



Evaluation of position tracking control performance of a variable stiffness ankle exoskeleton robot with various controller types

Ergin Kılıç*^{ID}, Bahri Şekerci^{ID}, Hasbi Kızıllan^{ID}, Özgür Başer^{ID}

Department of Mechanical Engineering, Suleyman Demirel University, Isparta, 32260, Turkey

Highlights:

- Hybrid Fuzzy PD+PID controller
- Ankle exoskeleton robot driven by variable stiffness actuator
- Position tracking control with disturbance

Keywords:

- Ankle exoskeleton robot
- Variable stiffness actuator
- Hybrid Fuzzy PD+PID controller
- Position tracking control
- Position tracking control with disturbance

Graphical/Tabular Abstract

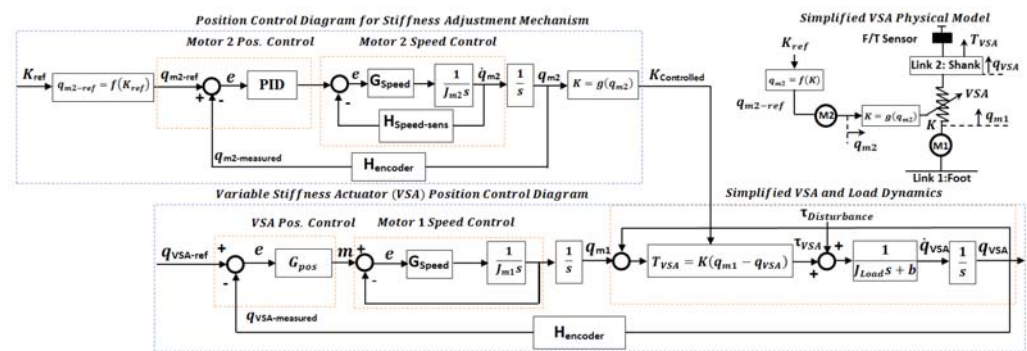


Figure A. Position control block diagram of VS-AnkleExo

Purpose: The purpose of this study is to experimentally evaluate the position control performance and sensitivity to external disturbances of created hybrid controllers on VS-AnkleExo.

Theory and Methods:

Hybrid controllers were created by combining different types of fuzzy logic theory and classical Proportional Integral Derivative (PID) in the study. The controllers are PID, Fuzzy PD, Fuzzy PD+I, Fuzzy PD+PID and ZTS (Z, T and S type membership functions) Fuzzy PD. Then, These controllers were tested in VS-AnkleExo's position tracking experiments. In the position tracking studies, the experiments were first performed for different references such as step and sine inputs without disturbances. Furthermore, in the course of position tracking studies, one more experiment was carried out with real human wrist joint position data using the most successful Fuzzy PD+PID controller. In the continuation of the study, the experiments of step and sine inputs response with disturbances were carried out to test the sensitivity of the proposed controllers against the disturbing forces.

Results:

The test results showed that the Fuzzy PD+PID controller could reduce position tracking errors more effectively than other controllers and was more robust against externally applied disturbances. Furthermore, the test results using walking data show that the robot can follow the walking data properly with the fuzzy PD+PID control.

Conclusion:

According to the study, when compared with the conventional PID controller and the other controllers, the proposed Fuzzy PD+PID controller can effectively reduce trajectory tracking errors and achieve favorable control performance. Besides, it is robust with regard to external disturbances.

Article Info:

Research Article
Received: 01.02.2019
Accepted: 26.02.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.520680

Acknowledgement:

This work was supported by TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) (Project number: 213M297)

Correspondence:

Author: Ergin Kılıç
e-mail: erginkilic@sdu.edu.tr
phone: +90 246 211 1252



Sertliği değiştirilebilir bir ayak bileği dış iskelet robotun çeşitli kontrolcüler ile pozisyon takibi kontrol performansının değerlendirilmesi

Ergin Kılıç*^{ID}, Bahri Şekerci^{ID}, Hasbi Kızıllan^{ID}, Özgür Başer^{ID}

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Karma Bulanık PD+PID kontrolcü
- Bozucu altında pozisyon takibi kontrolü
- Sertliği değiştirilebilir eyleyici ile tahrik edilen ayak bileği dış iskelet robotu

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 01.02.2019

Kabul: 26.02.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.520680

Anahtar Kelimeler:

