



PNÖMATİK YAPAY KASLI ROBOT KOLUNUN KONUM KONTROLÜ

Muhsin YILMAZ
Erdem KARAKAŞ
Zeynep Gülcan ÇOLAK
Ahmet KUZUCU

ÖZET

Robotlarda atalet kuvvetinin azaltılması için robotların daha hafif tasarlanması gerekir. Daha hafif eyleyicilerin oluşturulması için arayışlar, pnömatik yapay kas üzerindeki ilgiyi artırmıştır. Kas benzeri özellikler sergileyen bu eyleyiciler, yüksek güç/ağırlık oranı, yapısal esneklik ve ayarlanabilir katılık gibi çekici özellikler sunmaktadır. [1]

Bu araştırma-geliştirme projesinde, yapay kaslı bir robot prototipi geliştirilmiş ve üzerinde çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır. Sistemin mekanik ve pnömatik hesapları yapılarak dinamik modeli elde edilmiştir. Robotun kapalı çevrim bilgisayarla kontrolü Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM), Basınç ve Konum Geri Beslemeli Ölü Bölge İkilili Kontrol yöntemleri ile simüle edilmiş, bu kontrol yöntemlerinin deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın özgün katkılarından biri, robotun hareketinin endüstride çok yaygın olarak kullanılan basit aç-kapa valflerle kontrol edilmesidir. Prototip üzerinde yapılan deneylerin sonuçlarına dayanılarak yapay kaslı hafif pnömatik robotun hassas konum kontrolünün gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

ABSTRACT

In robotics, in order to reduce the inertia forces the robots must be designed in a lighter fashion. Investigations for lighter actuators leads the interest on artificial muscles. The actuators showing muscle like behaviours, offers many attractive properties such as high power/weight ratio, structural flexibility and adjustable rigidity. [1]

In this research&development project, a robot with articial muscles is designed and many experiments are done over it. The dynamic model of the system is obtained by doing the mechanical and pneumatic calculations. The simulation of the closed loop control of the robot is computed with Pulse Width Modulation (PWM) and Position Feedback Dead-Zone Dual Control, and compared with the results of the experiments done with these control methods.

One of the essential aims of this work is, controlling the robot's motion with the simple on-off valves which are widely used in industry. It is desired to achieve sensitive position control of pneumatic robots with artificial muscles with respect to the results of the experiments done on the prototype.



1. GİRİŞ

Konum ve kuvvet kontrolü için şişebilen esnek tüp kullanımı yeni bir fikir değildir. McKibben eyleyicileri 1950 ve 1960'larda geliştirilmiştir. [2] Günümüzde üretilen yapay kaslar, boyutsal kararlılık, yüksek ilk kuvvet ve ağırlıkça hafif konstrüksiyon gerekliliklerini karşılamaktadırlar. [3] Diğer yandan, pnömatik sistemlerin yapısal esnekliği ve kontrol sorunları, ileri robotik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmalarını engellemektedir. Bununla birlikte, kompakt yapıları, yüksek güç/ağırlık oranları ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle manipülatör tasarımında daha yaygın kullanılmaları öngörülmektedir.

Uygulamada çok fazla örneği bulunmasa da, şu ana kadar yapay kas kullanılarak yapılmış başarılı sistemler yapay kasların kullanım alanlarının zaman içinde artacağını göstermektedir. Pnömatik silindirle yapay kas arasında önemli farklar bulunmaktadır. Kasılma sırasında yapay kastaki kuvvet azalırken, pnömatik silindirdeki kuvvet sabit kalmaktadır. Buna ek olarak, yapay kasın kasılmasından doğan kuvvet, lineer olmayan kinetik sürtünmeyle sönümlenmektedir. Biyolojik kasla yapay kas arasında bu özellikten kaynaklanan bir benzerlik görülmektedir. Bu işlevsel benzerlikten dolayı yapay kasların, insan kolu benzeri robot kollarda kullanılması düşünülmektedir.[5]

Pnömatik yapay kaslar biyolojik sistemlerde olduğu gibi karşılıklı çiftler halinde de (antagonist) çalışırlar. Bu durum, yapay kasın gerçek kas özellikleri kazanmasına, katılığının kontrol edilebilmesine olanak sağlar. Bu şekilde, kasın kontrol ettiği sistemin, konumunu koruyarak dışardan gelen kuvvetlere karşı direnç göstermesi mümkündür.

Bununla birlikte yapay kasların:

- Kuvvet kontrolünün kolay olması
- Aynı çaptaki pnömatik silindire göre daha yüksek ilk kuvvete sahip olması.
- Temiz ortam gerektiren uygulamalar için uygun olması
- Yağlayıcılara gerek duyulmaması ve içinde hiçbir hareketli parça olmaması
- Tamamen kapalı bir hacim olduğundan hiçbir şekilde hava kaçağı sorunu olmaması
- Çamurlu, tozlu ve sualtı ortamlarında çalışabilmesi
- Sessiz çalışması
- Pasif sönümlenme yapması
- Yüksek güç/ağırlık oranına sahip olması
- Birçok uygulamaya göre düşük basınçlı hava tüketmesi
- Düşük maliyetli olması
- Sürtünmesiz çalışması

gibi bir çok önemli avantajları vardır.[6]

2. YAPAY KASIN MATEMATİK MODELİ

Yapay kaslar, nonlinear özellikler bulundurmaları nedeniyle modellenmeleri zor kuvvet elemanlarıdır. Kasın pnömatik olarak beslenmesi sonucunda ortaya çıkan kuvvet, sadece besleme basıncına bağlı olmayıp aynı zamanda kasın kısalması ile de ilişkilidir. Kasın ürettiği kuvveti, detaylı geometrik şekle bağlı olmaksızın basıncın ve kas kısalmasının bir fonksiyonu olarak elde edebilmek için, enerjinin korunumundan yola çıkmak yerinde olacaktır. Havanın, kasın içerisine dolarak yaptığı iş : [5]

$$dW_{in} = \int_{S_i} (P - P_0).dl_i.ds_i = (P - P_0) \int_{S_i} dl_i.ds_i = P' dV \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada P mutlak basınç, P_0 atmosfer basıncıdır. P' etkin basınç, S_i toplam iç yüzeydir. Kasın ürettiği kuvvet ise şu şekilde ifade edilebilir : [7]



$$dW_{out} = -Fdl \quad (2)$$

Virtüel iş prensibine göre :

$$dW_{in} = dW_{out} \quad (3)$$

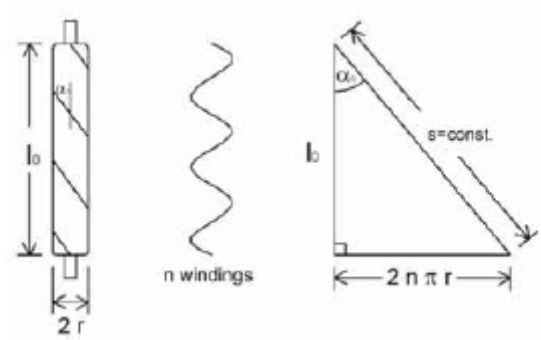
$$-Fdl = P' dV \quad (4)$$

$$F = -P' \frac{dV}{dl} \quad (5)$$

dV/dl oranını elde edilirken kas ipliklerinin uzaması çok düşük, ve kas da sıfır et kalınlığına sahip ideal bir silindir gibi düşünülürse : [6]

$$l = b \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

$$D = \frac{b \sin \alpha}{n\pi} \quad (7)$$



Şekil 1. Kasın yarıçapı ve uzunluğu arasındaki ilişki

Bu durumda silindir hacmi :

$$V = \frac{1}{4} \pi D^2 L = \frac{b^3}{4\pi n^2} \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

Bu ifade denklemde yerine konursa F , P' ve α 'nin bir fonksiyonu olarak yazılabilir :

$$F = -P' \frac{dV}{dL} = -P' \frac{dV/d\alpha}{dL/d\alpha} = \frac{P' b^2 (2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{4\pi n^2} = \frac{P' b^2 (3 \cos^2 \alpha - 1)}{4\pi n^2} \quad (9)$$

