



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 05.05.2023
Kabul Tarihi : 15.06.2023

Received Date : 05.05.2023
Accepted Date : 15.06.2023

GERİBESLEME DOĞRUSALLAŞTIRMASI KULLANILARAK KABLO İLE SÜRÜLEN DÜZLEMSEL PARALEL BİR ROBOTUN DENETİMİ

CONTROL OF A CABLE-DRIVEN PLANAR PARALLEL ROBOT WITH FEEDBACK LINEARIZATION

Caner SANCAK¹ (ORCID: 0000-0003-0795-0204)
Mehmet İTİK^{2*} (ORCID: 0000-0002-3827-5697)

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye
² İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Caner SANCAK, csanca@ktu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, kablo ile sürülen düzlemsel paralel bir robotun konumunun PID denetimi ve geribesleme doğrusallaştırması tekniği ile birlikte PID denetimi başarımları deneysel çalışmalarla ortaya konulmuştur. Her iki denetim süreci kararlılık, kalıcı hal cevapları ve bozucu etkilere karşı dayanıklılık bakımından araştırılmıştır. Robotun uç işlemci kütlesi değiştirilerek denetçilerin model belirsizlikleri altındaki davranışları ayrıca incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. Çalışmanın sonucu olarak kablo ile sürülen paralel robot (KSPR) denetiminde geribesleme doğrusallaştırması tekniğinin kullanılmasının kararlılık ve bozucu etkilerin giderilmesinde sadece PID yönteminin kullanılmasına göre daha üstün olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında, geribesleme doğrusallaştırmasının kullanılması ile kalıcı hal davranışlarında ortalama %40 başarımların sağlanması sağlanmıştır. Son olarak, KSPR'nin geribesleme ile doğrusallaştırılmış PID denetiminde meydana gelebilecek bazı problemler ele alınmış ve bu problemlerin çözümlerine değinilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kablo ile sürülen robot, paralel robot, PID denetim, KSPR, geribesleme doğrusallaştırması

ABSTRACT

In this study, we study the positioning performances of PID control, and PID control used with feedback linearization method on a planar cable-driven parallel robot (CDPR) experimentally. Both control processes are examined in terms of stability, steady-state performances, and robustness to external disturbances. Robot's end-effector mass variations are also investigated to test the controllers under modelling uncertainties. The results obtained from the controllers are then compared and discussed. Results show that, the feedback linearization technique with PID control is superior in stabilization and elimination of disturbance effects than the use of PID control alone. Moreover, steady-state responses of feedback linearization PID control provides %40 performance improvement. Finally, we discuss some problems that may occur in feedback linearized PID control of CDPR and the solutions to these problems are addressed.

Keywords: Cable-driven robot, parallel robot, PID control, CDPR, feedback linearization

GİRİŞ

Kablo ile sürülen paralel robotlar (KSPR'ler) bir uç işlemcinin rijit uzuvlar yerine kablolarla tahrik edildiği paralel mekanizmalardır. Bu yönleri ile, düşük atalet, geniş çalışma uzaylarına erişebilme, yüksek yük/ağırlık oranlarına sahip olma ve daha yüksek çalışma hızlarına ulaşabilme açısından diğer paralel robotlara göre üstünlük sunmaktadırlar.

KSPR'lerin kablo ile sürülmesinin getirdiği faydalarla birlikte kabloların bası kuvveti taşıyamaması nedeni ile bu robotlarda tasarım ve denetim süreci problemleri de ortaya çıkmaktadır. Bası kuvvetinin yerine geçmesi ve rijitliği artırmak için, bu robotlarda serbestlik derecesinden bir fazla eyletici (actuator) yani bir fazla kablo kullanılması gerekmektedir. Bu durumda artıksıl eyletme (redundant actuation) durumu meydana gelmekte, robotun kinematik analizi ve uygun denetçi tasarlama süreci zorlaşmaktadır (Gosselin, 2014). Endüstriyel uygulamalarda KSPR'lerin yaygınlaşması için ise hassas denetimleri gereklidir. Literatürde KSPR'ler için farklı denetim yöntemleri önerilmiştir. Yanai vd., (2002) genel olarak bu robotların denetimi için geribeslemeli anti-swing olarak adlandırılan bir yöntem sunmuşlardır. Robotun salınım yapmasını engellemek ve hassas bir denetim için çalışmalarında ters dinamikleri (inverse dynamics) dikkate almışlardır. Alp & Agrawal (2002) Lyapunov denetçi yöntemi ve geribesleme doğrusallaştırma tekniği kullanarak altı serbestlik dereceli kablolu robotun denetimini benzetimde ve deneysel ortamda gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, sürtünmelerin dikkate alınacak kadar hataya sebep olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir. Gürbüz bir denetim yöntemi olan kayan kipli denetim (sliding mode control) yöntemi de bu robotlara uygulanmıştır (Bak vd., 2016; Korayem vd., 2012; Oh & Agrawal, 2004; Sancak vd., 2019). Yapılan bu çalışmalarda bozucu etkilerin giderildiği ve verilen kablo gerilimi kısıtlarını sağlayarak yüksek başarımla robotun denetlediği gösterilmiştir. Tüm bu ileri denetim yöntemleri ile KSPR'lerin denetiminde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Fakat tüm bu yöntemler pratikte hem tasarım hem de endüstriyel denetim sistemlerinde kullanılması açısından oldukça karmaşıktır. Ayrıca denetçi parametrelerinin ayarlanması özel uzmanlık gerektirdiği için sahadaki mühendisler tarafından yapılabilmesi zaman alıcıdır.

