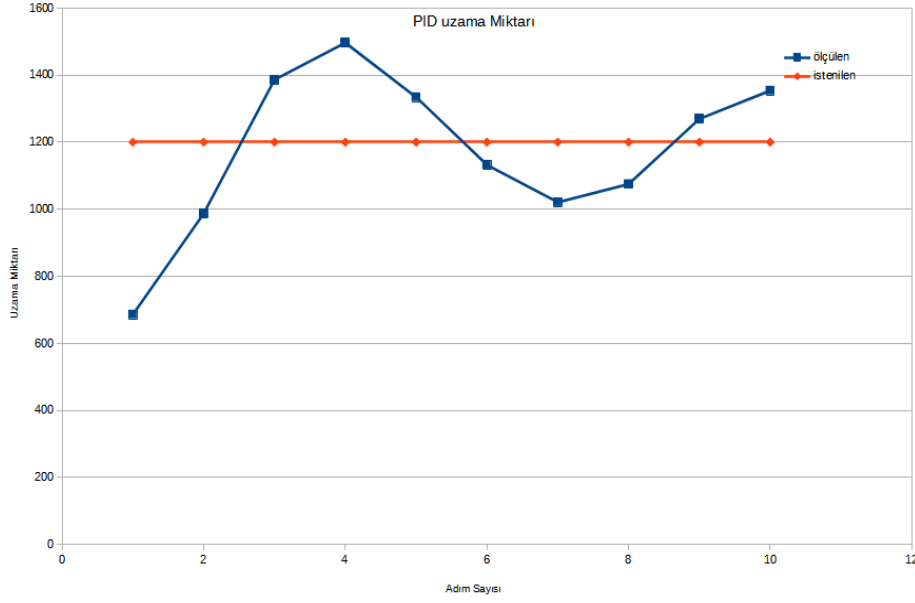
Daha önceden verilen K_p , K_d , K_i parametreleri ölçüm algoritması sonrasında sisteme uygulanan denetleyici için seçilirse karşımıza çok hızlı ancak sönümlenemeyen, kalıcı durum hatası çok fazla olan, bir sistem ortaya çıkar. 0 nanometre düzeyinden 1200 nanometre düzeyine otomatik olarak çıkması için verilen PID parametreleri sisteme uygulandığında Tablo5.1’de görülmektedir

Tablo 5.1 $K_p = 0.033555$, $K_d = 0.0068513$, $K_i = 0.015515$ ve $x(t)=1200$ için uzama ölçümleri

Adım	Uzama miktarı	Denetleyici Sinyali
1	685,73	20
2	987	30
3	1385,83	22
4	1496,28	9
5	1334,09	-1
6	1132,25	-1
7	1020,73	5
8	1074,97	12
9	1269,31	13
10	1353,61	9
11	1271,54	3
12	1052	3

Tablo 5.1’ da sadece uzama denklemine göre ayarlanmış PID denetleyicisi için yapılmıştır. Denetleyicinin en büyük aşmanın 3. adımda görmekteyiz ve ölçülen ilk 10 adım boyunca sönümlenmediğini veya kalıcı durum hatasına geldiğini görmekteyiz.

Ancak histerisiz durumundan dolayı sönümlenme 12. adımda da devam etmektedir, ancak şekil 5.4’ e göre oluşturulan denetleyici için adım yanıtı geçici durum hatasından 5. adım da kurtulması gerekirken 12. adıma kadar kurtulamadığı, $\pm 200\text{nm}$ kadarlık bir salınım yaptığı görülmektedir. Şekil 5.7’de görüldüğü üzere herhangi bir sönümleme gerçekleşmemektedir.



Şekil 5.7 $K_p = 0.033555$, $K_d = 0.0068513$, $K_i = 0.015515$ ve $x(t)=1200$ için uzama grafiği

Bu değerler ile birlikte ortalama 200 nanometre hata payı ile sistemi kontrol edebiliriz. Bulunan denkleme göre tasarlanan denetleyicinin adım cevabından daha farklı cevap vermesinin ve bu kadar titreşiminin olmasının en önemli sebebi ise histerisiz özelliğinden kaynaklanmaktadır. Ölçüm değeri istenilen değerden daha fazla olduğu durumda sisteme eksi yönde bir PID değeri gelecektir ancak sistem için belirlenen denklem doğrultusunda hareket etmeyeceğinden denetleyici istenildiği gibi çalışmayacaktır. Bundan dolayı tek bir denetleyici yerine en az iki denetleyicinin birlikte çalışması gerekmektedir. Değişken yapıli histerisiz denetimi vasıtası ile hata değerinin mutlak değeri belirli bir değerin altında ölçüldüğü zaman sistem başka bir denetleyici tarafından kontrol edilerek yerdeğiştirme yönünün değişmemesi sağlanmalıdır. Bu işlem de sistemin kalıcı durum hatasına girdiğini kabul ediyoruz, bunun için oransal ve integral denetleyici kullanmamız gerekmektedir.