Ayak bileği dış iskelet robot, sertliği değiştirilebilir eyleyici, karma bulanık pd+pid kontrolcü, pozisyon takibi kontrolü, bozucu altında pozisyon takibi kontrolü

ÖZET

Ayak bileği kas-iskelet sistemi yürüme esnasında sürekli olarak eklem sertliğini değiştirmektedir. Bu biyomekanik davranıştan esinlenerek, VS-AnkleExo isimli değişken sertliğe sahip bir eyleyiciyle tahrik edilen ayak bileği dış iskelet robot tasarımı ortaya koyulmuştur. Sertliği değiştirilebilir bir bilek eklemi tasarımıyla esnek, güvenli ve biyomimetik bir hareket kabiliyeti sağlamasına karşın dış etkiler altında kararlı ve hassas pozisyon takibinin zorluğu bu tür yumuşak eyleyicilerin en büyük problemidir. Bu makalede, VS-AnkleExo üzerinde geleneksel Oransal İntegral Türev (Proportional Derivative Integral-PID) kontrol yönteminin ve bulanık mantık teorisinin farklı tiplerde kombine edilmesi ile oluşturulan karma kontrolcülerin pozisyon takip performansı ve dış bozuculara karşı duyarlılıkları deneysel olarak değerlendirilmiştir. VS-AnkleExo rehabilitasyon ve yürüme yardımı gibi uygulamalar için kullanılacaktır. Bu uygulamalarda ise genellikle pozisyon takibine dayanan tekrarlı hareket egzersizleri kullanılmaktadır. Bu kapsamda, çalışmada ilk olarak bozucu etkiler olmadan farklı referanslar için geleneksel PID, Bulanık PD, Bulanık PD+I, Bulanık PD+PID ve ZTS (Z, T ve S tip üyelik fonksiyonlu) Bulanık PD kontrolcülerin pozisyon takip performansı değerlendirilmiştir. Çalışmanın devamında ise, bozucu kuvvetler karşısında önerilen kontrolcülerin duyarlılığını test etmek için bozuculu basamak ve sinüs eğrisi cevap deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçları, diğer kontrolcülere göre Bulanık PD+PID kontrolcünün pozisyon izleme hatalarını daha etkili azaltabildiğini ve dışarıdan uygulanan bozuculara karşı daha sağlam olduğunu göstermiştir.

Evaluation of position tracking control performance of a variable stiffness ankle exoskeleton robot with various controller types

H I G H L I G H T S

- Hybrid Fuzzy PD+PID controller
- Ankle exoskeleton robot driven by variable stiffness actuator
- Position tracking control with disturbance

Article Info

Research Article

Received: 01.02.2019

Accepted: 26.02.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.520680

Keywords:

Ankle exoskeleton robot, variable stiffness actuator, hybrid fuzzy pd+pid controller, position tracking control and position tracking control with disturbance

ABSTRACT

The ankle musculoskeletal system continuously changes the joint stiffness during walking. Inspired by this biomechanical behavior, a variable stiffness ankle exoskeleton robot called as VS-AnkleExo was introduced. Although a variable stiffness ankle joint design provides a flexible, safe and biomimetic, the difficulty of stable and precise position tracking under external disturbances is the biggest problem of such soft actuators. In this paper, the position control performance and sensitivity to external disturbances of hybrid controllers created by combining different types of fuzzy logic theory and classical Proportional Integral Derivative (PID) control method implemented on VS-AnkleExo were evaluated experimentally. VS-AnkleExo will be used for applications such as rehabilitation and walking assistance. In this study, firstly, PID, Fuzzy PD, Fuzzy PD+I, Fuzzy PD+PID and ZTS (Z, T and S type membership functions) Fuzzy PD controllers position tracking performances were evaluated for different references without disturbances. In the continuation of the study, the experiments of step and sine inputs response with disturbances were carried out to test the sensitivity of the proposed controllers against the disturbing forces. The test results showed that the Fuzzy PD+PID controller could reduce position tracking errors more effectively than other controllers and was more robust against externally applied disturbances.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: erginkilic@sdu.edu.tr / Tel: +90 246 211 1252