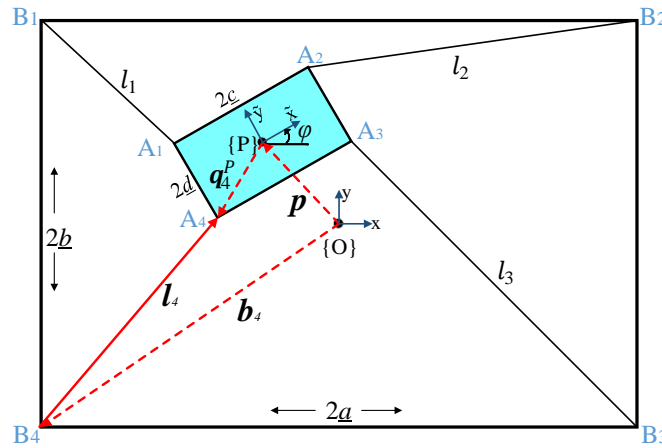
Endüstriyel uygulamalarda en yaygın denetim türü olarak tasarım ve uygulama kolaylığı sebebiyle klasik orantı-integral-türev (PID) denetçileri kullanılmaktadır. Diğer yöntemlerden farklı olarak, PID denetçi çok fazla gelişmiş denetim teorisi bilgisi gerektirmemektedir. Bu durum, PID denetçileri endüstrideki denetim uygulayıcıları arasında daha popüler hale getirmiştir. Bu yüzden birçok çalışmada KSPR'ler, çeşitli denetim görevlerini yerine getirmede geribesleme doğrusallaştırma (feedback linearization) tekniği ile birlikte PID denetim yöntemi kullanılarak denetlenmiştir (Sancak & İtik, 2022; Williams vd., 2003). Ayrıca, bilinen sınırlı belirsizliklerin üstesinden gelmek için gürbüz bir PID denetleyici Khosravi & Taghirad (2014) çalışmasında sunulmuştur. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar PID denetimin kolay uygulama imkânı tanınmasından dolayı KSPR'lerin endüstriyel uygulamalardaki denetimi açısından önemli olduğunu ortaya koymaktadır. KSPR'lerin denetiminde geri besleme doğrusallaştırması tekniği, sunduğu avantajlar nedeni ile sıklıkla kullanılmaktadır. Bu teknik, yazarlar tarafından yapılan diğer denetim çalışmalarında da (Sancak vd., 2019; Sancak & İtik, 2022; Sancak vd., 2023) farklı denetçiler ile kullanılarak robot denetimi sağlanmıştır.

PID denetçilerin birçok avantajı olmasına rağmen, KSPR'lerin doğrusal olmayan bağlaşıklık dinamiklerinin üstesinden gelmek ve hassas yörünge izleme cevabı elde etmek için başarımları yetersiz kalabilir. Özellikle uç işlemcinin taşıdığı yük değişimleri robotun yörünge takip başarımını etkilemektedir. Literatürde dört kablo ile sürülen düzlemsel bir robot için uç işlemci kütle değişiminin konum takibi başarımına etkisini üzerine yapılan çalışmalar ise kısıtlıdır. Özellikle PID ve geribesleme doğrusallaştırma tekniği ile birlikte PID denetçilerin artıksıl sınırlandırılmış düzlemsel KSPR'lerin denetimi esnasında ortaya çıkan uç işlemci kütle değişimi karşısındaki başarımları üzerine bir çalışmaya yazarların bilgisi dahilinde rastlanmamıştır. Bu çalışma kapsamında, dört kablo ile sürülen artıksıl sınırlandırılmış düzlemsel KSPR'nin konum denetimi için geleneksel PID denetçi tasarlanmış ve uygulanmıştır. Ardından, geribesleme doğrusallaştırması tekniği ile birlikte PID denetçi uygulanması çalışması yapılmıştır. Her iki yöntemin KSPR'nin konum takibi başarımını üzerindeki etkileri incelenmiştir. Özellikle uç işlemci kütle değişimleri için başarımlar incelenerek denetçiler kıyaslanmıştır. Böylece, geribesleme doğrusallaştırmasının olduğu ve olmadığı durumlardaki PID denetçi başarımları ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada ilk olarak konu ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar ve bu çalışmanın motivasyonu verilmiştir. Daha sonra kullanılan KSPR yapısı sunulmuştur. Ardından robotun kinematığı ve dinamik modeli sunulmuştur. Konum denetimi için tasarlanan denetçiler açıklanmıştır. Deneysel kurulum ve yapılan deneysel çalışmaların sonucu verilmiştir. Son olarak elde edilen genel sonuçlar irdelenmiştir.

DÖRT KABLO İLE SÜRÜLEN DÜZLEMSEL PARALEL ROBOT YAPISI

Bu çalışmada ele alınan KSPR, sabit bir ana çerçevenin köşelerine yerleştirilmiş eyleticiler tarafından uzunluğu değiştirilen dört kablo yardımı ile paralel olarak desteklenmiş ve bir uç işlemci görevi yapan elemandan meydana gelmektedir. Bu KSPR'nin kinematik diyagramı Şekil 1 ile verilmiştir (Sancak, 2022).



Şekil 1. Düzlemsel Paralel Kablo ile Sürülen Robotun Kinematik Diyagramı

Robotun kinematik analizinde iki farklı koordinat sistemi kullanılmıştır. Bunlar; düzlemsel robota ait ana çerçevenin ortasındaki $\{O\}$ sabit referansında bulunan x - y global koordinat sistemi ve hareketli uç işlemcinin ağırlık merkezindeki $\{P\}$ referans noktasında bulunan yerel \tilde{x} - \tilde{y} koordinat sistemidir. Uç işlemci, kabloların eyletici yardımı ile boylarının değiştirilmesi sonucu x - y düzleminde hareket etmektedir. Kabloların bir ucu, dört kablo için sırasıyla A_1 , A_2 , A_3 ve A_4 noktalarından uç işlemciye, diğer ucu ise B_1 , B_2 , B_3 ve B_4 noktalarında sabit gövde üzerinden eyleticilere (vinçlere) bağlıdır. Burada i . kabloya ait kablo uzunluklarını l_i , ana çerçevenin merkezi ile köşeleri arası mesafeyi b_i , uç işlemcinin merkezi ile köşeleri arasındaki mesafeyi q_i vektörleri ifade etmektedir. Uç işlemci, (x, y, φ) olmak üzere düzlemde üç serbestlik derecesine sahiptir. Konum vektörü p uç işlemcinin $\{O\}$ sabit referansına göre konumunu vermektedir ve yine uç işlemcinin $\{O\}$ referansına göre dönme açısı φ sembolü ile gösterilmiştir. Dikdörtgen yapıya sahip sabit gövdeye ait uzunluk parametreleri x ekseninde a ile y ekseninde ise b sembolleri ile belirtilmiştir. Uç işlemci de dikdörtgen yapıya sahip olup \tilde{x} ekseninde $2c$ ve \tilde{y} ekseninde ise $2d$ uzunluğuna sahiptir.

KİNEMATİK MODEL

Bu çalışmada ele alınan düzlemsel KSPR'nin ters ve ileri kinematik denklemlerinin elde edilmesi ve ileri kinematik denklemlerin çözümü için kullanılan yöntemler aşağıdaki kısımlarda açıklanmaktadır.