Bu denklemden elde edilen kuvvet basınçla doğrusal olarak orantılıdır ve α ile de bağıntılıdır. $F=0$ kuvveti altında ulaşılan maksimum kısalma değerinde $\alpha = 54,7^\circ$ dir. Burada ideal silindir kabulü yapmış olmamıza rağmen dV/dl oranını bildiğimiz sürece farklı şekillere sahip kaslar için de bu denklemi kullanmamız mümkündür. [7]



Daha hassas bir model için kas çeperinin et kalınlığı da hesaba katılabilir. Bu durumda t_k kalınlık olmak üzere toplam hacim ve kuvvet ifadeleri şu şekilde olur :

$$V = \frac{1}{4} \pi (D - 2t_k)^2 L \quad (10)$$

$$F = -P' \frac{dV}{dL} = \frac{P' b^2 (3 \cos^2 \alpha - 1)}{4 \pi n^2} = \pi P' \left[D_0 t_k \left(2 \sin \alpha - \frac{1}{\sin \alpha} \right) - t_k^2 \right] \quad (11)$$

$$F = \pi \cdot P' \left[D_0 t_k \left(\frac{1 - \frac{2l}{b}}{\sqrt{\left(\frac{b}{l}\right)^2 - 1}} \right) - t_k^2 \right] \quad (12)$$

3. YAPAY KAS KARAKTERİSTİĞİ

Hatasız olarak modellenmeleri oldukça zor olan yapay kasların, davranışlarının önceden belirlenmesi ve karakteristiklerinin elde edilmesi yüksek önem taşımaktadır. Burada, amaçlanan 3 değişkene bağlı olarak çalışan yapay kasın bütün durumlar için göstereceği davranış bilgisine önceden sahip olmak ve bu bilgiyi de kas üreticisinin elde ettiği bilgiyle karşılaştırmaktır. Bu amaçla statik ve dinamik olmak üzere bir dizi deney yapılmıştır.

Deneylerde yapay kas hidrolik bir çekme makinasına bağlanmıştır. Kuvveti, yer değişimini ve basıncı kontrol edebilen bu makina ve onun yardımcı donanımları sayesinde, istenen parametreler sabit tutularak diğer parametrelerdeki değişim gözlenmiştir.

Statik Karakteristik Deneyleri

Yapay kas eyleyicisinin ürettiği kuvvetin değişimi, hem basıncın değişimine, hem de kas uzunluğundaki değişime bağlıdır

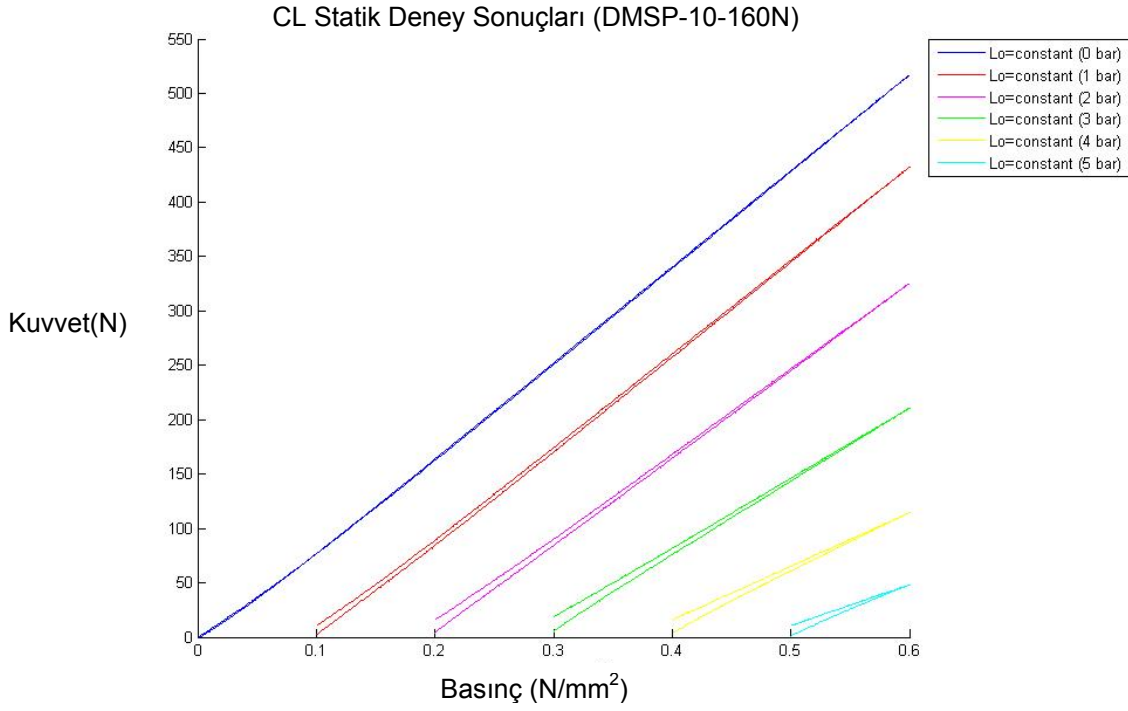
$$\Delta F = c_p \cdot \Delta P + c_L \cdot \Delta L \quad (13)$$

Burada,

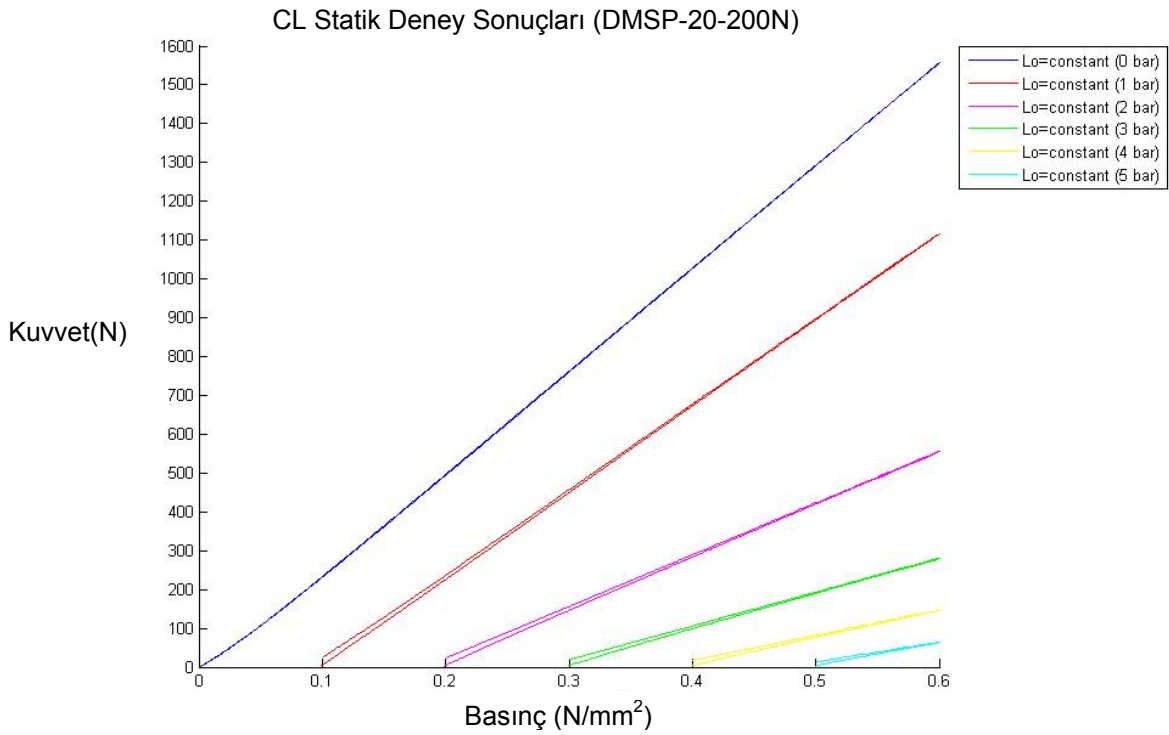
$$c_p = \left. \frac{\partial F}{\partial P} \right|_{L=L_0, P=P_0} \quad (14)$$

$$c_L = \left. \frac{\partial F}{\partial L} \right|_{L=L_0, P=P_0} \quad (15)$$

Kastaki uzama miktarı sabit tutularak yapılan deneyde basınç oransal bir valf yardımıyla belli bir başlangıç değerinden başlayarak değiştirilmiş ve kuvvetteki değişim gözlenmiştir. Deneyden elde edilen sonuçlar Şekil 2 ve Şekil 3'de görülmektedir.

