

Yürüyen Piezoelektrik Motorların Sürülmesi

Zhenishbek Zhakypov¹, Edin Golubovic², Tarık E. Kurt³, Asif Sabanovic⁴

^{1,2,3,4}Mekatronik Mühendisliği Bölümü

Sabancı Üniversitesi, İstanbul

{zhakypov¹, edin², tarikedip³, asif⁴}@sabanciuniv.edu

Özetçe

Piezoelektrik eyleyicilerin geliştirilmesi mikro ve nano ölçeklerde yapılan yüksek hassasiyete sahip konumlandırılmaların yapılabilmesine olanak sağlamıştır. Fakat piezoelektrik malzemeler doğası gereği lineer olmayan bir yapıya sahiptir. Bu da piezoelektrik eyleyicilerin denetlenmesini ve sürüşünü zorlaştırmaktadır. Piezoelektrik eyleyicilerin sürülmesi ve denetlenmesi için sistemde, ilgili denetleme yöntemlerinde ve uygun sürücü elektroniği konularında titiz bir araştırma yapmak gerekmektedir. Bu makalede, yürüyen piezoelektrik motorların sürülebilmesi amaçlı, iki farklı sürücü incelenmektedir. Bu sürücüler ise ticari olarak kullanılan ve bahsi geçen yazarlar tarafından tasarlanan ses güçlendirici devre yapısına sahip sürücülerdir. Motora beslenen dalga formlarının giriş frekanslarını denetlemek için kaskat denetleyici kullanılmıştır. Yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda, Motorun piezo-bacaklarının, dalga formlarının değişen faz, genlik ve frekanslarıyla ayrı ayrı denetlenmesi sonucunda, sürücülerin kullanılmasında belirli kısıtlamalar gözlenmiş ve bu durum da çok amaçlı sürücülerin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Piezoelektrik motor, bimorf, ses yükseltici, kaskat denetleme

1. Giriş

Sanayide ve tıbbi teknolojide kullanılan ürünlerin minyatürleştirilmesi yüksek hassasiyetli konumlama aygıtlarına olan talebi artırmaktadır. Piezoelektrik eyleyiciler, bu uygulamalarda kullanılan popüler cihazlardan biridir. Bunun nedenleri ise piezoelektrik eyleyicilerin düşük enerji tüketimleri, yüksek bükülmezlik değerlerine sahip olmaları, hızlı tepki verebilme özellikleri ve küçük ebatlarda olmalarıdır. Mikrometre ve nanometre ölçeklerinde yapılan konumlandırılmalar, sistemlerde ve uygulamalarda kullanılan ilgili denetleme yöntemlerinde dikkatli bir inceleme gerektirir. Bu uygulamalarda ihtiyaç duyulan yüksek hassasiyetlere sahip konum denetlenmesinin yanı sıra, ihtiyaç duyulan diğer bir konu da uygun bir sürücü elektroniğinin kullanılmasıdır. Piezoelektrik aygıtların doğrusal olmayan ve histerez içerikli davranışları, bu tip eyleyicilerin denetlenmesini güçleştirmektedir. Bununla birlikte literatürde, piezoelektrik eyleyicilerin modellenmesini, denetlenmesini ve sürülmesini ele alan bazı yöntemler ileri sürülmüştür. Bu çalışmalardan biri histerez davranışlarını gidermeyi, PID ve geri beslemeyle doğrusallaştırma özelliklerine sahip izleme denetleyicisinin tasarlanmasına değinmektedir [1]. Benzer bir makalede ise izleme ve lineer olmayan histerez denetlemesinin bulanık denetleyicilerle denetlenmesinden bahsedilmektedir [2]. Histerez çözümü için kullanılan Prandtl-Ishlinskii histerez

modeline ve hıza dayalı ileri beslemeli denetleyiciler [3]'de belirtilmiştir. Piezoelektrik eyleyiciler farklı dalga formları tarafından sürülebildiği için bazı dalga formlarını eniyileme de literatüre girmiştir [4]. Yürüyen piezo-bacak motorları kapsamında, bimorf piezo-bacak uçlarının yer değiştirmesi, sürütünme ve normal yöndeki kuvvetler modellenerek sürücü dalga formlarının eniyilemesinde kullanılmıştır [5]. Alternatif dalga formları, üst üste binen bacak uç noktaları olan aynı tipteki motorlarda kullanılarak izleme hatalarının azaltılmasında ve nominal yüklerdeki çubuk kaymalarının engellenmesinde kullanılmıştır [6]. Ayrıca nano hassasiyetlerdeki konumlandırma platformları için ileri besleme özelliğine sahip denetleme şemalarını ve düzgün konumlandırmada kullanılmak üzere dalga biçimlerinin fazlarını ve genliklerini ayarlamak için kazanç zamanlama daha önceden yapılmış çalışmalardır. Kuvvet denetlenmesi de yükleme durumlarındaki, yüksek hassasiyetlerdeki konumlandırma işlemlerinde önemli bir yere sahiptir. Robot eklemleri için piezo-esnek sürücülerin kuvvet denetleyicileri [7]'de sunulmuştur. Bu yöntem lineer sistem modeline ve hız-kuvvet ilişkisine dayanmaktadır. Yüksek hassasiyetli konumlandırmalara ulaşmak için kayma kipli denetleyiciler ve kayma kipli denetleyicilere dayalı bozan etken denetleyicisi gibi lineer olmayan denetleyiciler kullanılmaktadır [8]. Böylece doğrusal olmayan histerez davranışlar giderilebilmekte ve piezoelektrik bacakların uç noktasındaki kuvvet tahmin edilebilmektedir.