KSPR Ters ve İleri Kinematığı

KSPR'ler için ters kinematik, bilinen uç işlemci konumu ve yönelimine karşılık gerekli kablo uzunluklarının (mafsal uzunluğu olarak düşünülebilir) bulunması işlemidir. Bu süreç, her bir kablo için bir kapalı döngü kinematik zincir oluşturularak modellenebilmektedir. Şekil 1'de gösterilen kesikli kırmızı çizgiler tek bir kablo için kinematik zinciri belirtmektedir. Burada gerekli vektörel işlemler (Williams vd., 2003) yapıldığında düzlemsel KSPR için kablo uzunlukları Denklem 1 ile ifade edilebilir.

$$l_i = \sqrt{(x - b_{ix} + q_{ix}^P \cos \varphi - q_{iy}^P \sin \varphi)^2 + (y - b_{iy} + q_{ix}^P \sin \varphi + q_{iy}^P \cos \varphi)^2} \quad (1)$$

Denklemden anlaşılacağı üzere, bilinen (x, y, φ) değerleri yerine yazıldığında her bir kablo uzunluğu bu denklem kullanılarak kolayca elde edilebilmektedir.

KSPR'ler için ileri kinematik problem ise ters kinematik problemin tersi olarak kablo uzunluklarının bilindiği durumda bu uzunlukların vektör kapalılık denklemlerinde yerine konması ile uç işlemciye ait gerçek konumun ve yönelimin bulunması işlemidir. Dört kablo ile sürülen düzlemsel robotun ileri kinematiği için denklem sayısının bilinmeyen sayısından fazla olduğu doğrusal olmayan bağımlı bir denklem sistemi ortaya çıkmaktadır. Bu denklem sisteminin çözümü için ise ve Parikh & Lam (2005) tarafından sunulan ve Sancak vd. (2019) tarafından KSPR'ler için uygulanan yöntem bu çalışmada da kullanılmıştır.

İleri kinematik çözüm için kullanılan yöntem temelde Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Newton-Raphson (NR) yönteminin ardışık olarak kullanılmasına dayanmaktadır. İlk olarak, oluşturulan YSA modeli, kablo uzunlukları ağa verildiğinde çıktı olarak uç işlemcinin konumunu (x, y) ve yönelim açısını (φ) yaklaşık olarak belirlemek için kullanılmıştır. YSA eğitimi için gerekli veri seti ters kinematik denklemin birçok değer için çözülmesi ile elde edilmiştir. Böylece girişleri l_1, l_2, l_3, l_4 olan ve çıkışları ise x, y, φ olan YSA modelinin yapısı oluşturulmuştur. NR yöntemi, YSA ile elde edilen ileri kinematik çözümün geliştirilmesi ile gerçek çözüme çok daha yakın sonuçların edilmesi amacıyla kullanılmıştır. Bu yöntemde ters kinematik denklem amaç işlevi olarak kullanılmış ve bu işlevin değerinin en küçüklenmesi ile gerçek konumun bulunması hedeflenmiştir. YSA ile elde edilen yaklaşık çözüm NR yöntemi için başlangıç koşulu olarak kullanılmış ve böylece NR yönteminin yakınsaması ve sonuç verme süresi hızlandırılmıştır.

DİNAMİK MODEL

KSPR için dinamik model uç işlemci dinamik modeli ve eyletici dinamik modelinin birleşimi olarak elde edilebilir. Uç işlemcinin dinamik modeli, Newton-Euler denklemleri kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Sancak vd., 2022).

$$\mathbf{H}_{3 \times 4} \mathbf{T}_{4 \times 1} = \begin{bmatrix} m_u \ddot{\mathbf{p}}_{2 \times 1} - m_u \mathbf{g}_{2 \times 1} \\ \mathbf{I}_u \ddot{\boldsymbol{\varphi}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada yapı matrisi \mathbf{H} ;

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -l_1/\|l_1\| & \dots & -l_4/\|l_4\| \\ \mathbf{R}q_1^P \times (-l_1/\|l_1\|) & \dots & \mathbf{R}q_4^P \times (-l_4/\|l_4\|) \end{bmatrix}$$

eşitliği ile ifade edilmektedir ve kablo kuvvetleri vektörü $\mathbf{T} = [t_1, t_2, t_3, t_4]^T$ 'dir. m_u uç işlemci kütleini, \mathbf{g} : yerçekimi ivmesini, \mathbf{I}_u : uç işlemcinin geometrik merkez eksenlerine göre atalet tensörünü, \mathbf{R} : dönme matrisini ifade etmektedir. Eyletici olarak vinç sisteminin genel dinamik modeli ise aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{T} = \mathbf{r}_d^{-1}{}_{4 \times 4} (\boldsymbol{\tau}_{4 \times 1} - \boldsymbol{\tau}_f{}_{4 \times 1} - \mathbf{I}_{a4 \times 4} \ddot{\boldsymbol{\Omega}}_{4 \times 1} - \mathbf{C}_{4 \times 4} \dot{\boldsymbol{\Omega}}_{4 \times 1}) \quad (3)$$

Burada, vinç sistemi kütleli atalet momenti \mathbf{I}_a , sönüm katsayısı \mathbf{C} ve vinç tamburunun yarıçapı \mathbf{r}_d köşegen matrisleri ile gösterilmiştir. Her eyleticiye ait statik sürtünme torku $\boldsymbol{\tau}_f$, motor torku $\boldsymbol{\tau}$ ve motor açıl konumu $\boldsymbol{\Omega}$ vektörü ile gösterilmiştir. Bu iki denklem birleştirilerek toplam dinamik modelin genel gösterimi ise aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$\mathbf{M}_{eq} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{N}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}) = \mathbf{H} \boldsymbol{\tau} \quad (4)$$

Burada;

$\mathbf{M}_{eq}{}_{3 \times 3} = \mathbf{H} \mathbf{I}_a \dot{\boldsymbol{\Omega}} + \mathbf{r}_d \begin{bmatrix} m_u \mathbf{I}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_u \end{bmatrix}$, $\mathbf{N}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}})_{3 \times 1} = \mathbf{H}(\mathbf{I}_a \ddot{\boldsymbol{\Omega}} + \mathbf{C} \dot{\boldsymbol{\Omega}}) \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{H} \boldsymbol{\tau}_f + \mathbf{r}_d \begin{bmatrix} -m_u \mathbf{g} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$, $\mathbf{X} = [x, y, \varphi]^T$ ve $\mathbf{g} = [0 \quad -9.81]^T$ dir. Deneylerde kullanılan düzlemsel KSPR'nin dinamik ve kinematik parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Kullanılan bütün tamburların yarıçapı eşit olduğundan \mathbf{r}_d matrisi yerine sayısal r_d değeri kullanılmıştır.