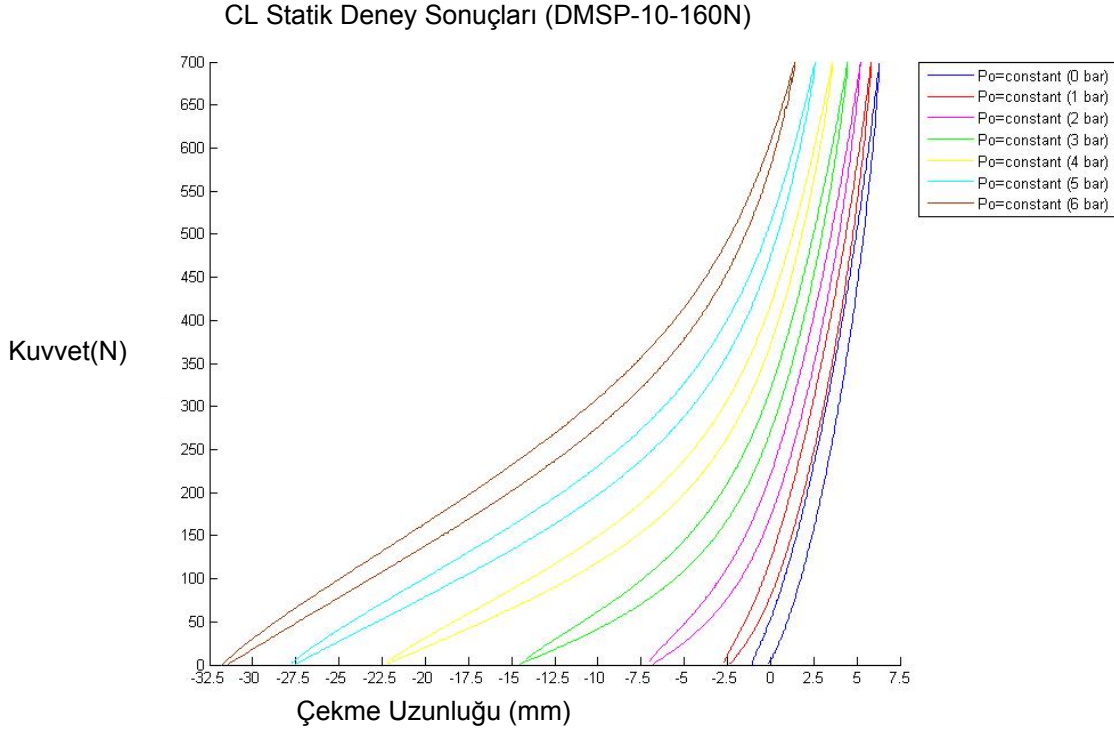


Şekil 2. DMSP-10 Yapay kasın ürettiği kuvvetin basınçla ilişkisi

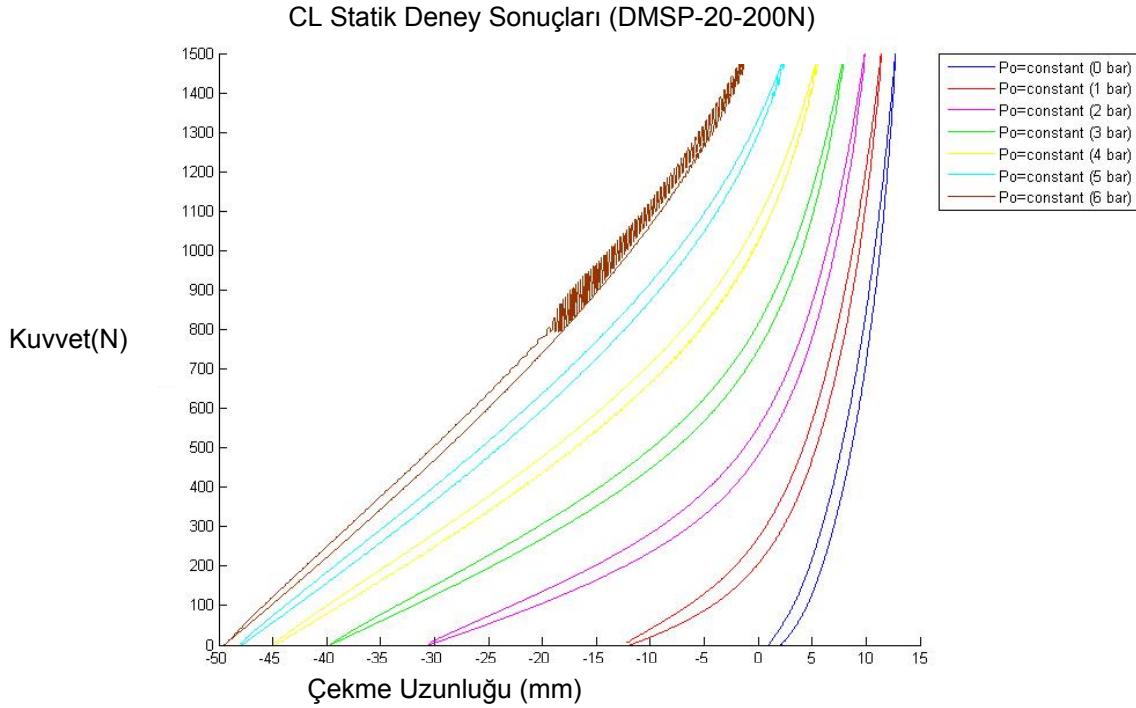


Şekil 3. DMSP-20 Yapay kasın ürettiği kuvvetin basınçla ilişkisi

Kas kısalması ve kuvvet arasındaki ilişkiyi görebilmek için ise basınç sabit tutularak deney gerçekleştirilmiştir. Farklı basınç değerleri için deney tekrarlanmıştır.



Şekil 4. DMSP-10 Yapay kasın ürettiği kuvvet ile kastaki kısalma miktarının ilişkisi

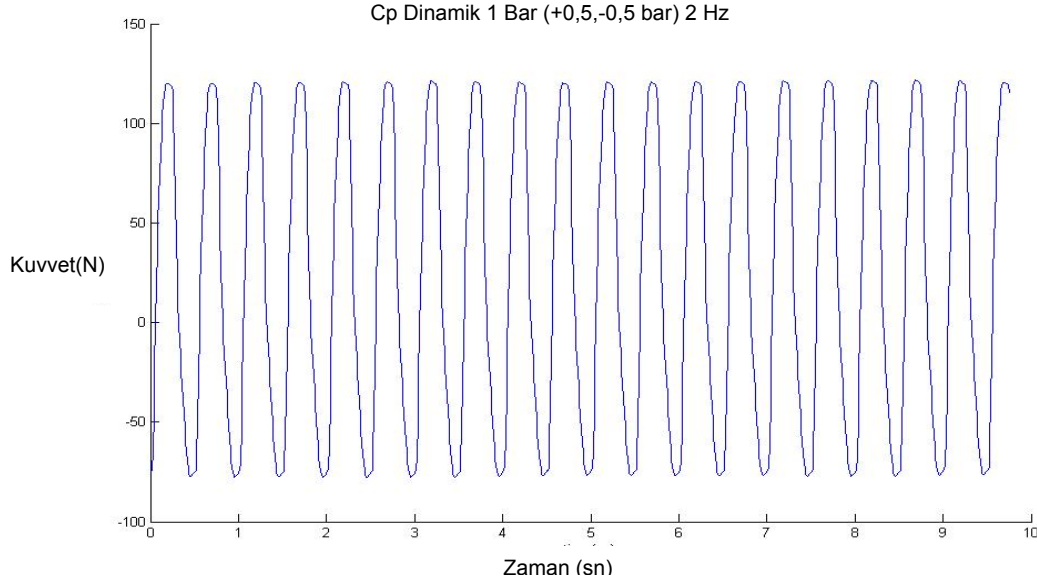


Şekil 5. DMSP-20 Yapay kasın ürettiği kuvvet ile kastaki kısalma miktarının ilişkisi