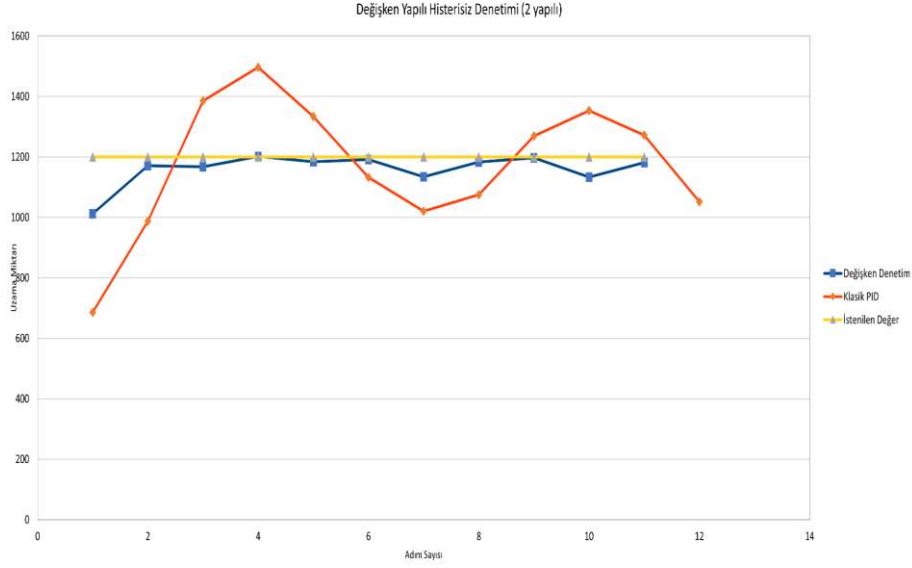
$$u(t) = \begin{cases} K_p * h(t) + K_i * \int h(t) + \frac{K_d * dh(t)}{dt}, & |h(t)| > 300 \\ K_p * h(t) + K_i * \int h(t), & |h(t)| \leq 300 \end{cases} \quad (5.3)$$

Tablo 5.2 Değişken Yapılı Histerisiz Denetleyici ile $x(t)=1200$ için uzama değerleri

Adım	Uzama miktarı	Kontrol sinyal değeri
1	1011,89	27
2	1171,48	6
3	1167,53	1
4	1201,43	1
5	1184,318	0
6	1191,59	1
7	1134,016	0
8	1182,73	2
9	1197,35	1
10	1133,4	0
11	1181,07	2

Bir önceki denetleyiciye kıyasla Değişken yapıli histerisiz denetimi yapılinca geçici hal hatasından çok çabuk çıkılmıştır. Kalıcı durum hatasını kurtamak için oransal ve integral denetim mekanizmalarını aynı anda kullandığımızdan dolayı daha kalıcı durum hatamız belirlediğimiz değerden daha az bir değere kadar inmiştir.

Bu tarz bir denetleyici ile daha önceden bulunan histerisiz eğrilerine göre kolayca denetleyebilen ve ayrıca yer değiştirme hatasına da direnç gösteren bir mekanizma olacaktır.



Şekil 5.8 Değişken Yapılı Histerisiz Denetleyici ile normal denetleyicinin $x(t) = 1200$ için uzama grafiği

Bu parametreler sadece 0 nm den başlayıp $x(t) = 1200$ nm ye kadar uzama gerçekleştirip daha sonra belirlenen değerde kalması için denenmiştir. Ancak belirli bir noktadan başlayıp daha düşük bir istenilen noktaya kısalıp o noktada sabit kalması gerektiği zaman aynı parametreler kullanıldığında daha farklı sonuçlar elde edilebilir.