Tablo 1. KSPR Dinamik ve Kinematik Parametreleri

τ_f [Nm]	$0.045^* \mathbf{I}_4$	\underline{a} [mm]	683
I_a [kgm ²]	$0.000178^* \mathbf{I}_4$	\underline{b} [mm]	670
C [Nms]	$0.00055^* \mathbf{I}_4$	\underline{c} [mm]	143
I_u [kgm ²]	0.00178	\underline{d} [mm]	98
m_u [kg]	0.5	r_d [mm]	25

KONUM DENETİMİ

KSPR'nin konum denetimi için iki farklı yöntem kullanılmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler: (i) klasik bir PID denetçi ve (ii) sistem dinamiğinin geribesleme doğrusallaştırması ile denetim sürecine eklendiği bir PID denetçi (PID+GD)'dir. Bu denetçi tasarımları aşağıdaki kısımlarda açıklanmaktadır.

Klasik PID Denetçi Tasarımı

PID denetim yöntemi ile denetim için tasarlanan denetçinin yapısı oran, türev ve integral kazanç parametreleri ile aşağıdaki eşitlikteki gibi verilebilir.

$$\mathbf{u} = \mathbf{H}\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_i \int \mathbf{e} dt + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} \quad (5)$$

Burada $\mathbf{H}\boldsymbol{\tau}$ vektörü KSPR için olay uzayında üretilen denetim girdisidir. İstenilen konum ile referans arasındaki hata ise,

$$\mathbf{e} = \mathbf{X}_{ref} - \mathbf{X} \quad (6)$$

olarak tanımlıdır. Burada \mathbf{X} robotun durum vektörünü, \mathbf{X}_{ref} ise referans vektörünü temsil etmektedir. Denetim girdisinin ($\mathbf{H}\boldsymbol{\tau}$) KSPR'ye uygulanmasında ise pozitif kablo kuvvetlerini sağlayan $\boldsymbol{\tau}$ değerlerinin bulunması için tork dağıtım algoritması kullanılmıştır.

Kullanılan algoritma aşağıdaki denklemler ile açıklanabilir. Temelde yapılan işlem $\mathbf{u} = \mathbf{H}\boldsymbol{\tau}$ denkleminin özel çözümüne bir miktar homojen çözüm ekleyerek bütün kablolar için gerilim değerlerinin pozitif olmasını sağlamaktır. Ele alınan KSPR için denetimde kullanılan tork değerleri aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{r}_d \mathbf{T} = \mathbf{H}^\dagger \mathbf{u} + \xi \mathbf{N}_0 = \begin{bmatrix} \tau_{p(1)} \\ \tau_{p(2)} \\ \tau_{p(3)} \\ \tau_{p(4)} \end{bmatrix} + \xi \begin{bmatrix} n_{0(1)} \\ n_{0(2)} \\ n_{0(3)} \\ n_{0(4)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Bu denklemde ξ değeri, özel çözüm ($\mathbf{H}^\dagger \mathbf{u} = [\tau_{p(1)} \dots \tau_{p(4)}]^T$) ile elde edilen girdi torklarından en küçük olanın değerini, homojen çözüm ($\xi \mathbf{N}_0 = \xi [n_{0(1)} \dots n_{0(4)}]^T$) ekleyerek belirli bir pozitif τ_{min} değerinde sabit tutmak için kullanılmaktadır. \mathbf{N}_0 vektörü \mathbf{H} yapı matrisinin boş uzayını temsil etmektedir. Denetim sürecinde ξ değeri, özel çözümde negatif olan her tork değeri için Denklem 8 kullanarak hesaplanmış ve ardından her denetim döngüsünde en büyük değere sahip olan ξ değeri sonuç olarak seçilmiştir.

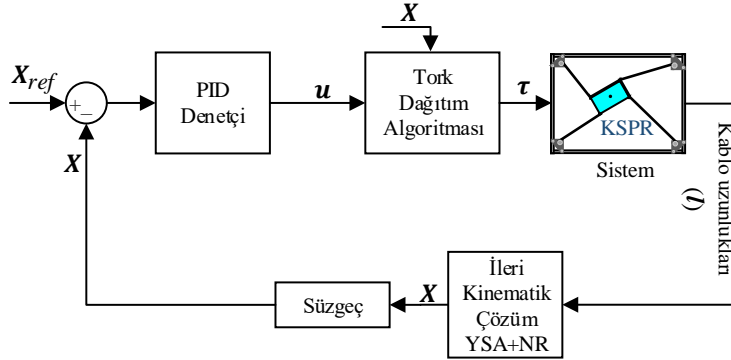
$$\xi_i = \frac{\tau_{min} - \tau_{p(i)}}{n_{0(i)}} \quad i = 1,2,3,4 \quad (8)$$

Bu hesaplama ile özel çözümün en küçük bileşeninin istenen tork τ_{min} değerine eşitlenmesi ve Denklem 7 kullanılarak diğer girdilerin uygun şekilde bulunması sağlanmıştır.

Denetim için üretilen girdi sistem modelinde yerine konulduğunda ise aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir.

$$\mathbf{M}_{eq} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{N}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}) = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_i \int \mathbf{e} dt + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} \quad (9)$$

Bu eşitlikte kapalı döngü dinamikleri, doğrusal olmayan terimler (N) içermektedir. Bu nedenle, sistem kararlılığının sağlanması PID denetçi parametrelerinin hassas bir şekilde seçilmesine bağlıdır. Deneylerde kullanılan denetçinin yapısı Şekil 2’de gösterilmektedir. Ayrıca, deneylerde geribesleme için algılayıcı gürültüsünün önüne geçmede 15 Hz kesme frekansına sahip ikinci dereceden bir Butterworth süzgeci kullanılmıştır.