Elde edilen noktalardan alınan veriler interpolasyonla birleştirilerek şekilde görülen eğriler elde edilmiştir. C_L deneylerinde elde edilen bir başka bilgi de yapay kasın belli bir kısalma-uzama çevriminde histerez davranışı gösterdiğidir.

Dinamik Karakteristik Deneyleeri

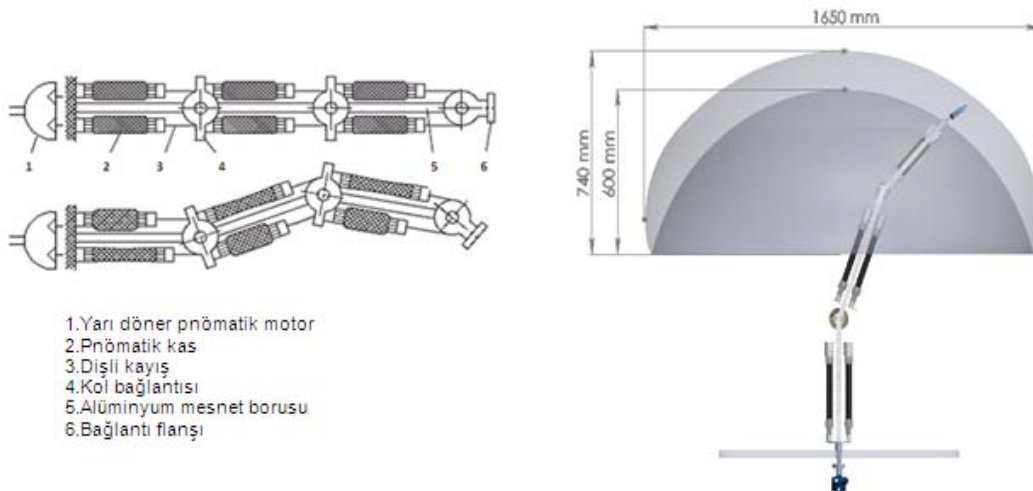
Dinamik karakteristik deneyinde ise, kılalma miktarı sabit tutularak, basınç belli sınırlar arasında ve belli bir frekans değeriinde periyodik olarak uygulanarak, kasın ürettiğı kuvvetin buna cevabı gözlenmiştir. Basınç genliğı ve frekansı değıştirilerek deney tekrar ettirilmiştir. Spesifik bir deneyde elde edilen sonuç aşağıda görüldüğü gibidir;



Şekil 6. Yapay kasın ürettiğı kuvvetin 2 Hz frekanstaki periyodik basınç değışimine olan cevabı

4. MEKANİK YAPI

4 serbestlik dereceli robotun temel işlevi bir parçayı bir yerden alıp başka bir yere koymaktır. Geliştirilen sistemin genel yapısı Şekil 7'de sunulmuştur. En altta bulunan dönel silindir, robotun kendi etrafında 180° dönmesini sağlamaktadır. Her üç eklemdede bulunan yapay kas çiftleri karşılıklı çalışarak tel kasnak mekanizmasının yardımıyla kolun hareketini sağlamaktadır. Robotun en ucunda ise iş parçasını tutmak için pnömatik tutucu yer almaktadır.



Şekil 7. Sistemin genel yapısı – sistemin 3 boyutlu resminin yandan görünüşü ve robotun çalışma alanı [7]



Geliştirilen manipülatör hafif ve düşük ataletlidir. Hafif bir tasarım amaçlanmış, düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet özellikleriyle dikkat çeken kestamit ve cam elyaf takviyeli kompozit malzeme kullanılmıştır. Kullanılan kompozit malzeme içi boş silindirik şekilde, rijit ve oldukça hafiftir. Herhangi bir burkulma olayına meydan vermemektedir. [8]

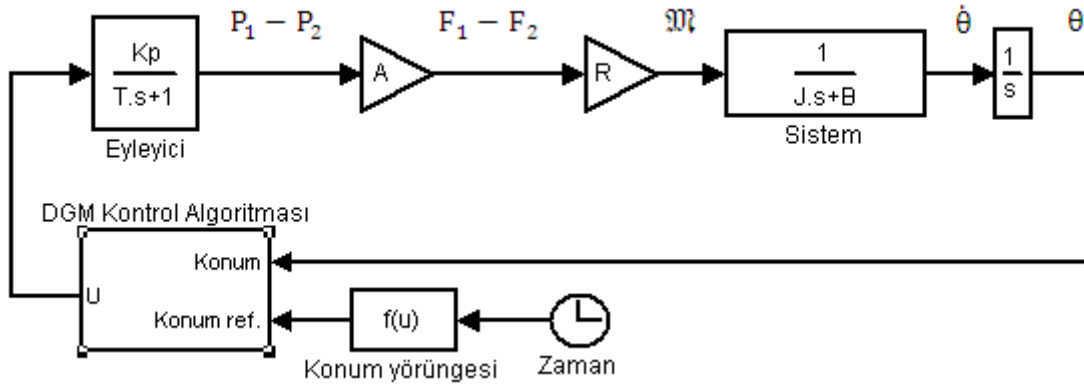
5. KONTROL DONANIMI

Bilgisayar ve robot arasındaki bilgi alış verişi için PCI-6221 tipi veri toplama kartı kullanılmıştır. 68 bacaklı bu kartın 16 tane analog girişi, 2 tane analog çıkışı ve 24 tane dijital çıkışı bulunmaktadır. Potansiyometre ve basınçölçer çıkışları analog girişlere iletilmiş, kaslara verilen basınçlı havanın aç-kapa valflerle kontrolü dijital çıkışlarla gerçekleştirilmiştir. 3/2'lik solenoid valfler 24 V.'luk gerilimle çalışmaktadır. Veri toplama kartından çıkan 0-5 V aralığındaki dijital sinyalin 24V.'luk solenoid valfleri anahtarlaması için bir valf sürücü devre geliştirilmiştir. Devrede optik yalıtım ve DGM gürültüsünü önlemek için filtre bulunmaktadır. [8]

6. PNÖMATİK YAPAY KASLI ROBOTUN KAPALI ÇEVİRİM KONTROL UYGULAMALARI

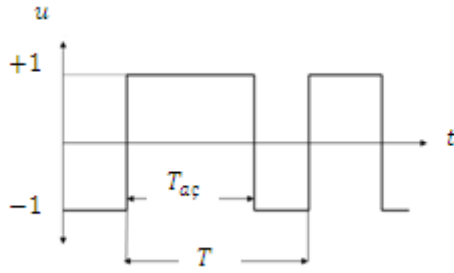
Darbe Genişliği Modülasyonu (DGM) ile kontrol

Referans konumu etrafında küçük sapmalar için, her bir eklem ve eyleyici birinci dereceden transfer fonksiyonları ile modellenilebilir. Bir eklemin blok diyagramı Şekil 8'de gösterilmiştir. Burada J, eklem eksenine indirgenmiş atalet momentini, B eklem eşdeğer viskoz sürtünme katsayısını, K_p eyleyici kazancını, T eyleyicinin zaman sabitini göstermektedir.