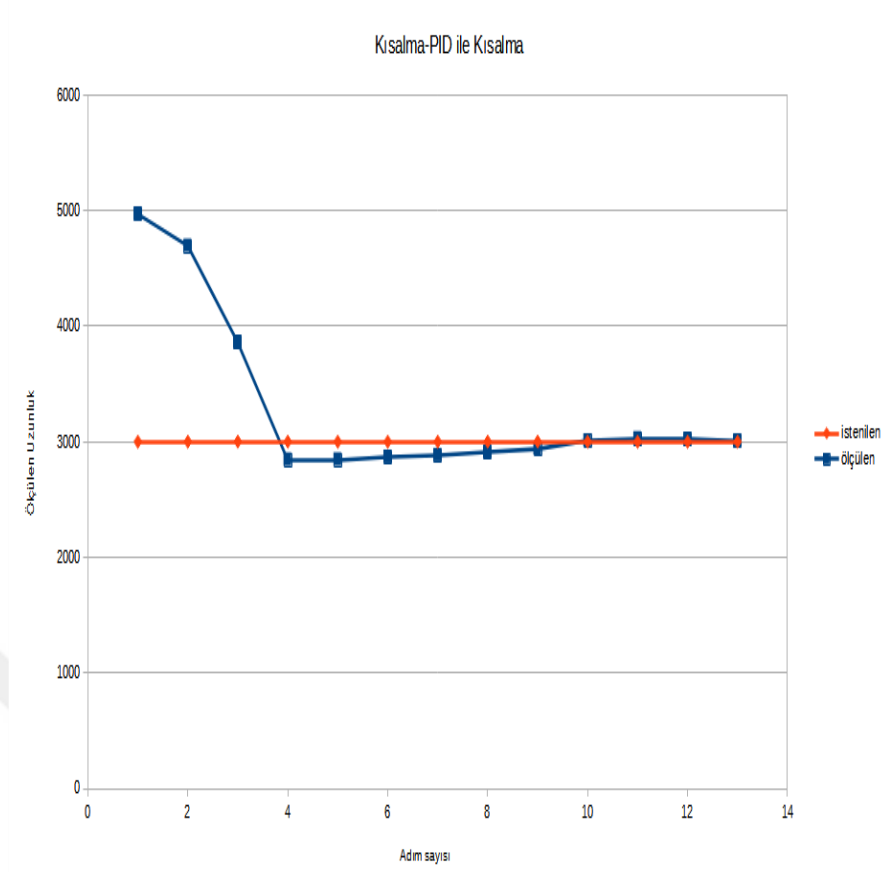
Şekil 5.3' e göre PID parametrelerini tekrar tasarlamamız gerekmektedir. Yapılan tasarlama işleminde ayırık zamanlı işlemler için seçeneği seçilmiştir .

Optimizasyon işlemi yapıldıktan sonra kısalma denklemi için tasarlanan PID denetleyicisinin parametreleri Sırasıyla

- $K_p = 0.018101$
- $K_i = 0.0036935$
- $K_d = 0.0084167$

olarak bulunur.

Bu parametrelere göre uzama sisteminin adım cevabı çizdirilmek istenirse şekil 5.10'daki grafik karşımıza çıkmaktadır. Bu parametreler uzama işleminde Değişken Yapılı Histerisiz Denetleyici ile birlikte yapılmıştır. Bu işlemler sonucunda çıkan değerler tablo 5.3' te verilmektedir.



Şekil 5.9 $x(t)=3000$ nm için kısalma parametreleri ile tasarlanmış denetleyicinin cevabı

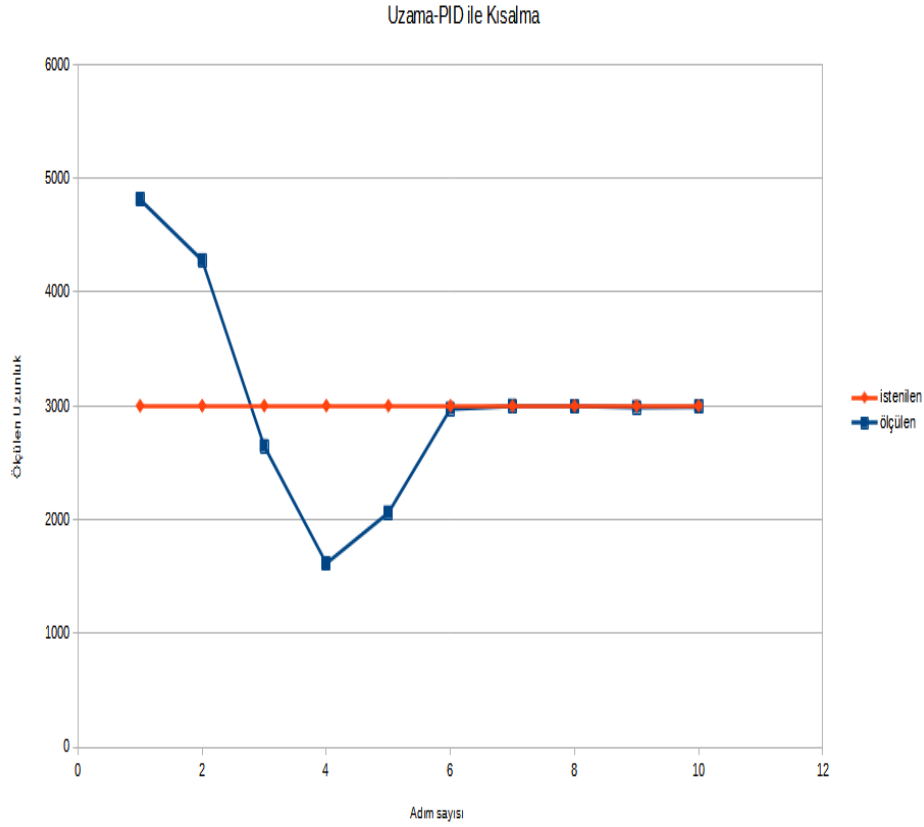
Tablo 5.3 $x(t)=3000nm$ için a)uzama denklem parametreleri b) kısıalma denklemi parametreleri için kısıalma değerleri