Sürücü elektroniği de yüksek hassasiyetli konumlandırma işlemlerinde aynı ölçüde öneme sahiptir. Sürücü eyleyicileri, uygun voltaj ve akımlarla beslenmelidir. Aynı zamanda tasarımcı verimi ve sürücü elektroniğinin esnekliğini oluşturan, sisteme beslenen dalga formunun genlik, faz, frekans gibi özelliklerini de dikkate almalıdır. Piezoelektrik malzemenin kapasitif özelliğinden dolayı piezoelektrik sürücüler yük veya voltajla sürülmektedir.

Yüksek verim ve kolay denetlenebilme özelliği anahtarlamalı çeviricileri bu amaç doğrultusunda popüler bir araç haline getirmiştir. Piezoelektrik eyleyicilerde farklı anahtarlamalı çevirici topolojileri kullanılmakta olup bu çeviriciler bağımsız veya bileşik olarak kullanılmaktadır. Piezoelektrik tabaka eyleyicileri sürmek için, voltaj ve akım geri beslemeli senkron çift yönlü BUCK (alçaltıcı) çevirici tasarlanmıştır [9]. Bir başka çalışmada ise alçaltıcı-yükseltici çift yönlü çevirici topolojisi doğrusal olmayan denetleyici kullanarak sunulmuştur [10-11]. Topolojilerin bileşenleri düşük giriş ve yüksek çıkış voltajına sahip flayback çeviriciyi takiben yarı köprülü alçaltıcı-yükseltici platformu [12] 'de sunulmuştur. Benzer bir topolojide çift aşamalı sürücü devresinden yararlanılmıştır [13]. Burada flayback topolojisi olarak bilinen, oto-transformatör yükseltici çevirici, yükseltici platformu olarak ve çift yönlü alçaltıcı-yükseltici ikinci platform olacak şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca tek aşamalı çift yönlü

flayback çeviricisi bu amaçla sunulmuş ve mikro-robotik uygulamalarda, sürücülerin minyatürleştirilmesi olarak düşünülmüştür. Çeviricilerin yanı sıra sürücü ve enerji geri kazanımı için anahtarlı analog yükseltici hala yaygın olarak kullanılmaktadır [14-15]. Anahtarlı yükseltici ve analog yükselticiden oluşan hibrit modelde, kullanılan topolojiler arasındadır [16].

Bu çalışmada yürüyen piezo motorun sürüş ve fonksiyonellik karakteristikleri incelenmiştir. Amaç iki farklı sürücü elektroniği kullanarak yüksek hassasiyette konumlama yapmaktır. Deneyler ticari PDA 3.1 sürücüsü [17] ve geliştirilen analog yükseltici katman kullanılarak yapılmıştır. İyi bir konumlama için PI kaskat denetleyici kullanılmıştır. Yapılan deneyler üzerine bazı kısıtlamalar gözlenmiştir. Hassas pozisyonlama yapabilmek için dört bimorf bacak ayrı ayrı sürülebilme ve değişen genlikteki, frekanslardaki ve fazlardaki sinüzoidal dalga formlarıyla sürülebilme. Bundan dolayı da çok amaçlı güç sürücülerini ortaya çıkmıştır.

Bu makale aşağıda belirtildiği üzere organize edilmiştir. İkinci bölümde eyleyici modeli ve eyleyicinin fonksiyonel modeli tartışılmıştır. Üçüncü bölümde iki farklı sürücü elektroniği ele alınmıştır. Dördüncü bölümde deney sonuçları yer almaktadır. Son olarak beşinci bölümde sonuç ve alternatif tasarımından bahsedilmektedir.

2. Problemin Açıklanması

Bu makalede ele alınan piezoelektrik motor [5] Şekil 1'de gösterilmiştir. Motor dört ana kısımdan oluşmaktadır: Motor gövdesi, yay gergili rulmanlar, dört adet piezo-seramik bimorf bacak ve eyleyici çubuktan oluşmaktadır.

Bacaklara uygulanan dört faz kayması yaratılmış voltaj, bacakların yürüme işlemini gerçekleştirmesini sağlar. Basit bir bimorf bacak için her iki katmanda birlikte uzayabilir. Daha sonra bu katmanlardan biri uzamaya devam ederken ikinci katman daralır. Bu hareket ise bacağın esnemesiyle sonuçlanır. Bacaklardaki bu uzama normal yönde bir kuvvet oluşturur. Bu kuvvet ise çubuğu yay yüklemeli rulmana doğru iter ve bacak bükülmesi hareket yönüne dik olacak şekilde bir kuvvete neden olur bu da çubuğun Şekil 2'de de görüldüğü gibi, lineer bir biçimde itilmesini sağlar.