Şekil 8. Darbe Genişliği Modülasyonu ile kontrol blok diyagramı

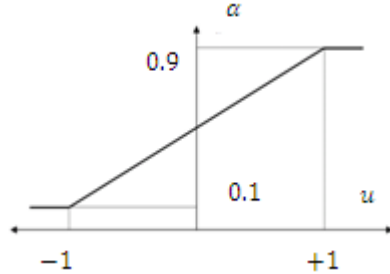
DGM genellikle gerilimi anahtarlama yolu ile DA motorlarında uygulanan bir hız kontrolü yöntemidir. Burada ise sistem, valflerin beslemeye açık ve atmosfere açık olma sürecinin bir periyot içinde ayarlanabildiği bir kumanda sinyali ile kontrol edilmektedir. [9] Açık kalma süresinin toplam zamana oranı "görev çevrimi" (α) olarak adlandırılır. Açma kapama zamanları bir algoritma ile belirlenerek etkin kumanda gerçekleştirilir.



$T_{aç}$: Valfin basınca açık kalma süresi
 T : DGM Periyodu
 $\alpha \in [0.1 ; 0.9]$
 $\alpha = T_{aç}/T$

Şekil 9. Darbe genişliği modülasyonu

α 'nın 0.5 değeri bir periyot içerisinde valfin %50 açık kalacağını ifade eder. Valfi açma veya kapama gecikmesi periyodun 1/10'undan daha fazla olmamalıdır. Dolayısıyla, α 0.1 ve 0.9 arasında değerler alır. DGM sinyalinin periyodu bu limitlere göre belirlenir. Pnömatik sistemde karşılıklı çalışan iki kas için de ayrı α değerleri ile valflere DGM uygulanmıştır. α 'nın referansa yaklaştıkça, değişen kontrol sinyaliyle olan ilişkisi şekildedir.

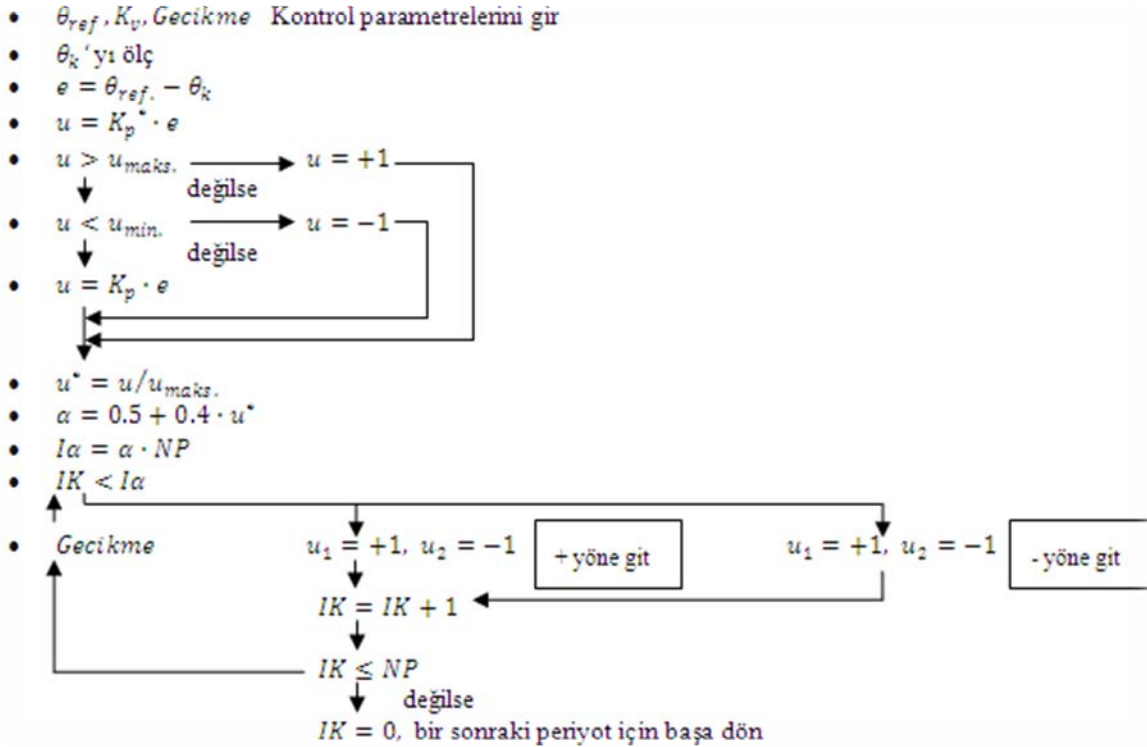


$u=-1$ için $\alpha=0.1$
 $u=0$ için $\alpha=0.5$
 $u=+1$ için $\alpha=0.9$

olduğu göz önüne alındığında, α ve u arasında,

$\alpha = 0.5 + 0.4 \cdot u$ şeklinde bir ilişki vardır.

Şekil 10. u - α karakteristiği

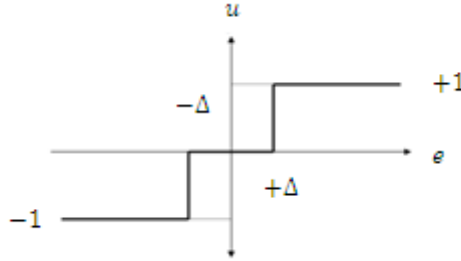


Şekil 11. Darbe Genişliği Modülasyonu Kontrol Programı Akış Diyagramı

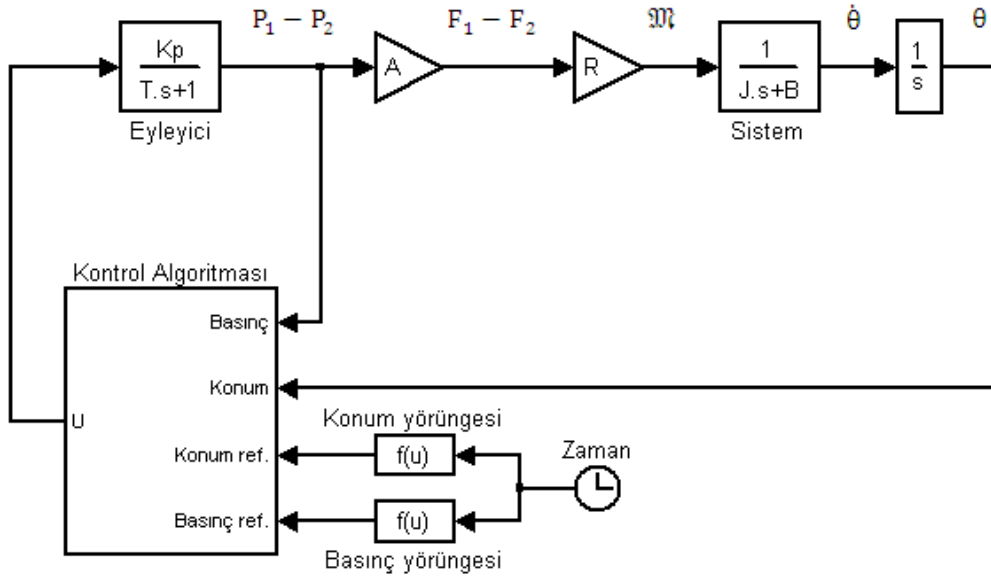


Basınç ve Konum Geri Beslemeli Ölü Bölge İkili Kontrol

Sistemin dinamik davranışını tanımlayan durum değişkenlerinin referans yörüngeleri etrafındaki salınımlarını azaltmak için referans yörüngesi etrafında ölü bölge tanımlanmıştır. Ölü bölgenin genişliği, referans yörünge hassasiyeti ve sistem cevabını doğrudan etkilemektedir. [10]

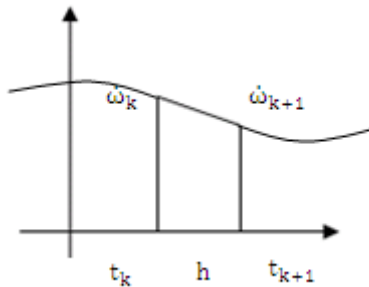


Şekil 12. Ölü Bölge Diyagramı



Şekil 13. Basınç ve Konum Geri Beslemeli Ölü Bölge İkili Kontrol Blok Diyagramı

İkili kontrol için ölü bölge tanımlandıktan sonra daha hassas kontrol sonuçları elde edilmesi amacıyla sistem üzerinde basınç ve konum geri beslemesi uygulanmıştır. Hız hatası hesabında, konum hatalarından sayısal türev almak yerine, basınç değişimlerinden sayısal integrasyon ile daha kesin hesap ve tahminler yapılacaktır. Trapez kuralı ile integrasyon yapılırsa (18) numaralı denklem elde edilir.