İterasyon	Uzama Denklemi	Kısıalma Denklemi
1	4810,4	4967,06
2	4277,05	4692,79
3	2643,45	3856,95
4	1614,7	2842,96
5	2059,26	2843,46
6	2972,09	2867,52
7	2998,3	2882,12
8	2991,48	2909,52
9	2986,45	2935,53
10	2988,45	3008,43

Değişken yapılı histerisiz denetimi uygulamasının uzama olayında sönümlemeyi çok fazla azalttığından dolayı aynı parametreler ile kısıalma işlemi gerçekleştirildiğinde Tablo 5.3’ deki sonuçlar elde edilmektedir.

Bu sonuçlara göre geçici hal hatasını dikkate aldığımız takdirde her iki durum için iki ayrı denetleyici kullanmamız gerekmektedir. Uzama PID’ si ile yapılan ölçümlere göre geçici hal hatası 6. adımda sonlanır ve çok fazla titreşim verirken kısıalma PID’ si ile yapılan ölçümlere göre geçici hal hatasında 4. adımda çıkmaktadır. Bu özelliklerden dolayı titreşim az olması gereken sistemlerde her PID denetleyicisinin de kullanılması gerekmektedir. Bu işlem için Değişken Yapılı Histerisiz Denetleyici kullanıldığında en az adet PID kullanılması gerektiği görülmüştür.

Tablo 5.3’ e göre Uzama PID’si kullanıldığında yaklaşık 1400nm ‘lik bir titreşim görülmektedir ancak kısıalma PID’ si ile birlikte titreşime girmeden kalıcı durum hatasına girmektedir ve titreşim olmamaktadır.



Şekil 5.10 $x(t)=3000$ nm için uzama parametreleri ile tasarlanmış denetleyicinin cevabı

Tasarlanan denetleyici sadece uzama denklemi için tasarlanan denetleyici ile çalışabilmektedir. İstenilen değer ters yönde değiştirildiğinde de bu sistemin çalışması gerekmektedir. Bunun için istenilen değer $x_1(t) = 1200$ değerinden $x_2(t) = 800$ değerine düşürüldüğünde uzama denklemi için tasarlanan denetleyicinin titreşim bölgesine girmeden ikinci istenilen duruma geçmesi beklenmektedir.

Tablo 5.4' te sıfır durumundan ilk istenilen durum olan $x_1(t) = 1200$ değerine gelip sabit kalan ondan sonra ise ikinci durum olan $x_2(t) = 800$ değerine gelip orada da sabit kalan bir olayda nasıl cevap verdiği görülmektedir.

Tablo 5.4: $x_1(t) = 1200$ değerinde iken $x_2(t) = 800$ değerine gelen sistemin ölçülen değerleri

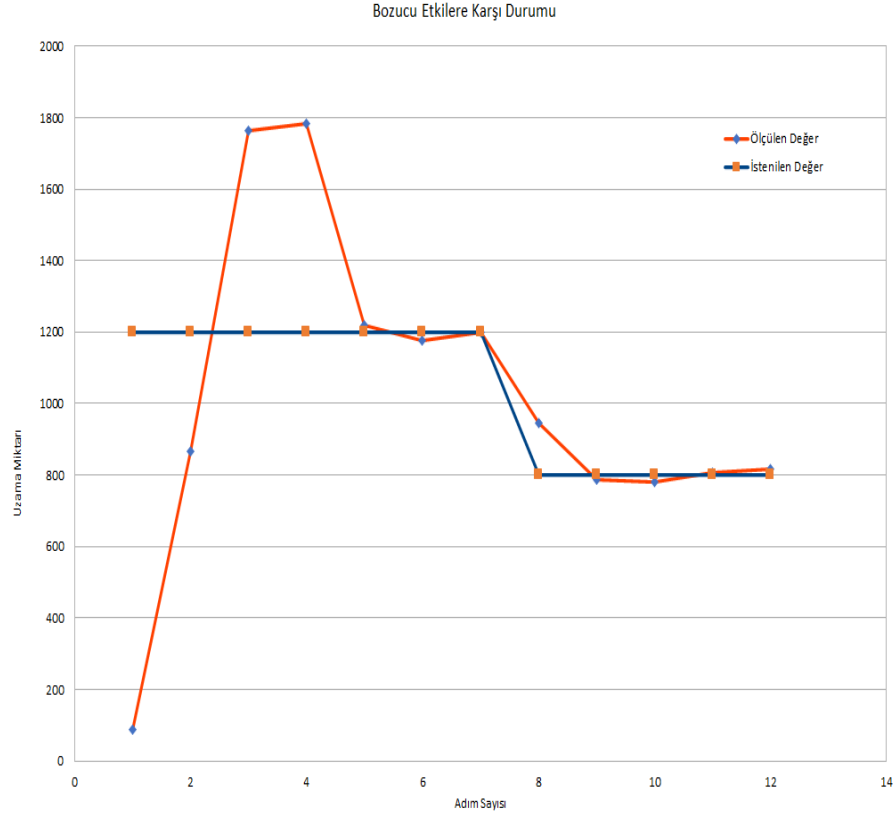
İterasyon	Ölçülen Değer	İstenilen Değer
1	89,21	1200
2	865,22	1200
3	1763,87	1200
4	1782,81	1200
5	1218,92	1200
6	1176,27	1200
7	1199,67	1200
8	943,83	800
9	785,89	800
10	780,07	800
11	806,53	800
12	817,75	800