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dış iskelet robotlar insan uzuvları ile etkileşim halinde çalışan giyilebilir cihazlardır. Bu robotlar sağlıklı kişilerin eklem performanslarını iyileştirme [1] ve felçli hastaların rehabilitasyonu [2-4] uygulamalarında kullanılmaktadır. Klasik robot eklemlerinde hassas pozisyon takibi için genellikle sert eyleyiciler (elektrik motorları) tercih edilmektedir. Fakat dış iskelet robotlar insan uzuvları ile etkileşim halinde çalıştığı için klasik pozisyonlama hassasiyeti sağlayan elektrik motorların kullanımı kullanıcı güvenliği için uygun değildir [5]. İnsan vücudu eklemleri bozucu etkiler karşısında esnek bir hareket kabiliyeti göstermektedir. İnsan alt uzuv eklemleri sertliğinin anlık olarak değişiklik göstermesi ise yürüme sırasında bozucu etkilerin emilmesi, esneklik, kararlılık ve enerji verimliliği açısından önemli bir rol oynamaktadır [6]. Bu bağlamda, son zamanlarda, yay gibi elastik eleman kullanan farklı yumuşak eyleyici tasarımları geliştirilmekte ve bunlar dış iskelet robotların farklı eklemlerine adapte edilmektedir. Bu kapsamda, yumuşak eyleyicilerin ilk örneği olan seri elastik eyleyiciler (SEE) bu robotların eklemlerini tahrik etmek için kullanılmıştır [7-9]. Bu eyleyicilerin haricinde, hareket esnasında sertlik değişimine izin verebilen sertliği değiştirilebilir eyleyiciler (SDE) hareket birimi olarak dış iskelet robot eklemlerinde uygulanmaya başlamıştır. Kontrol edilebilir iletim oranı prensibine bağlı tasarlanan ARES [10] isimli sertliği değiştirilebilir bir eyleyici, ATLAS dış iskelet robotunun diz eklemi olarak düşünülmüştür [11]. Zhu vd. [12] hareket esnasında yük taşıyan bir diz eklemi dış iskelet robotu için aynı sertlik ayarlamaya dayanan bir SDE'yi hareket birimi olarak uygulamışlardır. Literatürdeki diğer SDE tasarımları, MACCEPA 2.0 [13], AwAS-II [14], MeRIA [15], SVSA-II [16], CompAct-VSA [17], PLVL-VSA [18], VS-Joint [19] isimli tasarımlardır. Bütün bunları haricinde Başer ve Kızıllan tarafından ayak bileği eklemi

için tasarlanmış olan VS-AnkleExo [20] isimli bir SDE eklem tasarımı daha bulunmaktadır. Görüldüğü gibi, farklı yumuşak eyleyici tasarımları dış iskelet robot eklemlerinde kullanılmakta olup, özelliklerine ulaşılabilen literatürdeki sertliği değiştirilebilir eyleyicilerin karşılaştırması Tablo 1'de verilmiştir.

Yumuşak eyleyicilerin pozisyon kontrolünde farklı kontrol yöntemleri kullanılabilir. Bu yöntemlerden, basitliği nedeni ile en çok tercih edileni, Oransal İntegral Türev (Proportional Derivative Integral – PID) kontrol yöntemidir [21-23]. PID kontrolcülerin P, I ve D parametrelerinin belirlenmesi için eğer zaman düzleminde (time domain) kontrol sistemi tasarımı yapılacak ise sistemin karmaşık köklerinin kararlılığı sağlayacak şekilde yer-kök eğrisi grafiklerinden faydalanılması ya da frekans düzleminde (frequency domain) çalışılacak ise incelenen sistemin kazanç ve faz payları dikkate alınarak analiz yapılması gerekmektedir [24, 25]. Fakat tüm bu analitik hesaplamaların yapılabilmesi için üzerinde çalışılan sistemin matematiksel modelinin yüksek doğrulukta oluşturulması gerekmektedir. Zhang vd. [26] diz ve kalça dış iskelet robotunu tahrik eden SEE'ler üzerinde PD kontrolcü kullanarak bir pozisyon kontrolü çalışması gerçekleştirmiştir. Klasik kontrol yönteminden farklı olarak, sistem davranışını etkileyen bozucu girişlere karşı yumuşak eyleyicilerde gürbüz kontrol yöntemlerinin kullanılması uygun bir çözüm olarak görülmektedir. Madani vd. [27] rehabilitasyon amacıyla kullanılan aktif bir diz ortezi üzerinde kayan kipli kontrol tekniği kullanmıştır. Bu robotlar ile planlı ve belirli bir rehabilitasyon uygulaması gerçekleştirebilmek için kayan kipli kontrol ve pasif tabanlı gürbüz kontrolü birlikte kullanan karma kontrolcü tasarımları da literatürde mevcuttur [28]. Liu vd. [15] bir mekanik empedans eyleyicisi (MeRIA) üzerinde kararlı ve güvenli bir hareket sağlamak için pozisyon-hız-tork kontrol döngülerini iç içe