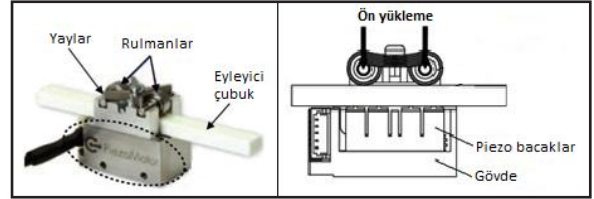
Bu motor adım atma ve esneme olarak adlandırılan iki farklı modda sürülebilir. Adım atma modunda bacaklar çubukla sürekli temas etmezler. Böylece bacaklar Şekil 2'de görüldüğü gibi yürüme biçiminde hareket ederler. Esneme modunda 4 bacak birden, hareketli çubuğu kısıklı tutma yapacak şekilde hareket ettirir. İleri ve geri hareket temas hiç kaybolmayacak şekilde gerçekleşir. Bu hareket şekli ise çok yüksek hassasiyetlere ulaşmayı sağlar ve nanometre altındaki ölçülere ulaşmaya imkân verir.

Piezoelektrik eyleyicilerde değişik dalga formları kullanılmaktadır. Dalga formlarının kendileri de değişik şekillerde denetlenebilmektedir. Hareketin olabildiğince düzgün ve hassas olması açısından, piezoelektrik bacaklara uygulanan dalganın frekansının, genliğinin ve fazının denetlenmesi istenilmektedir. Bu sayede farklı bacakların hareketlerinin denetlenmesi için maksimum serbestlik elde edilebilir. Örneğin sinüzoidal dalga uygulaması bacak ucunun eliptik bir şekilde hareket etmesini sağlar. Dalga formları arasındaki faz farkı ve genlik adım büyüklüğü, frekans ise yürüyüşün hızının belirlenmesi sağlar.

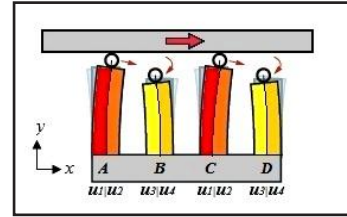
Bacak uç noktasının konumu x ve y yönlerinde (metre cinsinden) aşağıda gösterildiği üzere tanımlanabilir.

$$\begin{aligned} x_{P1} &= c_1 [u_1(t) - u_2(t)] \\ x_{P2} &= c_1 [u_3(t) - u_4(t)] \\ y_{P1} &= c_2 [u_1(t) + u_2(t)] \\ y_{P2} &= c_2 [u_3(t) + u_4(t)] \end{aligned} \quad (1)$$

Burada c_1 ve c_2 (metre/volt cinsinden) piezoelektrik malzemenin esneme ve uzama katsayılarıdır [4].



Şekil 1: Piezomotor Yapısı



Şekil 2: Piezo-bacakların yürüme hareketi

3. Piezoelektrik Motor Sürücüsü

Piezoelektrik motorun fonksiyonel yararlılıklarını ve sürücü karakteristiklerini anlamak için ön araştırmalar iki farklı sürücü kullanılarak yürütülmüştür: PDA 3.1 ticari amaçlı sürücü [17] ve makalede bahsi geçen yazarlar tarafından tasarlanan analog ses yükseltici devre kartıdır.

3.1 PDA 3.1 Motor Denetleyicisi

Piezo-bacak sürücü ve denetleyici ticari ürün, piezoelektrik motorla aynı firmaya ait olup PiezoMotor Uppsala (İsveç) AB tarafından üretilmektedir.

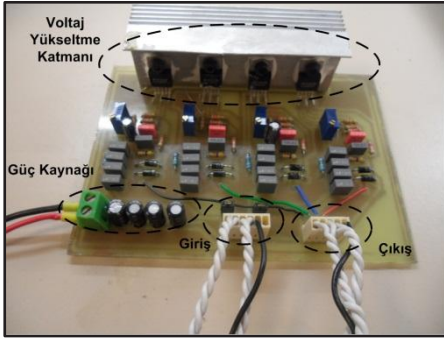
DC 12 voltta çalışmaktadır ve dört bacağı sürmek için dört faz kayması olan ikizkenar yamuk şeklindeki dalga formu kullanılmaktadır.

Şu anki sürücü, içinde gömülü bir mikro denetleyici barındırır. Bu mikro denetleyici uygulan giriş voltajını çıkıştaki dalga formunun frekansıyla ilişkilendirir. Motorun hızıyla doğrudan alakalı olan frekans, 0-9.6 Volt arasındaki analog voltaj referansıyla An pini üzerinden ayarlanabilir. Bu yüzden çıkıştaki dalga formunun frekansı konumlama uygulamalarındaki tek denetlenebilen parametredir. Buna artı olarak çalışma moduna mikro denetleyici tarafından karar verilir. Bu modlar analog voltaj düzeyine dayalı adım atma ve esneme modlarıdır.