Şekil 2. Klasik PID Denetçi Denetim Şeması

Geribesleme Doğrusallaştırması ile PID Denetçi Tasarımı (PID+GD)

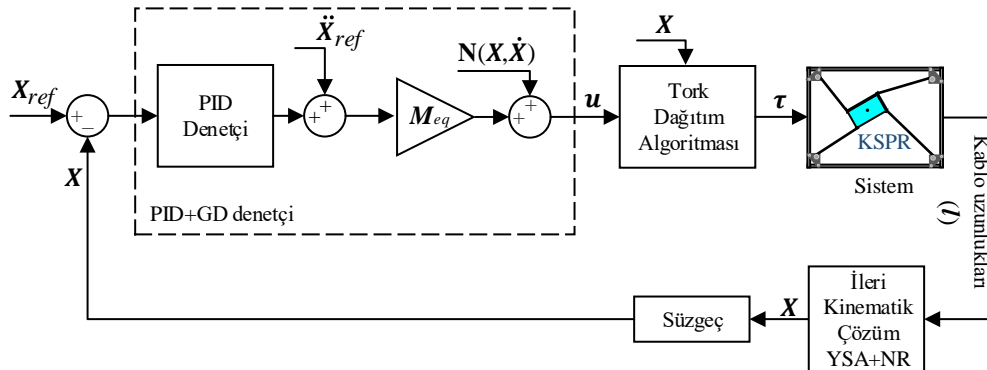
Bu kısımda, düzlemsel KSPR'nin konum denetimi için geribesleme doğrusallaştırması yapılarak ve PID denetçi kullanılarak denetim sağlanmıştır. Geribesleme doğrusallaştırması ile klasik PID kapalı döngü dinamik denkleminde bulunan doğrusal olmayan terimler elenmektedir. Bu durumda kapalı döngü dinamikleri için kararlılık sadece PID denetçi parametrelerinin seçimi ile kolayca sağlanmaktadır. Bu yöntem için, üretilen denetim girdisi aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$u = H\tau = M_{eq} \left(\ddot{X}_{ref} + K_p e + K_i \int e dt + K_d \dot{e} \right) + N(X, \dot{X}) \quad (10)$$

Bu denetim girdisinin sistem modelinde yerine konulması ile kapalı döngü dinamikleri aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\ddot{e} + K_p e + K_i \int e dt + K_d \dot{e} = 0 \quad (11)$$

Yukarıdaki eşitlikte görüldüğü üzere kapalı döngü dinamiklerinde doğrusal olmayan terimler gözükmemektedir. Böylece bu sistemin kararlılığı doğrusal sistemlerin kararlılığı teorisi kullanılarak PID parametrelerinin uygun seçimi ile sağlanabilir. Tasarlanan denetçinin yapısı Şekil 3’te verilmektedir. Tasarlanan PID denetçilerin kazanç parametreleri deneysel çalışmalarda deneme yanılma yöntemi ile elde edilmiştir ve Tablo 2’de verilmektedir.



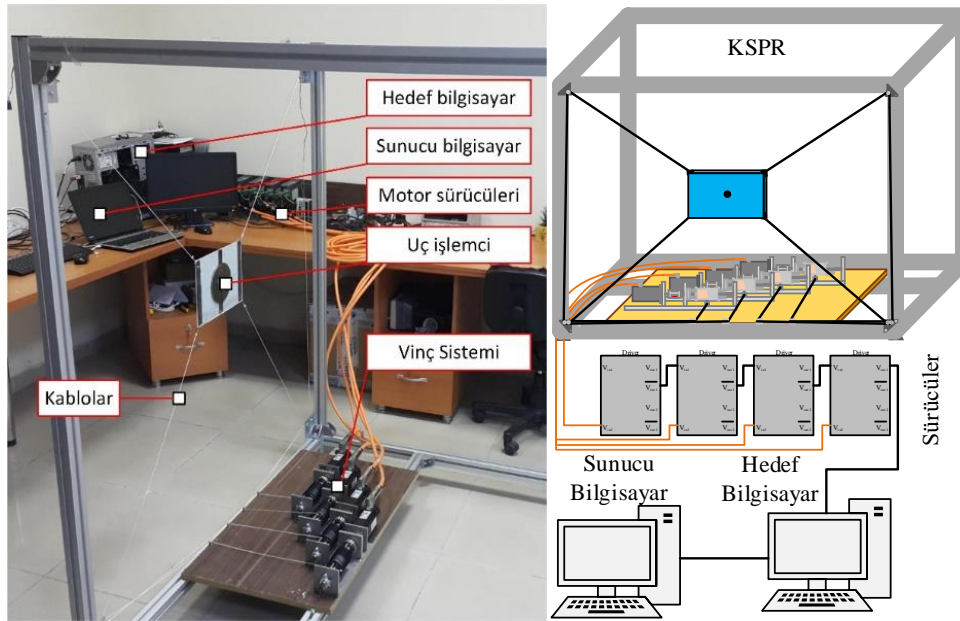
Şekil 3. PID+GD Denetçi Denetim Şeması

Tablo 2. PID ve PID+GD Denetçi parametreleri

PID		PID+GD		
K_p	diag (12.5, 12.5, 0.15)	diag (1000, 1000, 750)	τ_{maks} [Nm]	1.4
K_i	diag (375, 375, 1)	diag (10000, 5000, 7500)	τ_{min} [Nm]	0.12
K_d	diag (1.25, 1.25, 0.005)	diag (50, 50, 25)	h [s]	0.002

DENEYSSEL KURULUM

Deney düzeneği kurulumunda ilk olarak 4 adet vinç sisteminin tasarlanması ve üretimi yapılmıştır. Bu vinçler kabloların uzamasını ve kısalmasını sağlamaktadır. 1 mm çapında SK75 Dyneema ip kablo olarak kullanılmıştır. Kablolar yüksek çeki yüklerine dayanabilmektedir ve elastik uzaması aynı boyuttaki çelik kablodan düşüktür. Deney düzeneğinin bir resmi ve şematik gösterimi Şekil 4'te görülebilir. Tork denetimi yapabilen 4 adet Kollmorgen AKM24D servo motor ve Kollmorgen AKD P00306 NBCC-E000 motor sürücüleri vinçlerin tahriki için kullanılmıştır. Kurulan deney düzeneği gövdesi $45 \times 45 \text{ mm}^2$ alüminyum sigma profillerle oluşturulmuştur. Uç işlemci, zemine dik bir düzlemde kablo uzunluğunun vinçler ile değiştirilmesi sonucu hareket ettirilmektedir. Robotun denetimi için Matlab/Simulink Real-Time ortamı kullanılmıştır. Vinç ve makaraların viskoz sönümleme katsayısı C_i ve sürtünme torkları her bir sistem için deneysel olarak belirlenmiştir. Bu değer ve vinçlerdeki sabit sürtünme değeri τ_{fi} deneysel sistem için değişebildiğinden ortalama bir değer olarak kullanılmıştır.