Şekil 14. Trapez kuralı ile integrasyon



$$\omega_{k+1} = \omega_k + \int_{t_k}^{t_{k+1}} \dot{\omega}(\tau) d\tau \quad (16)$$

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} \dot{\omega}(\tau) d\tau = \left(\dot{\omega}_k + \dot{\omega}_{k+1} \right) \frac{h}{2} \quad (17)$$

$$\omega_k = \omega_{k-1} + \left(\dot{\omega}_{k-1} + \dot{\omega}_k \right) \frac{h}{2} \quad (18)$$

Sistemin dinamik yapısı (19) numaralı denklemlerle ifade edilmektedir:

$$\dot{\omega} = -\frac{B}{J} \omega + \frac{AR}{J} (P_1 - P_2) \quad (19)$$

(19) numaralı denklemlerle döngüde yer alacak hız, ivme ve basınç değerleri yerleştirilirse aşağıdaki (20) ve (21) numaralı denklemler elde edilir:

$$\dot{\omega}_{k-1} = -\frac{B}{J} \omega_{k-1} + \frac{AR}{J} \left(P_{1_{k-1}} - P_{2_{k-1}} \right) \quad (20)$$

$$\dot{\omega}_k = -\frac{B}{J} \omega_k + \frac{AR}{J} \left(P_{1_k} - P_{2_k} \right) \quad (21)$$

(20) ve (21) numaralı denklemlerin toplanmasıyla (22) numaralı açısal ivme ifadesi bulunur:

$$\dot{\omega}_{k-1} + \dot{\omega}_k = -\frac{B}{J} (\omega_{k-1} + \omega_k) + \frac{AR}{J} \left[\left(P_{1_k} + P_{1_{k-1}} \right) - \left(P_{2_k} + P_{2_{k-1}} \right) \right] \quad (22)$$

Trapez kuralı integrasyonu ile bulunan (18) numaralı denklemin içine (22) numaralı denklemler yerleştirildiğimiz zaman (23) numaralı açısal hız ifadesi bulunur:

$$\omega_k = \omega_{k-1} + \left\{ -\frac{B}{J} (\omega_{k-1} + \omega_k) + \frac{AR}{J} \left[\left(P_{1_k} + P_{1_{k-1}} \right) - \left(P_{2_k} + P_{2_{k-1}} \right) \right] \right\} \quad (23)$$

(23) numaralı denklemin toparlanmasıyla (24) numaralı denklem elde edilir:

$$\omega_k = \frac{\left(1 - \frac{hB}{2J} \right)}{\left(1 + \frac{hB}{2J} \right)} \omega_{k-1} + \frac{\left(\frac{hAR}{2J} \right)}{\left(1 + \frac{hB}{2J} \right)} \left[\left(P_{1_k} + P_{1_{k-1}} \right) - \left(P_{2_k} + P_{2_{k-1}} \right) \right] \quad (24)$$

Böylece sabit c_v hız kazancı ve c_p basınç kazancı bulunur:

$$c_v = \frac{\left(1 - \frac{hB}{2J} \right)}{\left(1 + \frac{hB}{2J} \right)} \quad (25)$$



$$c_p = \frac{\left(\frac{h}{2} \frac{AR}{J}\right)}{\left(1 + \frac{h}{2} \frac{B}{J}\right)} \quad (26)$$

Bulunan hız ve ivme değerleri sadece basınç geri beslemesiyle hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerin hız ve ivme yörüngelerinden farkı, hız ve ivme hatalarını verecektir.

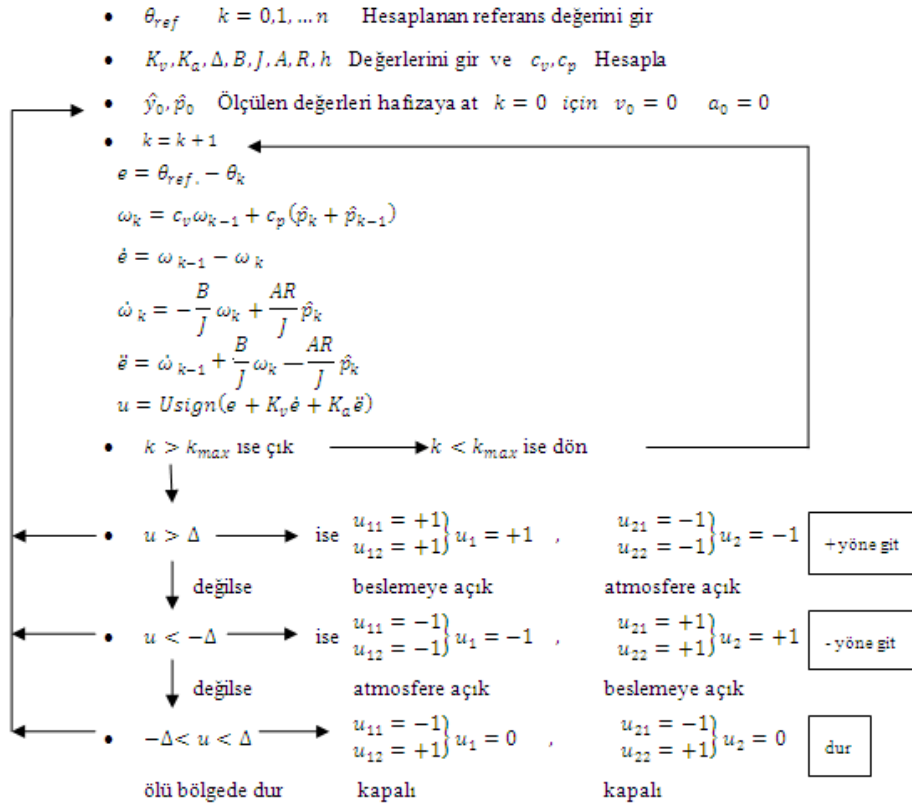
$$e_k = \theta_{ref.} - \theta_k \quad (27)$$

$$\dot{e}_k = \omega_{k-1} - c_v \omega_{k-1} + c_p \left[\left(P_{1k} + P_{1k-1} \right) - \left(P_{2k} + P_{2k-1} \right) \right] \quad (28)$$

$$\ddot{e}_k = \dot{\omega}_{k-1} - \left[-\frac{B}{J} \omega_k + \frac{AR}{J} \left(P_{1k} - P_{2k} \right) \right] \quad (29)$$