3.2 Analog Yükseltici Katman

PDA 3.1 sürücüsünün ana dezavantajı faz, genlik ve dalga formunun ayarlanmasındaki esnek olmayan yapısıdır. Denetlemede ve dalga boyunun eniyilemesinde esneklik

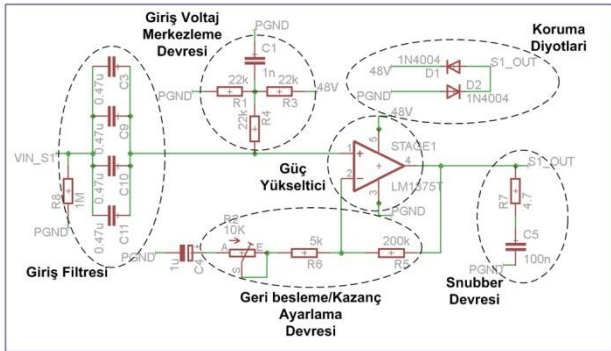
kazandırmak için voltaj yükseltici bir devre tasarlanıp test edilmiştir. Bu devre Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3: Voltaj Yükseltici Devre Donanımı

Voltaj yükseltme katmanının ana bileşeni 20 Watt güce sahip ses yükselticisidir ve bu katman 60 Volta kadar dayanabilmektedir [18]. Klasik evirici ve evirici olmayan voltaj yükletici şemalarında ses yükseltici kullanılmıştır. Evirici olmayan yükseltici devre şeması Şekil 4'te gösterilmiştir. Piezomotor sadece pozitif voltajla sürülebildiği için güç yükseltici tek-besleyicili biçiminde kullanılmıştır. Fakat tek-besleyicili uygulamalar kendi yapılarından kaynaklanan, çift besleyicili uygulamalarla üstesinden gelenebilen, problemlere sahiptirler. Ana problem güç yükselticinin çift-besleyicili bir aygıt oluşudur, bundan ötürü harici elemanlar kullanılarak, orta beslemede yükselticinin çıkış voltajının merkezine ön gerilim uygulanmalıdır. Bu yaklaşım, sisteme verilen besleme voltajına bağlı olarak maksimum giriş ve çıkış voltaj salınımlarına olanak sağlar. Orta beslemede giriş voltajı polarizasyonunu sağlayan devre Şekil 4'te belirtilmiştir. Yükseltici kazancı geri beleme yolunda değişken direnç kullanılarak ayarlanmaktadır. Minimum yükseltme kazancı 10 civarındadır, bu değer in altındaki her değer yükseltici devrede kararsızlığa neden olmaktadır.

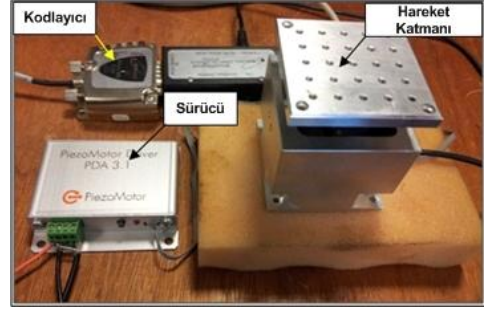
Daha önceden de bahsedildiği üzere, sürülen piezo bacaklar kapasitör olarak düşünülebilir ve yükseltici devredeki kararsızlıklar kapasitif katmanın sürülmesi esnasında meydana gelir. Bu durumun üstesinden gelebilmek için söndürücü devresi yükselticinin çıkışındaki katmana paralel olarak eklenmiştir. Yükseltici 44 voltluk DC voltajla beslenmektedir.



Şekil 4: Evirici olmayan ses güç yükseltici devresi

4. Deneysel Sonuçları

Sürücünün fonksiyonel kapasitesine test etmek için kullanılan düzeneğe Şekil 5'te tanımlanmaktadır. Z ekseninde hareket eden doğrusal katman tasarlanarak kesin konumlandırma uygulamaları kapsamında test edilmiştir. 5 nm hassasiyete sahip bir artımlı kodlayıcı motorun konumunu, motorun lineer aksı üzerine sabitlenen kodlayıcı bandı üzerinden okumaktadır. PI kaskat denetleyici, C algoritmaları kullanılarak dSPACE 1103 denetleme platformu üzerinden çalıştırılmaktadır.



Şekil 5: Deneysel Düzeneği

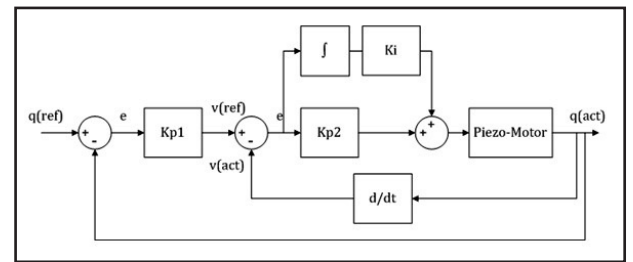
PI denetleyici blok diyagramı Şekil 6'da gösterilmiştir. Sistemde konum ve hız geri beslemeli kaskat denetleyici kullanılmaktadır. Frekans lineer motorun hızına karşılık geldiği için, denetleme döngüsü hız cinsinden uygulanmıştır. Katmanın gerçek konumu kodlayıcı tarafından ölçülüp denetleyiciye beslenmektedir. Denetleyicide ilgili frekans sisteme verilen refans ve gerçek konuma göre hesaplanır. Denetleyici denklemleri devam eden kısımda belirtilmiştir.