Tablo 5.4' te görüldüğü üzere istenilen değer değiştirildiğinde tasarlanan denetleyicinin cevabı iyi olmaktadır, herhangi bir titreşim olmadan istenilen değer değiştiğinde sadece istenilen iki değer arasında kalınmaktadır. Şekil 5.11' de tablo 5.4 te bulunan sonuçlara göre çizdirilmiş yer değiştirme grafiği bulunmaktadır. Bu grafikten de görüldüğü üzere sistemin cevabı istenildiği gibi olmuştur.

Bundan dolayı histeriszi özellik kontrol edilirken değişken yapıli histerisiz denetim kullanılmalıdır. Bu denetime göre 3 farklı denetleyici sistemi kontrol etmektedir. İlk denetleyici piezoelektrik madde uzarken, ikinci denetleyici piezoelektrik madde kısılrken ve üçüncü denetleyici sistem kalıcı durum hatasına girdiğini düşündüğümüz bölgede yer değiştirmeyi kontrol emelidir. Bu denetleyici sistemi ile histerisiz özelliğe sahip

piezoelektrik maddenin voltaja göre yer değiştirmesi çok hassas bir şekilde kontrol edilebilir.

şekil 5.11 ile bahsedilen denetim sistemine göre üç ayrı denetleyici bulunmaktadır ve bu denetleyiciler ayrı durumlara göre sistemin denetimini ele geçiriler.



şekil 5.12: $x_1(t) = 1200$ değerinde iken $x_2(t) = 800$ değerine gelen sistemin yer değiştirme grafiği

6. Değerlendirme ve Sonuç

Piezoelektrik maddelerin kullanımı için birkaç yöntem vardır. Bu yöntemlerin hepsi yükselteç devreleri ile birlikte yapılan denetleyicilerdir. Bu tez kapsamında Piezoelektrik maddelerin kontrol edilmesi için yükselteç devresi yerine yükseltmiş bir DC güç kaynağını PWM sinyali ile kontrol edilen anahtarlama elemanı sayesinde anahtarlama yöntemi ile kontrol edilmesi sağlanmıştır. Anahtarlama yöntemi DC motorların hız kontrolü için kullanıldığı gibi Piezoelektrik maddelerinde hız ve konum kontrolünde kullanılabileceği görülmüştür. Daha sonraki devreler için bir H köprüsü devresi kullanılarak iki adet piezoelektrik maddenin birbirleri ile senkron bir şekilde çalışması ve daha karmaşık ve üst düzey motorların yapılması sağlanabilir.

Piezoelektrik maddenin hareket mesafesi çok kısa olduğundan sensörler vasıtası ile hassas konum ölçmek zorlayıcı bir konudur. Bu tez kapsamında ± 60 nm doğruluk payı ile görüntü işleme teknolojileri kullanılarak nanometre düzeyinde piezoelektrik maddenin yer değiştirmesinin ölçülmesi sağlanmıştır. Bu yer değiştirme mekanik bağlantılar ile daha fazla hareket mesafesi olan bir hareket sistemine veya diğer bir deyişle piezoelektrik motora çevrilebilir. Piezoelektrik madde Tablo 4.4 ve Tablo 4.5' teki verilerde görüldüğü gibi 500nm ile 154 nm arasında değiştiği görülmüştür.