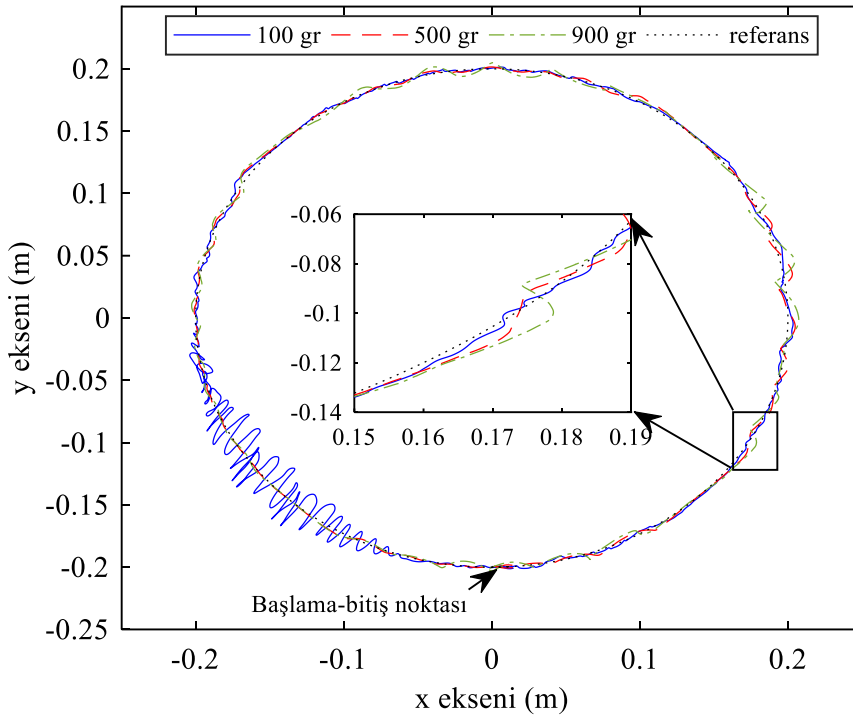
Şekil 4. Deney Düzeneği Resmi (Solda), Deney Düzeneği Şematiği (Sağda)

PID ve GD+PID Denetçiler ile Denetim Sonuçları

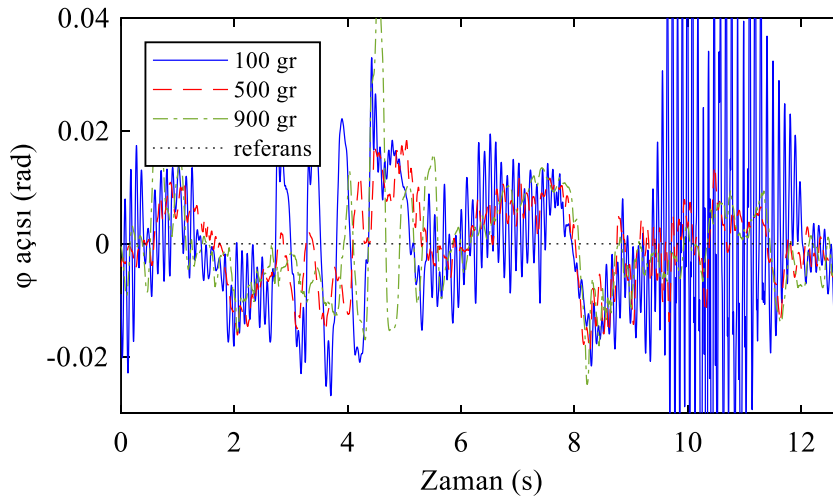
Deneylerde, önerilen denetleyicilerin başarımını test etmede uç işlemci dönme açısı (φ) için sabit ve $x - y$ eksenleri için sinüzoidal referans sinyalleri seçilmiştir. Bu referans sinyali $x-y$ düzleminde dairesel bir yörüngeye karşılık gelmektedir. Kullanılan referans sinyalleri x -ekseni için $x_d = 0.2\sin(0.5t)$ ve y -ekseni için $y_d = -0.2\cos(0.5t)$ olarak seçilmiştir. Düzlemde dönme açısı için referans sinyali ise $\varphi_d = 0$ rad olarak seçilmiştir. Bu sinyallerin seçimi ile birlikte uç işlemci düzlemde dairesel hareket yaparken aynı zamanda yönelimini koruması amaçlanmıştır. Uç işlemcinin kütlesi 500 gramdır ve denetçiler deneysel olarak bu kütle değeri için tasarlanmıştır. Ardından bu denetçiler uç işlemci kütlesinin 100 ve 900 gram olduğu durumlarda test edilmiştir. Bu çalışmalarla, tasarlanan denetçilerin model belirsizlikleri altındaki başarımının incelenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, düzlemde dairesel referansın takibinde farklı kütleler için PID denetçinin cevapları Şekil 5'te verilmiştir. Tüm denetim eksenleri için zaman cevapları ise Şekil 6'da görülmektedir.

Şekil 5'te görüldüğü üzere farklı uç işlemci kütleleri için farklı denetim sonuçları meydana gelmektedir. Uç işlemci kütlesinin 100 gram olduğu durumda yörünge üzerindeki bazı noktalarda denetim süreci salınımlı bir şekilde

ilerlemektedir. Bu durum doğrusal olmayan etkilerin denetçi başarımına etkisi veya belirsiz etkilerin yörüngedeki bazı noktalarda artması sonucu meydana gelmiş olabilir. Uç işlemci kütlelerinin 900 gram olması durumunda denetimde yüksek salınımların meydana gelmemesine karşın denetim başarımının 500 gram uç işlemci kütleli duruma göre daha düşük olduğu gözükmemektedir. φ açısı denetiminde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar değerlendirilirse, PID denetçinin tek başına sistemdeki belirsizliklere karşı oldukça dayanıksız olduğunu ve denetçi parametreleri seçiminin sistem başarımında ve kararlılığında oldukça yüksek bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Kararlılığın geniş ölçekte sağlanabilmesi için doğrusal olmayan sistem modeli kullanılarak PID+GD denetçi, yine aynı referans sinyalinin takibi için uygulanmıştır. Bu denetçi için kütle değişimi etkisi altındaki düzlemde denetim cevabı Şekil 7'de verilmektedir.