$$e_{pos} = q_{ref} - q_{act} \quad (2)$$

$$e_{vel} = K_{p1}e_{pos} - \frac{d}{dt}q_{act} \quad (3)$$

$$u = K_{p2}e_{vel} + \int K_i e_{vel} \quad (4)$$

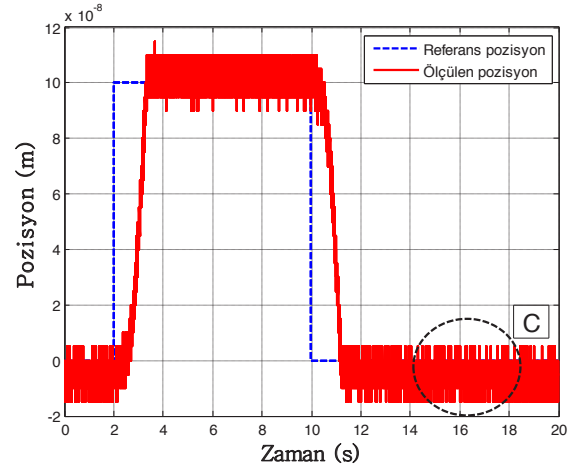
Burada u sisteme beslenen denetleme frekansıdır. q_{ref} referans konumu, q_{act} ölçülen konumu ve K_{p1} , K_{p2} ve K_i pozitif denetleyici kazançlarıdır.



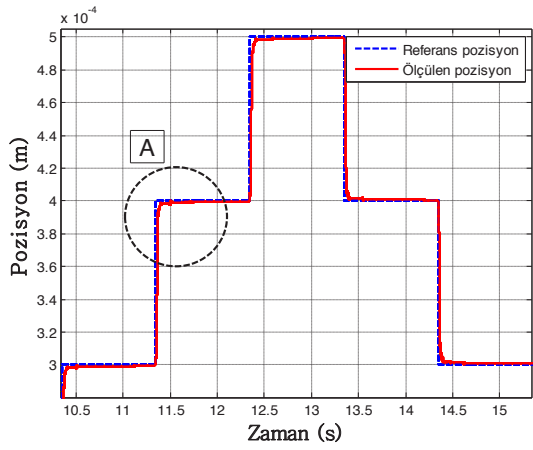
Şekil 6: PI kaskat denetleyici blok diyagramı

Ticari sürücüde ise referans voltajı, sürücünün analog voltaj giriş pinine (An) uygulanır, böylece denetleme işlemi gerçekleştirilmiş olur. Voltaj girdisi frekansla orantılı olduğu

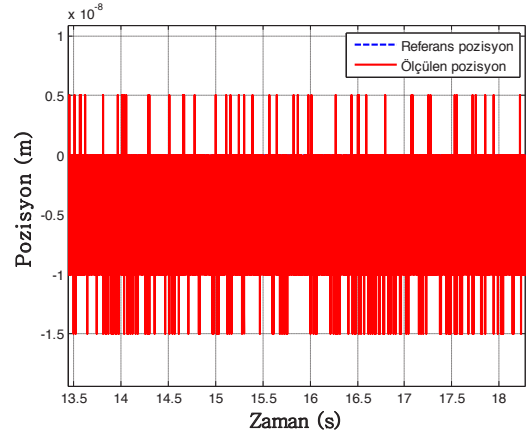
için, PI denetleyicisinin kazanç değerlerinin ayarlanmasıyla arzu edilen konuma ulaşılır. Bu sürücü sabit fazda ve genlikte olan ikizkenar yamuk şeklinde dalga formu oluşturur. Bu da yürüyen piezo-bacakların adım büyüklüklerinin sabit olduğu anlamına gelir. Bu özellik ise yüksek hareketli konumlandırma uygulamalarında önemli bir eksiklikler. Sonuçlara bakıldığında sürücü işlemlerinin adım atma modunda, 2-5 μm aralığında ve hızlı olduğu açıkça görülebilir (Şekil 7). Aynı işlem esneme modunda 1nm-2 μm aralığında ise son derece yavaş çalışmaktadır (Şekil 9). Esneme modundaki işlem son derece kesin sonuçlar vermesine rağmen yavaştır. Bu durum da hızlı konumlama işlemindeki başlıca dezavantajdır. Şekil 10'da C bölgesinin büyütülmüş görüntüsüne yer verilmiş olup, bu görüntüde bir kodlayıcının çözünürlüğünün 5-10 nm olduğu gösterilmiştir. Sinüzoidal referans sinyalinin izlenmesiyle, gecikmenin büyütülmüş görüntüsü sırasıyla şekil 11 ve şekil 12'te gösterilmiştir.