Piezoelektrik maddenin bir motor gibi davranabilmesi için istenilen uzaklığa gitmesi ve bütün bozucu şartlar altında bulunduğu pozisyonu koruyabilmesi gerekmektedir. Bunun için birden fazla yol geliştirilmiştir. Bunlar hem açık, hem de kapalı kontrol sistemleri ile başarılmıştır. Bu tez kapsamında kapalı bir kontrol sistemi ile kamerayı bir sensör olarak kullanarak kameradan ,veya sensörden, gelen veriyi bir gerbesleme olarak kullanarak bir PID denetleyici yapılmıştır. Bu denetleyici vasıtası ile belirlenen bir noktaya gelen Piezoelektrik maddenin bu konumda kalması ve denetleyicinin sönümleme kısmından çıkması gerektiği görülmüştür. Sönümleme durumundan çıkması çok uzun sürede gerçekleştiği için PID denetleyicinin parametrelerinin hata durumuna göre adapte olması ve daha kısa sürede istenilen konuma adapte olup durağan pozisyonuna geçmesi sağlanmıştır. Bu durum için 300nm hata payının altında sadece orantılı kontrol yapılması ve 300 nm üstündeki her hata oranı için PID kontrolcünün bütün elemanlarının kullanılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda $\pm 20nm$ hassasiyette istenilen konumda durması başarılmıştır. Bu değer ise ölçüm hassasiyetinin altında olduğundan gelen sensör verisinden pek fazla etkilenmeyen durağan ve kararlı bir sistem yapılmıştır.

Mikroskop altında alınan her bir ölçüm için gerekli çevresel ortamların ayarlanması gerekmektedir. Bunların en başında eşikleme bölütlemesi için en önemli faktör olan aydınlatma enerjisi ve uygun eşik değerin bulunmasıdır. Uygun şartlar altında piezoelektrik maddenin nanometre hassasiyette kontrolü sağlanmış ve yığın motor olarak kullanılabileceği görülmüştür. Bu motorun hareket mesafesinin mekanik bağlantılar ve diğer yöntemler ile birlikte daha fazla uzatılabileceğinin bilinmesi gerekmektedir. Bu tez kapsamında sadece piezoelektrik maddenin nanometre hassasiyetinde kontrolü sağlanmış ve motor olarak kullanabilmek için gerekli geribesleme mekanizmasının sağlanması ve denetleyici tasarımının gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Gelecek çalışmalarda bu tezden faydalanılarak

- Anahtarlama yöntemi ile sürülen piezoelektrik maddenin sıcaklık değişimi ile yükselteç devreleri vasıtası ile sürülen piezoelektrik maddenin ısınma değerleri karşılaştırılabilir
- Başlangıç hatalarının giderilmesi için çalışmalar yapılabilir
- Anahtarlama kayıpları için düşük gürültüye sahip bir anahtarlama elemanı yapılabilir.
- Anahtarlama yöntemi ile sürülen Piezoelektrik maddenin rezonans frekansına karşı etkileri araştırılabilir.
- Anahtarlama elemanı ile sürülen Piezoelektrik maddelerin yük dayanımları hakkında araştırmalar yapılabilir.

Kaynaklar

- [1] R. K. Jain, S. Majumder, B. Ghosh, and S. Saha, "Design and manufacturing of mobile micro manipulation system with a compliant piezoelectric actuator based micro gripper," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 35, pp. 76–91, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.jmsy.2014.12.001.
- [2] M. Hammouche, P. Lutz, and M. Rakotondrabe, "Robust and guaranteed output-feedback force control of piezoelectric actuator under temperature variation and input constraints."
- [3] S. R. Manalis, S. C. Minne, and C. F. Quate, "Atomic force microscopy for high speed imaging using cantilevers with an integrated actuator and sensor," *Applied Physics Letters*, p. 871, 1995, doi: 10.1063/1.116528.
- [4] N. Bonnail, D. Tonneau, F. Jandard, G. A. Capolino, and H. Dallaporta, "Variable structure control of a piezoelectric actuator for a scanning tunneling microscope," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 2, pp. 354–363, Apr. 2004, doi: 10.1109/TIE.2004.825266.
- [5] W. Wei, P. Xia, W. Xue, and M. Zuo, "On the Disturbance Rejection of a Piezoelectric Driven Nanopositioning System," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 74771–74781, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2987469.
- [6] J. Gan, X. Zhang, H. Li, and H. Wu, "Full closed-loop controls of micro/nano positioning system with nonlinear hysteresis using micro-vision system," *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 257, pp. 125–133, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.sna.2017.02.013.
- [7] W. Li, C. Zhang, W. Gao, and M. Zhou, "Neural network self-tuning control for a piezoelectric actuator," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 12, pp. 1–17, Jun. 2020, doi: 10.3390/s20123342.
- [8] C. L. Chu and S. H. Fan, "A novel long-travel piezoelectric-driven linear nanopositioning stage," *Precision Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 85–95, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.precisioneng.2005.05.002.
- [9] G. Y. Gu, L. M. Zhu, and C. Y. Su, "High-precision control of piezoelectric nanopositioning stages using hysteresis compensator and disturbance observer," *Smart Materials and Structures*, vol. 23, no. 10, Oct. 2014, doi: 10.1088/0964-1726/23/10/105007.
- [10] W. M. Kuo, S. F. Chuang, C. Y. Nian, and Y. S. Tarng, "Precision nano-alignment system using machine vision with motion controlled by piezoelectric motor," *Mechatronics*, vol. 18, no. 1, pp. 21–34, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.mechatronics.2007.07.010.
- [11] D. v. Sabarianand, P. Karthikeyan, and T. Muthuramalingam, "A review on control strategies for compensation of hysteresis and creep on piezoelectric actuators based micro systems," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 140. Academic Press, Jun. 01, 2020. doi: 10.1016/j.ymssp.2020.106634.
- [12] S. Yuan, Y. Zhao, X. Chu, C. Zhu, and Z. Zhong, "Analysis and experimental research of a multilayer linear piezoelectric actuator," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 6, no. 8, Aug. 2016, doi: 10.3390/app6080225.