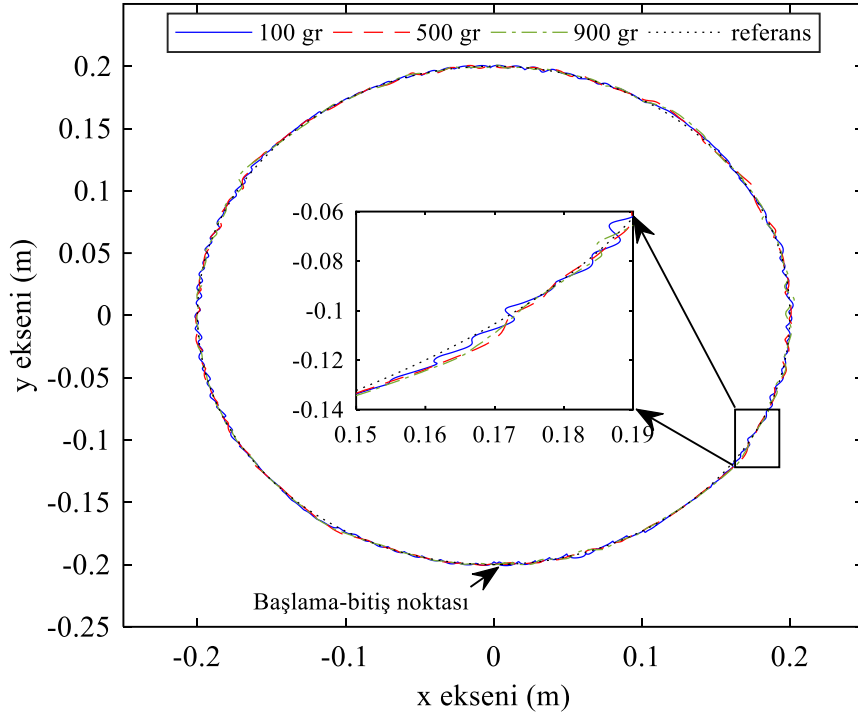
Şekil 5. PID Denetçi ile Düzlemde Dairesel Yörünge Takip Cevabı



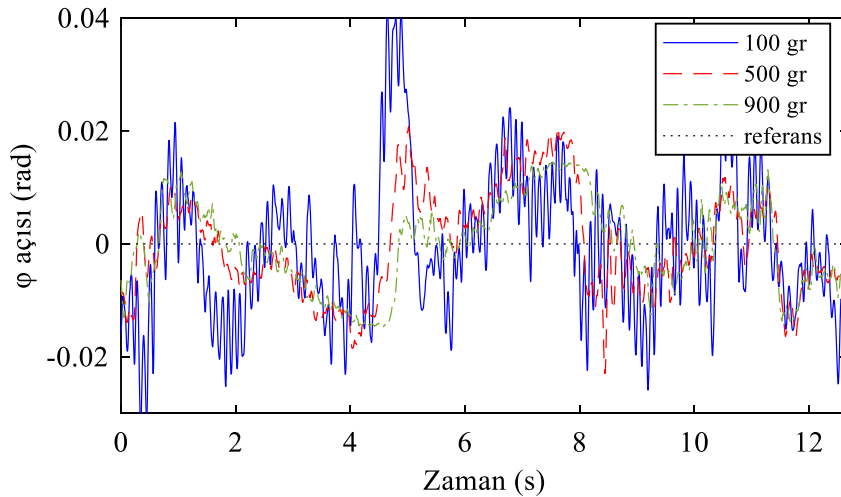
Şekil 6. PID Denetçi ile, φ Açısı Denetim Cevabı

Şekil 7'de verilen cevaplar PID denetim ile karşılaştırıldığında, PID denetimdeki yüksek salımlı cevaplar PID+GD denetçi kullanılması durumunda gözükmemektedir. Her bir kütle durumu için denetimde kararsızlığa neden olabilecek bir cevap görülmediği gibi denetim başarımı da küçük farklılıklarla korunmuştur. Bu farklılıkların ilki, kütlelerin 100 gram olması durumunda diğer kütlelere göre daha salımlı bir denetim cevabı elde edilmesi olarak verilebilir. Geribesleme doğrusallaştırması tekniği ile 500 gram ağırlığında bir kütle için üretilen denetim girdisinin deneylerde daha düşük kütleli bir sistemi denetlemesi bu etkinin başlıca nedenlerindedir. Daha açık olarak

üretilen yüksek kütle için üretilen denetim girdisi düşük kütle için daha hızlı hareket ederek salınım yapmasına neden olmaktadır. Kütle artırılması durumunda ise denetim başarımı bir miktar azalmaktadır. Fakat bu miktar sadece PID denetçi kullanılması durumuna göre oldukça azdır. Geribesleme doğrusallaştırması ile denetim kararlılığı ve belirsizliklere karşı dayanıklılık iyileştirilmiştir. PID+GD denetçi başarımının kütle değişiminden düşük oranda etkilenmesi durumu φ açısı için Şekil 8'de daha net olarak gözükmemektedir. Bu şekillerin verilere dökülmesi için Tablo 3'te düzlemde dairesel yörünge takibi için hesaplanan kök ortalama kare hataları (RMSE) verilmektedir. Deneyler esnasında üretilen denetim girdilerinin ortalama büyüklüğünün sunulması için ise kök ortalama kare (RMS) değeri cinsinden hesaplama yapılmış ve tabloya eklenmiştir.



Şekil 7. PID+GD Denetçi ile Düzlemde Dairesel Yörünge Takip Cevabı



Şekil 8. PID+GD Denetçi ile φ Açısı Denetim Cevabı

Genel olarak PID+GD denetçi başarımı sadece PID denetçinin düzlemdeki başarımından ortalama %40 daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Bu oran, denetçinin tasarlandığı 500 gram kütle değeri için ise %25 civarındadır. Diğer kütle değerlerinde ise PID+GD denetçi daha yüksek oranlar ile üstündür. Bu durum büyük oranda PID+GD denetçinin sağladığı geniş kararlılık bölgesinden dolayı ortaya çıkmaktadır. PID denetçinin RMSE değerlerine bakıldığında kütle değişiminde yüksek denetim başarımı farklılıklarına ulaşıldığı çıkarılabilir. En yüksek PID denetçi başarımı 500 gram kütle için elde edilmiştir. Fakat, kütle artırıldığında ve azaltıldığında %100'e yakın hata meydana gelmiştir. Dönme açısı için hata, kütle artımı ile %25 civarına yükselmiştir. PID+GD denetçinin düzlemdeki başarımı ise kütle

azalması ile dikkate değer ölçüde değişmemiştir. Fakat artırıldığı zaman başarımda yaklaşık %7'lik bir azalma gerçekleşmiştir. Bu denetçi ile kütle arttıkça φ eksenini için hata değerlerinin azaldığı gözükmemektedir. Bu durum, KSPR'nin geometrik özellikleri nedeni ile φ açısının denetim girdisinden en çok etkilenen eksen olmasından kaynaklanmaktadır. Deneylerde bozucu etkilerin φ eksenini üzerinde etkisinin fazla olması nedeni ile RMSE değeri açısından farklı sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Denetimde uygulanan ortalama tork değeri ise PID+GD denetçi için beklenildiği gibi kütle arttıkça artmaktadır Fakat PID denetçide 100 gram için elde edilen ortalama tork değerleri yüksektir. Buda denetim sürecinde meydana gelen salınımların denetim için gereken girdi torkunu artırdığını göstermektedir. Genel olarak denetçiler arasında yüksek bir girdi tork değeri farkı görülmemiştir.