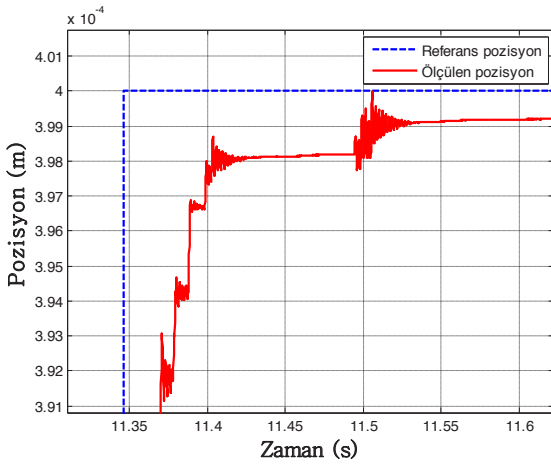
Şekil 9: Ticari sürücünün 100 nm'deki adım tepkisi



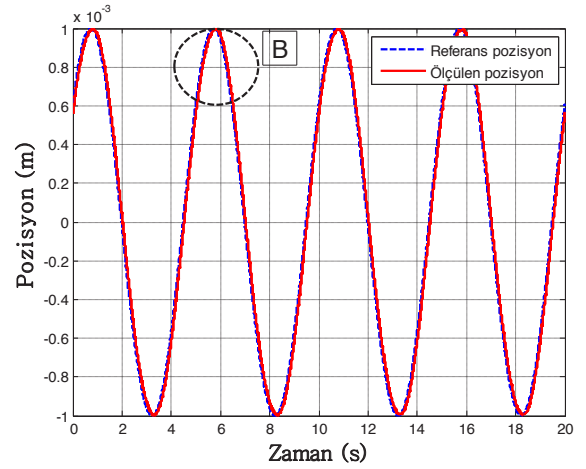
Şekil 7: 100 μm 'deticari sürücünün basamak durumundaki tepkisi



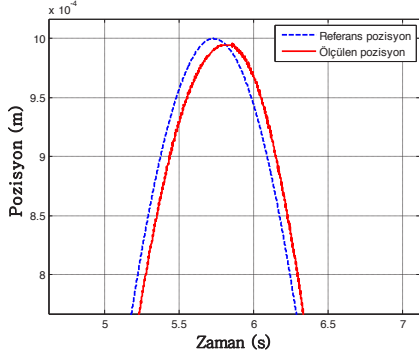
Şekil 10: C bölgesinin büyütülmüş görüntüsü



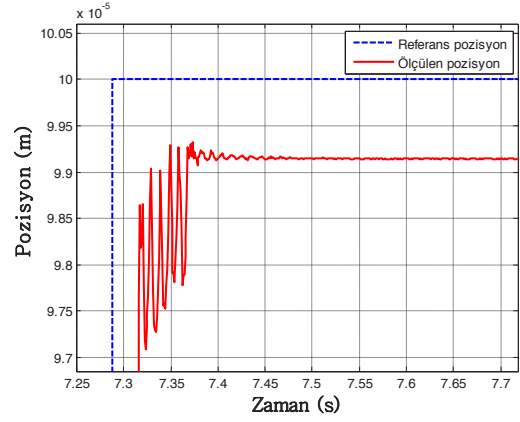
Şekil 8: A bölgesinin büyütülmüş görüntüsü



Şekil 11: Ticari sürücünün 1mm'deki sinüzoidal sinyale tepkisi



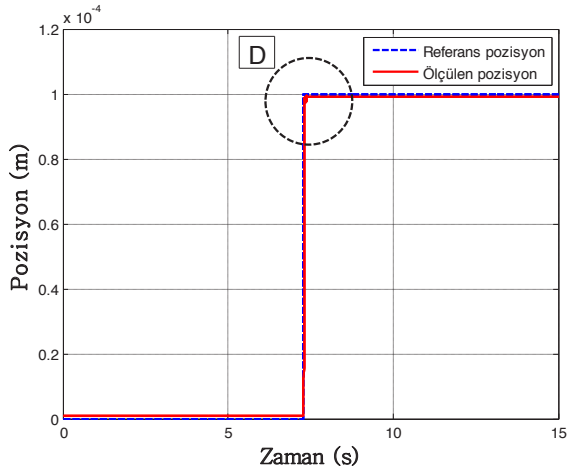
Şekil 12: B bölgesinin büyütülmüş görüntüsü



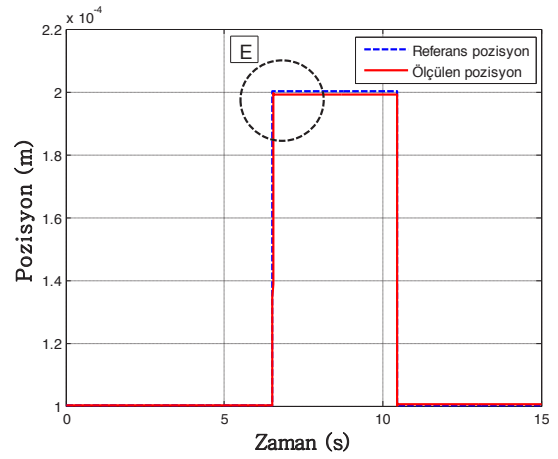
Şekil 14: D bölgesinin büyütülmüş görüntüsü

Analog yükseltici katmanla birlikte sisteme beslenen girdi dalga formlarının faz, genlik ve frekans denetlemesinde esneklik sağlanmıştır. Analog sürücülerin bu yararlılıkları, yürüyen piezo-bacakların hızlarının ve adım büyüklüklerinin değiştirilmesine olanak sağlar. Adım büyüklüğü bir piezo tabaka uygulanan sinüzoidler arasındaki faz farkıyla tanımlandığı için, motoro farklı faz varyasyonları ile test ederek bir faz ve adım boyutu ilişkisi tanımlanmıştır. Daha küçük adım büyüklükleri daha küçük faz farkı yaratılarak, elde edilebilir. Böylece daha yüksek kesinliklerde konumlandırma yapılabilir.