- [13] T. Pozniak, K. Przygoda, M. Grecki, J. Matiulko, T. Poźniak, and K. Przygoda, "Development and tests of PWM amplifier for driving the piezoelectric elements Power electronic circuits using silicon carbide devices View project X-Ray Free Electron Laser View project European Coordination for Accelerator Research and Development PUBLICATION Development and Tests of PWM Amplifier for Driving the Piezoelectric Elements Development and Tests of PWM Amplifier for Driving the Piezoelectric Elements," 2009.
- [14] J. Gan and X. Zhang, "A review of nonlinear hysteresis modeling and control of piezoelectric actuators," *AIP Advances*, vol. 9, no. 4. American Institute of Physics Inc., Apr. 01, 2019. doi: 10.1063/1.5093000.
- [15] Thorlabs, "AE0505D16F Specification Sheet."
<http://www.ibselectronics.com/ibsstore/datasheet/ae0203d08df.pdf>
- [16] G. Y. Gu, L. M. Zhu, C. Y. Su, H. Ding, and S. Fatikow, "Modeling and control of piezo-actuated nanopositioning stages: A survey," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 313–332, Jan. 2016, doi: 10.1109/TASE.2014.2352364.
- [17] M. F. Golnaraghi, B. C. Kuo, and M. F. Golnaraghi, *Automatic control systems*. Wiley, 2010.
- [18] W. Pratt, *DIGITAL IMAGE PROCESSING*, 4th ed. 2007.
- [19] R. C. Gonzalez and R. E. (Richard E. Woods, *Digital image processing*, 4th ed. 2018.
- [20] M. Qiu and G. Qiu, "Contrast Maximizing and Brightness Preserving Color to Grayscale Image Conversion," in *Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision*, 2008, pp. 347–351.
- [21] R. Bala and K. M. Braun, "Color-to-grayscale conversion to maintain discriminability," *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2004, doi: 10.1117/12.532192.
- [22] HANBAY Kazım, TALU M. Fatih, and KARCI Ali, "DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ VE YAPAY ARI KOLONİ ALGORİTMASI İLE RENKLİDOKU GÖRÜNTÜLERİNİN BÖLÜTLENMESİ," 2012.
- [23] H. Zhao, H. Huang, J. Ji, and Z. M, "Design and Analysis of Key Components in the Nanoindentation and Scratch Test Device," in *Human Musculoskeletal Biomechanics*, InTech, 2012. doi: 10.5772/19564.

EK-1 : Görüntü işleme için python kodu

```
import cv2
import serial
import argparse
import numpy as np
import time
from PID import pid

pids=pid()
cal_ar=np.zeros(25)
pos=[0]
calibration_value=286.4583
font=cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX
org=(50,50)
fontscale=1
colour=(255,255,255)
thickness=1
val=0
comport='COM7'
ar=serial.Serial(comport,baudrate=9600,timeout=1)

def comm(value):
    text='%d=' %value
    time.sleep(1)
    ar.write(str.encode(text))
    print(ar.readline())
    time.sleep(1)
    ar.write(str.encode(text))
    print(ar.readline())

def nothing(x):
    pass
```

```

def camera (capture_width=1920,capture_height=1080) :
    cap = cv2.VideoCapture(0,cv2.CAP_DSHOW)
    cap.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH,capture_width)
    cap.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT,capture_height)
    return cap,capture_width

def lines(event,x,y,flags,param):
    global refy
    if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
        time.sleep(0.5)
        pos.append(y)

def live():
    cap,_=camera()
    tresh=120
    cv2.namedWindow('live')
    cv2.createTrackbar('TRESH','live',1,255,nothing)
    while cap.isOpened():
        _,frame=cap.read()
        frame=cv2.cvtColor(frame,cv2.COLOR_BGR2GRAY)
        t=cv2.getTrackbarPos('TRESH','live')
        tresh=t
        _ , frame = cv2.threshold(frame, tresh, 255, cv2.THRESH_BINARY)
        cv2.imshow('live',frame)
        key=cv2.waitKey(25)
        if key==ord('q'):
            break
    return tresh

def cal ():
    cap,_=camera()
    comm(0)
    _ ,frame=cap.read()
    frame1=frame
    cv2.setMouseCallback("live",lines)