Tablo 3. Tasarlanan PID Denetçilerin Dairesel Yörünge Takibinde Deneysel Kök Ortalama Kare Hataları Değeri ve Girdi Torkları İçin Kök Ortalama Kare Değeri

Kütle (gr)	Eksen	PID+GD RMSE (m)*10 ⁻⁴	PID RMSE (m)*10 ⁻⁴	PID+GD Tork RMS (Nm)	PID Tork RMS (Nm)
100	x	15	29	0,3105	0,4732
	y	14	38		
	φ	123	166		
500	x	15	20	0,4597	0,4136
	y	15	21		
	φ	92	74		
900	x	17	39	0,6894	0,5886
	y	16	37		
	φ	80	93		

SONUÇLAR

Bu çalışma ile birlikte geribesleme doğrusallaştırması tekniğinin denetim başarımına etkilerinin bir KSPR üzerinde deneysel olarak incelemesi sunulmuştur. Denetim için geribesleme doğrusallaştırmasının kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için PID denetçiler tasarlanmış ve düzlemsel KSPR üzerinde uygulanmıştır. Sadece PID denetçi ile denetimin sağlanması durumunda kararlılığın garanti edilemediği hem teorik hem de deneysel olarak gösterilmiştir. Sistem belirsizlikleri için geniş bir kararlılık bölgesi sağlamanın PID denetçi parametrelerinin iyi ayarlanmasına bağlı olduğu ve bu nedenle bozucu etkilerin daha etkin giderilmesinde agresif bir denetçi veya ani salınımları engellemek için yumuşak bir denetçi tasarlanmasının kararsızlığa neden olabileceği sonucuna varılmıştır. Geribesleme doğrusallaştırılması tekniği kullanıldığında sistem dinamikleri geri beslenmiş ve yörünge takibinde denetim PID denetçi ile sağlanmıştır. Doğrusal olmayan model etkilerinin geribesleme ile giderilmesi sonucu PID denetçi başarımı, yörünge takibi ve bozucu etkilerin elenmesinde önemli oranda artırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ile geribesleme doğrusallaştırmasının düzlemsel KSPR denetimi üzerindeki etkisi, bozucu ve doğrusal olmayan etkiler altında başarılı sonuçlar verdiği ve ortaya çıkabilecek denetim başarımı azalmasının nedenleri ortaya konmuştur.

KSPR denetiminde sadece PID denetçi kullanmanın pratik bir sonuç olacağı fakat meydana gelebilecek kararsızlık problemlerine bir çözüm bulmanın zor olacağı söylenilebilir. Bu durumda, denetimde geribesleme doğrusallaştırması tekniğinin kullanılması KSPR'ler için önerilmektedir. Bunun yanında, PID denetçi yerine farklı denetim yöntemleri kullanılarak denetim başarımı da artırılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince FBA-2018-7415 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Destekleri için Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Alp, A. B., & Agrawal, S. K. (2002). Cable suspended robots: Feedback controllers with positive inputs. *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No. CH37301)*, 1, 815–820.
- Bak, J.-H., Yoon, J. H., Hwang, S. W., & Park, J. H. (2016). Sliding-mode control of cable-driven parallel robots with elastic cables. *2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 1057–1060.
- Gosselin, C. (2014). Cable-driven parallel mechanisms: state of the art and perspectives. *Mechanical Engineering Reviews*, 1(1), DSM0004--DSM0004.
- Khosravi, M. A., & Taghirad, H. D. (2014). Robust PID control of fully-constrained cable driven parallel robots. *Mechatronics*, 24(2), 87–97.
- Korayem, M. H., Tourajizadeh, H., Jalali, M., & Omid, E. (2012). Optimal path planning of spatial cable robot using optimal sliding mode control. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9(5), 168.
- Oh, S.-R., & Agrawal, S. K. (2004). Nonlinear sliding mode control and feasible workspace analysis for a cable suspended robot with input constraints and disturbances. *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, 5, 4631–4636.
- Parikh, P. J., & Lam, S. S. Y. (2005). A hybrid strategy to solve the forward kinematics problem in parallel manipulators. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(1), 18–25.
- Sancak, C. (2022). *Kablo ile sürülen paralel bir robotun tahmin ve öğrenme temelli yöntemler ile konum ve düzlem dışı titreşim denetimi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.
- Sancak, C., & Itik, M. (2022). Out-of-plane Vibration Suppression and Position Control of a Planar Cable-driven Robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 27(3), 1311–1320. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3089588>
- Sancak, C., Itik, M., & Nguyen, T. T. (2023). Position Control of a Fully Constrained Planar Cable-Driven Parallel Robot With Unknown or Partially Known Dynamics. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 28(3), 1605-1615 doi: 10.1109/TMECH.2022.3228444.
- Sancak, C., Yamac, F., & Itik, M. (2022). Position control of a planar cable-driven parallel robot using reinforcement learning. *Robotica*, 40(10), 3378–3395.
- Sancak, C., Yamaç, F., & İtik, M. (2019). Kablo ile sürülen düzlemsel paralel bir robotun ileri kinematik çözümü ve kontrolü. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(Özel Sayı), 862–874. <https://doi.org/10.36306/konjes.622283>
- Williams, R. L., Gallina, P., & Vadia, J. (2003). Planar translational cable-direct-driven robots. *Journal of Robotic Systems*, 20(3), 107–120.
- Yanai, N., Yamamoto, M., & Mohri, A. (2002). Anti-sway control for wire-suspended mechanism based on dynamics compensation. *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292)*, 4, 4287–4292.