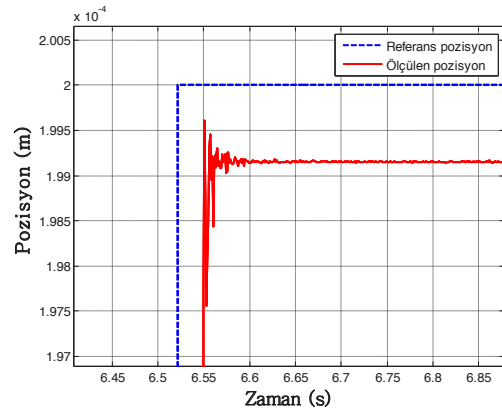
Açık döngülü konumlandırma aşağıda da belirtildiği üzere faz ve genlik varyasyonlarının oluşmasıyla sonuçlanır. Şekil 13'te $100 \mu\text{m}$ 'lik, faz modülasyonu uygulanmış adım sinyaline verilen tepki gösterilmektedir. Burada frekans sabit tutulup faz farkı 10° - 90° arasında doğrusal olacak şekilde değiştirilmiştir. Sistemdeki hata ise 1 - $5 \mu\text{m}$ değerleri arasındadır. Temel olarak adım boyutu, konumlanmanın $5 \mu\text{m}$ 'lik bir hataya ulaşmasıyla birlikte azalmakta olup doğrusal olarak $1 \mu\text{m}$ 'lik hata değerlerine neden olur. Şekil 15'te frekans ve faz aynı anda modüle edilmiştir. Böylece adım büyüklüğü ve hız doğrusal olarak azalmakta bir önceki test grubuna oranla daha düzgün ve hızlı konumlama yapılabilmektedir. Bu modülasyon teknikleri konumlamadaki kesinlik değerlerini yüksek ölçüde geliştirmiştir. Adım boyutunun denetimiyle sistemdeki dalgalanmaların ve aşmaların önüne geçilebilmektedir.



Şekil 13: Tasarlanan sürücünün $100 \mu\text{m}$ 'lik faz modülasyonunun açık döngülü adım tepkisi



Şekil 15: Geliştirilen sürücünün $100 \mu\text{m}$ 'lik faz ve frekans modülasyonlu açık döngülü adım cevabı



Şekil 16: E bölgesinin büyütülmüş görüntüsü

5. Sonuç ve Alternatif Tasarım

Bu makale piezoelektrik motorların PDA 3.1 ticari motor denetleyicisi ve tasarlanan analog yükseltici devresi olmak üzere iki farklı sürücü kullanılarak sürülmesi için yapılan

çalışmaları ele almaktadır. Motor ve sürücülerin fonksiyonel özelliklerini anlamak için konumlandırma deneyleri yürütülmüştür. PI kaskat denetleyicilerle yürütülen denetleyicilerin sonuçları gösteriyor ki, voltaj yükseltici devre şemasıyla yapılan konumlandırma çalışmaları ticari sürücüyle (PDA 3.1) yapılan çalışmalara göre daha doğru sonuçlar vermiştir. Bu durum da, yükseltici devredeki dalga formlarının frekans, faz ve genlik parametrelerinin denetlenmesine izin veren esnek yapıyla izah edilebilir. Bu da tasarlanan yapının satıcı firma tarafından üretilen yapıya kıyasla sahip olduğu temel avantajdır. Fakat yükseltici tasarımının da farklı devre tasarımıyla çözülebilecek bazı dezavantajları vardır. Bu dezavantajlardan biri voltaj yükselticisinin piyasada var olan ses güç yükselticilerin maksimum voltaj oranı olan 64 volta kadar olan voltajlara dayanabilmesidir. Şu andaki tasarım aynı zamanda ses güçlendiricilerdeki ısı dağılımı konusunda da sorunlar barındırmaktadır. Ayrıca esneme modundaki işlemi piezo elektrik tabakalara (bimorf) eşit voltajların uygulanmasını gerektirir. Yükseltici platformun girişindeki bağlama kondansatörü DC voltajın uygulanmasını engeller. Bu yüzden işlem sadece adım atma modunda düşünülebilir. Şu andaki tasarımın hantallığı ve maliyeti de diğer dezavantajlar arasındadır.

Bahsedilen tasarım kusurlarının üstesinden gelebilmek için bu tip uygulamalarda anahtarlamalı çeviriciler gibi alternatif tasarımlar düşünülebilir. Anahtarlamalı çeviriciler esnek yapıları, kolay denetlenebilmeleri ve yüksek verimli olmalarından dolayı popüler çözümler arasındadır. Anahtarlı yapılarından dolayı bu çeviricilerde enerji kaybı azaltılabilir ve ısınma sorunu çözülebilir. Bu çeviricilerin maksimum nominal voltajları piyasada var olan MOSFET'lerin nominal voltajları kadar olup 300 volta kadar olan değerlere sahiptirler. Var olan entegre çözümler aracılığıyla tasarımdaki hantallık ve sürücünün maliyeti sorunları da azaltılabilir.