Konum geri beslemesiyle elde edilen konum hatasıyla u sinyali elde edilir. Kontrol katsayıları, K_v hız geri besleme katsayısı ile K_a ivme/kuvvet geri besleme katsayısı olmak üzere kontrol sinyali (30) numaralı denklem ile elde edilir:

$$u_k = Usign(e_k + K_v \dot{e}_k + K_a \ddot{e}_k) \quad (30)$$



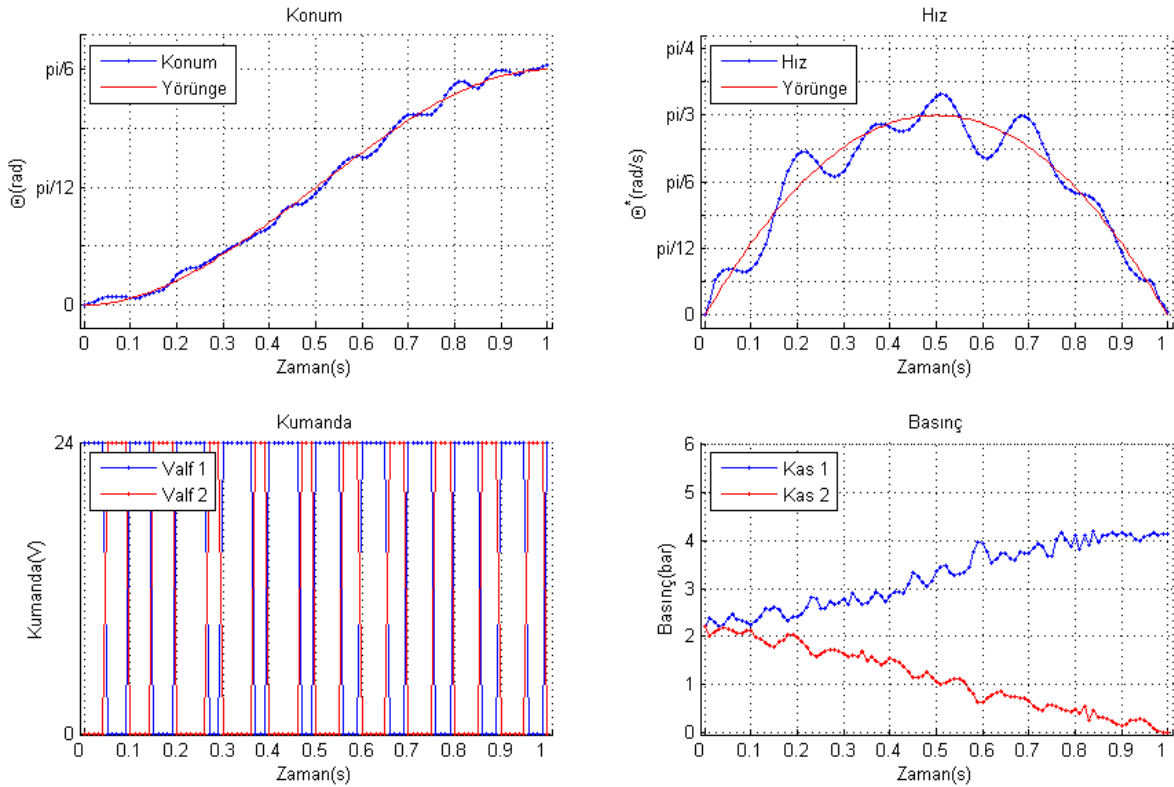
Şekil 15. Basınç ve Konum Geri Beslemeli Ölü Bölge İli Kontrol Programı Akış Diyagramı

7. DENEYLER

Darbe Genişliği Modülasyonu (DGM) ile kontrol

Etkin bir DGM kontrolü için DGM frekansının sistemin dinamik davranışı ile uyumlu olması gerekmektedir. Frekansın çok yüksek olması durumunda valf hızlı anahtarlamalara karşı duyarsız kalmıştır. Yapılan deneyler sonucunda her eklem için farklı bir çalışma frekansı belirlenmiştir. 1. eklem ve 2. eklem için 10 Hz, 3.eklem için 15 Hz DGM frekansı uygulanmıştır. Kontrol algoritmaları öncelikle 1. eklem üzerinde denenmiştir. Sistem çalışma basıncı 4 ila 6 bar arasında tutularak deneyler yapılmıştır.

Sadece tek eklem için Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) ile kontrolünde; sistem istenen referansa oturana kadar karşılıklı çalışan iki eyleyici de tamamen atmosfer veya besleme basıncı değerine ulaşmadığından sistem her zaman bir frenleme etkisi altında istenen referansa gitmektedir. Yapılan deneyler sonucunda her uzuv için yaklaşık aynı olan optimum P_K katsayısı 0.05 olarak belirlenmiştir. Bu katsayı değeri, deneysel olarak bulunmuştur. Şekil 16'da 2. eklem için deneysel sonuçları gösterilmiştir.



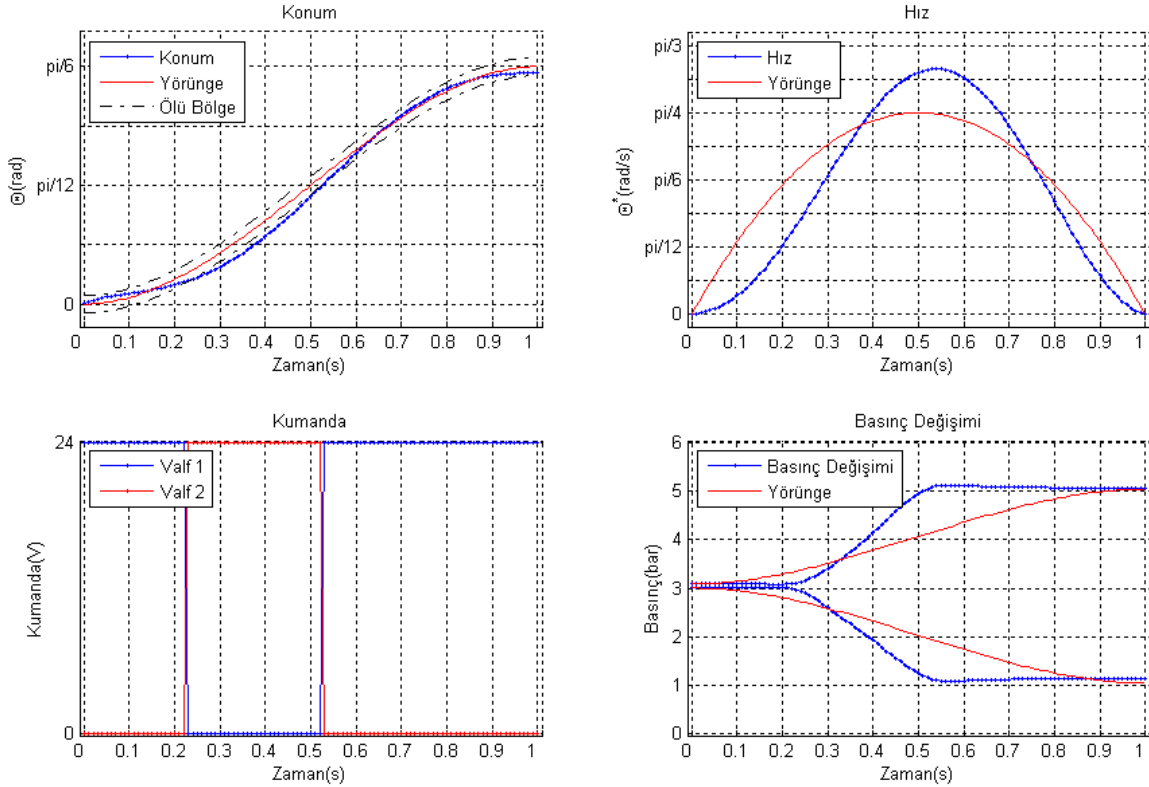
Şekil 16. 2. eklem için Darbe Genişliği Modülasyonu (DGM) ile konum kontrolü ($K_p = 0.05$, $f = 10$ Hz)

Basınç ve Konum Geri Beslemeli Ölü Bölge İkili Kontrol

Basınç ve konum geri beslemeli ölü bölgesi ikili kontrolde, sistem istenen referansa otururken DGM'li kontrole göre daha iyi cevap vermiştir. Basınç ve konum geri beslemeli ölü bölgesi ikili kontrolde sistemin istenilen konumda durması için kasların içindeki havanın hapsedilmesi gerekir. Her bir kasın kontrolü için ikişer adet aç-kapa valf kullanılmıştır. Böylelikle valflerin 3/3 tek bir valf gibi çalışması sağlanmıştır.