```

```

while True:
    cv2.line(frame,(0,pos[-1]),(1920,pos[-1]),(0,0,255),1)
    cv2.imshow("live",frame)
    if cv2.waitKey(25) & 0xFF == ord('q'):
        cv2.destroyAllWindows('live')
        break
    frame1=cv2.cvtColor(frame1,cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    cv2.imwrite('first.png',frame1)
    _, aa = cv2.threshold(frame1, 125, 255, cv2.THRESH_BINARY)
    cv2.imwrite('tha.png',aa)
    return(pos)

def initial(pos):
    pos.sort()
    frame=cv2.imread('first.png')
    frame=cv2.cvtColor(np.float32(frame),cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    first=frame[pos[1]:pos[2]]
    return first

def control(val,error):
    pid_val=pids.controller(error)
    print("pid value is ",pid_val)
    step=pid_val
    step=int(step)
    val=val+step
    if val<255:
        comm(val)
    else :
        val=val-255
    comm(val)
    return val

def measurement(th,pos,iter):
    cap,_=camera()

```

```

ada=0
time.sleep(0.25)
for i in range(iter):
    _,frame1=cap.read()
    frame1=cv2.cvtColor(frame1,cv2.COLOR_BGR2GRAY)#convert gray
    first=initial(pos)
    _, first = cv2.threshold(first, th, 255, cv2.THRESH_BINARY)
    _, frame1 = cv2.threshold(frame1, th, 255, cv2.THRESH_BINARY)
    frame=frame1[pos[1]:pos[2]] #focus to working space
    measure=first-frame
    frame= measure
    cv2.imshow('live',frame)
    cv2.imwrite('measure.png',frame)
    #kontrol komutlarını gir
    sh=measure.shape
    measure=np.sum(measure,axis=0) #summ each the rows
    for i in range(sh[0]):# check the negative numbers
        if measure[i]<=0:
            measure[i]=0
    max=sh[1]*255# find the value for normalized the measure array
    measure=measure/max #normalized
    value=np.sum(measure)# summ all elements
    value=value*286.4583 # multiply the measurement pixel to calibration value
    ada=ada+value# summ all the calculation for mean filter
ada=ada/iter#divide iter for mean filter
ada=ada*-1
return ada # return the data

```

EK-2: PID ve Uyarlamalı denetim için python kodu

```
import math
```

```
class pid ():
```

```
def
```

```
__init__(self,kp_1=0.02772,ki_1=0.0041833,kd_1=0.013269,kp_2=0.018101,ki_2=0.0036935,kd_2=0.0084167,max_val=6000):
```

```
    self.kp1=kp_1
```

```
    self.ki1=ki_1
```

```
    self.kd1=kd_1
```

```
    self.ki2=ki_2
```

```
    self.kd2=kd_2
```

```
    self.kp2=kp_2
```

```
    self.max_val=max_val
```

```
    self.int_error=0
```

```
    self.dif_error=0
```

```
    self.last_error=0
```

```
    self.ki_op=0
```

```
    self.kd_op=0
```

```
    self.kp_op=0
```

```
def controller(self,error):
```

```
    if abs(error)<300:
```

```
        self.ki_op=0.05
```

```

self.kd_op=0

self.kp_op=0.2

self.max_val=300

if self.int_error > self.max_val:

    self.max_val=0

else:

    if error > 0 :

        self.ki_op=self.ki1

        self.kd_op=self.kd1

        self.kp_op=self.kp1

    if error < 0 :

        self.ki_op=self.ki2

        self.kd_op=self.kd2

        self.kp_op=self.kp2

if self.int_error < self.max_val:

    self.int_error=self.int_error+error

self.dif_error=self.last_error-error

value_error=self.kp_op*error +self.kd_op*self.dif_error +self.ki_op*self.int_error

self.last_error=error

```

```
if 0.5 <abs(value_error)<1:
```

```
    if value_error< 0:
```

```
        value_error=-1
```

```
    if 0< value_error:
```

```
        value_error=1
```

```
return value_error
```