Teşekkür

Yazarlar 111-M-359 numaralı TÜBİTAK projesine ve Yousef Jameel Burs Fonuna kısmi finansal desteklerinden dolayı teşekkür etmektedirler.

6. Kaynakça

- [1] Gi Sang Choi; Hie-Sik Kim; Gi Heung Choi; , "A study on position control of piezoelectric actuators," *Industrial Electronics, 1997. ISIE '97., Proceedings of the IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.851-855 vol.3, 7-11 Jul 1997.
- [2] Stepanenko, Y.; Chun-Yi Su; , "Intelligent control of piezoelectric actuators," *Decision and Control, 1998. Proceedings of the 37th IEEE Conference on* , vol.4, no., pp.4234-4239 vol.4, 16-18 Dec 1998 doi: 10.1109/CDC.1998.761968
- [3] U-X. Tan; W. T. Ang; C. Riviere; W. T. Latt; C. Y. Shee; , "Modeling and control of piezoelectric actuators for active physiological tremor compensation," in N. Sarkar, ed., *Human-Robot Interaction*, Vienna: I-Tech Education and Publishing, 2007, pp. 369-394.
- [4] Merry, R.J.E.; Maassen, M.G.J.M.; van de Molengraft, M.J.G.; van de Wouw, N.; Steinbuch, M.; , "Modeling and Waveform Optimization of a Nano-motion Piezo Stage," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* , vol.16, no.4, pp.615-626, Aug. 2011.
- [5] *PiezoLEGS motor*, Piezomotor, 2004, www.piezomotor.se
- [6] Merry, R.; de Kleijn, N.; van de Molengraft, R.; Steinbuch, M.; , "Control of a high precision stage using a walking piezo actuator," *Control Applications, 2007. CCA 2007. IEEE International Conference on* , vol., no., pp.1285-1290, 1-3 Oct. 2007.
- [7] Szufnarowski, F.; Schneider, A.; , "Compliant piezoflexdrives for muscle-like, antagonistic actuation of robot joints," *Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), 2010 3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on* , vol., no., pp.381-388, 26-29 Sept. 2010.
- [8] Sabanovic, A.; Abidi, K.; , "Sliding mode based piezoelectric actuator control," *Industrial Technology, 2004. IEEE ICIT '04. 2004 IEEE International Conference on* , vol.1, no., pp. 425- 430 Vol. 1, 8-10 Dec. 2004.
- [9] M. Chiaberge; A. Tonoli; G. Botto; M. De Giuseppe; S. Carabelli; F. Maddaleno; , "Model and Design of a Power Driver for Piezoelectric Stack Actuators," *EURASIP Journal on Embedded Systems*, 2009.
- [10] Gomis-Bellmunt, O.; Montesinos-Miracle, D.; Galceran-Arellano, S.; Sudria-Andreu, A.; , "A buck-boost bidirectional converter to drive piezoelectric actuators," *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on* , vol., no., pp.1-7, 2-5 Sept. 2007.
- [11] Gomis-Bellmunt, Oriol; Montesinos-Miracle, Daniel; Galceran-Arellano, Samuel; Rull-Duran, Joan; , "Sliding mode control based buck-boost bidirectional converter to drive piezoelectric loads," *Electrical Engineering* vol. 90 issue 2 December 2007. p. 115-125.
- [12] Douglas K. Lindner; Huiyu Zhu; Chunping Song; Weixing Huang; Danling Cheng; , "Low Input Voltage Switching Amplifiers for Piezoelectric Actuators," *Proceedings of SPIE's 2002 North American Symposium on Smart Structures and Materials: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, Anne-Marie McGowen, Ed., pp. 282-831, March 18-21, 2002.
- [13] Karpelson, M.; Gu-Yeon Wei; Wood, R.J.; , "Milligram-scale high-voltage power electronics for piezoelectric microrobots," *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on* , vol., no., pp.2217-2224, 12-17 May 2009.
- [14] Gnad, G.; Kasper, R.; , "A power drive control for piezoelectric actuators," *Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium on* , vol.2, no., pp. 963-967 vol. 2, 4-7 May 2004.
- [15] Janocha, H.; C. Stiebel; , "New approach to a switching amplifier for piezoelectric actuators," In: *Proc. of the 6th International Conf. on New Actuators*, Messe Bremen GmbH. pp. 189-192, 1998.
- [16] Stiebel. C.; Janocha, H.; "New Concept of a Hybrid Amplifier for Driving Piezoelectric Actuators," *1st IFAC-Conference on Mechatronic Systems*, Darmstadt, Germany. 18.-20.9.2000, pp. 379-384.
- [17] *Piezomotor driver PDA 3.1*, Piezomotor, www.piezomotor.se
- [18] LM1875 20W Audio Power Amplifier, Texas Instruments, www.ti.com