K_a ve K_v kontrol katsayıları, kontrol algoritması içinde hesaplanan ivme ve hız hatasının katsayılarıdır. Deneylerde, ilk önce $K_a = 0$ verilerek ideal K_v katsayısı bulunmuştur. Sonra K_a katsayısı bulunmuştur. Yapılan deneyler sonucunda her uzuv için yaklaşık aynı olan optimum kontrol katsayıları $K_a = 10^{-5}$ ve

$K_v=0.2$ olarak belirlenmiştir. Kontrol sinyalini belirleyen kullanıcı parametreleri K_a ve K_v katsayılarıdır. Her eklem için optimum ölü bölge $\Delta=0.02\text{rad}$ olarak belirlenmiştir. Optimum çalışma basıncı ise 5 bar'dır. Şekil 17'de 2. eklem için deneysel sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 17. Basınç ve Konum Geri Beslemeli Ölü Bölge İkili Kontrol Programı Akış Diyagramı ($\Delta=0.02\text{rad}$, $K_v=0.2$, $K_a=10^{-5}$)

SONUÇ

Yapay kasların taşıyabileceği maksimum kuvvetin, kesite, kontrol basıncına ve eyleyicinin kendi ağırlığına oranları yüksektir. Bu yüksek oranlar pnömatik robotlarda ve kuvvet kontrolünde önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca eyleyici kısılırken uygulanan kuvvetin azalması, pnömatik kasla biyolojik kas arasındaki başlıca benzerliklerdendir. Bu benzerlik, karşılıklı çalışan pnömatik kaslarla hareket eden robot kolların doğal esnekliklerini de açıklamaktadır. Lineer olmayan davranışlar, kapalı çevrim kontrol uygulamalarında kasların dinamik davranışlarının bozulmasına neden olabilmektedir. [5]

En başarılı sonuç veren 2. eklem ele alındığında yapay kasın DGM ile kontrolünde $\%4.01(\pm 0.021\text{rad})$ hassasiyete ulaşılmıştır. Basınç ve konum geri beslemeli ölü bölge ikili kontrolde ise $\%2.67(\pm 0.014\text{rad})$ hassasiyete ulaşılmıştır. Sonuçlara, yapay kasların oransal valfler yerine daha ucuz olan aç-kapa valflerle kontrolü açısından bakıldığında, yapay kas teknolojisi için oldukça yüksek hassasiyetlere ulaşılmıştır. Basınç ve konum geri beslemeli ölü bölge ikili kontrolde konum kontrolü için basınç ve konum ölçmelerinin yeterli olduğu ve böylelikle hız ölçümünden vazgeçilebileceği görülmüştür. Basınç yörüngesi etrafında ikili kontrol başarılı sonuçlar vermiş ve diğer robot teknolojilerine göre ucuz donanımla gerçekleştirilmiştir.



Ancak, kas karakteristiğindeki histerez ve pnömatik sistem davranışının büyük ölçüde lineer olmayan yapısı, istenen tasarıma tam olarak ulaşılmasını zorlaştırmaktadır. Bu konudaki deneyler ve tasarım çalışmaları devam etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] COLBRUNN, R., W., NELSON, G., M., QUINN, R., D., “Design and Control of a Robotic Leg with Braided Pneumatic Actuators” IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Hawaii, USA, 2001.
- [2] SCHULTE, H., F., J., “The Characteristics of The McKibben Artificial Muscle” The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics, National Academy of Science-National Research Council, Washington D.C., USA, 1961.
- [3] BOBLAN, I., BANNASCH, R., SCHWENK, H., PRIETZEL, F., MIERTSCH, L., SCHULZ, A., “A Human-Like Robot Hand and Arm with Fluidic Muscles: Biologically Inspired Construction and Functionality”, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany, 2004.
- [4] TONDU, B., LOPEZ, P., “The McKibben Muscle And Its Use in Actuating Robot Arms Showing Similarities with Human Arm Behaviour”, I.N.S.A., Toulouse, France, 1997.
- [5] TARHAN, H., BASAR, H., B., “Pnömatik Yapay Kaslı Konum Kontrolü”, Bitirme Tasarım Projesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi İstanbul, Türkiye, 2006.
- [6] FESTO, Fluidic Muscle Catalog, FESTO Inc., Germany, 2005.
- [7] KARAKAŞ, E., ÇETİN, V., KÖKSOY, U., “Pnömatik Yapay Kaslı Robot Kolunun Konum Kontrolü”, Bitirme Tasarım Projesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, İstanbul, Türkiye, 2007
- [8] KOÇ, İ., M., “Hassas ve Katı Pnömatik Konum Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 1998.
- [9] KUZUCU, A., KARACA, B., BENLİGİRAYOĞLU, H., GÖKSEL, T., O., “Pnömatik Silindirlerde Basınç Geri Beslemesi ile Hassas Konum Kontrolü” III. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi, İstanbul, Türkiye, 2002.

ÖZGEÇMİŞLER

Muhsin YILMAZ

1985 yılında Samsun’da doğdu. Orta ve lise eğitimini Samsun Anadolu Lisesi’nde tamamladı. Liseyi okul birinciliğiyle tamamladı. 2004 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimine başladı. İTÜ Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’nden “Lisans” derecesini Ocak 2008’te alarak 3,5 yıl gibi kısa bir sürede mezun olan Muhsin Yılmaz, İTÜ Makina Fakültesi’nde Sistem Dinamiği ve Kontrolü Laboratuvarı ve Biyomekanik Laboratuvarında çalışmalarına devam etmektedir.

Erdem KARAKAŞ

1985’de Eskişehir’de doğdu. Ortaokul eğitimini Eskişehir Anadolu Lisesi’nde, lise eğitimini ise İzmir Fen Lisesi’nde tamamladı. 2003 senesinde İTÜ Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimine başlayan Karakaş, Haziran 2007’de bu bölümden mezun oldu. Şu an İTÜ Makina Fakültesi Sistem Dinamiği ve Kontrol Bölümü’nde yüksek lisans yapmakta olan Erdem Karakaş eşzamanlı olarak Saf Makine A.Ş.’de mekanik tasarım proje sorumlusu olarak görev yapmaktadır.

**Zeynep Gülcan ÇOLAK**

1983'te İstanbul'da doğdu. Orta ve lise eğitimini Adile Mermerci Anadolu Lisesi'nde tamamladı. Lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde 2007'de tamamladıktan sonra, İTÜ Makina Fakültesi Makine Dinamiği, Titreşim ve Akustik Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. Halen yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Çalışmaları kabin içi akustiği, akışkan ve yapı etkileşimleri, model analiz konularında yoğunlaşmıştır.

Ahmet KUZUCU

1948'de Erzurum'da doğdu. 1971'de İTÜ Makine Fakültesi'nden mezun oldu. 1979 yılında İsviçre Lausanne Federal Politeknik Okulu'ndan "Bilim Doktoru" unvanını aldı. 1980'de Boğaziçi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne Yardımcı Doçent olarak katıldı. Burada "Akışkan Gücü Laboratuvarı"nı kurdu. 1985'te İTÜ Makine Fakültesi'ne Doçent olarak atandı, 1989'da Profesör oldu. Çok sayıda teknolojik uygulama projesi yürütmüş, Türkçe bir kitap yazmış, Türkçe, İngilizce ve Fransızca yayınlar yapmış, ileri teknolojilere yönelik yeni beş ders açmıştır. Otomatik Kontrol Vakfı ve Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Kurucu Üyesidir. "Hassas ve Kati Pnömatik Konum Kontrolü", "Taşıt Seyir Sistemleri", "Robotik", "Yapay Sinir Ağları", "Bulanık Kontrol Uygulamaları" alanları üzerine yoğunlaşmıştır. Hidrolik Pnömatik Kongreleri danışma kurulu üyesidir.