Tablo 1. Sertliği değiştirilebilir eyleyicilerin karşılaştırması (Comparison of variable stiffness actuators)

Eyleyici	Ağırlık (kg)	Maksimum Tork (Nm)	Sertlik Aralığı (Nm/rad)	Hareket Aralığı (Derece)	Sertlik Ayarlama Tipi	Uygulama
ARES [10]	0,9 kg	76	287-1804	± 10	Değişen iletim oranı	Diz
UVSHA [12]	-	150	80-1250	± 50	Değişen iletim oranı	Diz
MACCEPA 2.0 [13]	2,4	70	285-6270	± 150	Mekanik düzenleme	Diz
AwAS-II [14]	1,1	80	0 – ∞	± 17	Değişen iletim oranı	Diz
MeRIA [15]	3,1	20	376-715	± 15	Yapısal Değişiklik	-
SVSA-II [16]	1,65	60	0 – ∞	± 180	Değişen iletim oranı	-
CompAct-VSA [17]	1,8	117	0 – ∞	± 20	Değişen iletim oranı	-
PLVL-VSA [18]	1,9	22,5	0-49	± 20	Değişen iletim oranı ve mekanik düzenleme	-
VS-Joint [19]	2	160	0-18048	± 14	Mekanik düzenleme	Kol Eklemi
VS-AnkleExo [20]	3*	100	100-1100	+ 50 / -30	Değişen iletim oranı	Ayak bileği

*VS-AnkleExo robotun diğer tasarımlara göre ağır olmasının sebebi robotun ayak bileği eklemine bağlı olan ayak ve bacak kısmını tasarımı barındırıyor olmasından kaynaklanmaktadır.

kullanarak gürbüz bir kontrolcü tasarlamıştır. Sertliği değiştirilebilir eyleyicilerin karmaşık yapısı giriş ve çıkış arasındaki matematiksel modelin tam olarak oluşturulmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, sertliği değiştirilebilir eyleyicilerin kontrolünde, matematiksel modele ihtiyaç duymayan kontrol yöntemleri daha etkili olabilmektedir. Guo vd. [29] SDE'lerin sistem belirsizlikleri ile başa çıkabilmek için geri beslemeli doğrusallaştırma prensibine dayanan sinir ağ-tabanlı adaptif bir kontrolcü önermişlerdir. Bunlardan farklı olarak, eklemlerinde sert eyleyicilerin kullanıldığı bir dış iskelet robotta PID ve bulanık kontrol mantığını birleştiren adaptif bir kontrolcünün kullanıldığı bir uygulama da yine literatürde mevcuttur [30]. Ancak, PID ve bulanık kontrol mantığını birleştiren bu çalışma sert eyleyiciler ile tahrik edilen bir dış iskelet robotun pozisyon kontrolü ile sınırlı kalmıştır.

VS-AnkleExo gibi sertliği değiştirilebilir eklem robotları insan-robot uygulamalarında esnek, güvenli ve biyomimetik bir hareket kabiliyeti sağlamasına karşın özellikle dış kuvvetler altında kararlı pozisyon takibinin zorluğu bu robotların uygulamasındaki en büyük problemdir. Bu çalışmada, VS-AnkleExo isimli ayarlanabilir sertliğe sahip yumuşak eyleyici ile tahrik edilen giyilebilir bir ayak bileği dış iskelet robotunun pozisyon kontrol performansı farklı kontrolcüler kullanılarak araştırılmıştır. VS-AnkleExo rehabilitasyon ve yürüme yardım uygulamalarında kullanılması düşünülmektedir. Bu uygulamalar için, tekrarlı hareket egzersizleri gerekmektedir. Tekrarlı hareket egzersizleri ise pozisyon takip kontrolü yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda, robotun pozisyon takip performansını göstermek için insan yürüme çevriminin basma fazı düşünülerek bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Bu deney düzeneği üzerinde Bulanık PD, Bulanık PD+I, Bulanık PD+PID ve ZTS Bulanık PD gibi karma kontrolcüler uygulanarak, farklı sertlik değerleri (düşük, orta ve yüksek) için robotun bozucusuz pozisyon kontrol deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kontrolcülerin yapısı, Khosla vd. [31] tarafından doğrusal olmayan sistemler için önerilen bulanık kontrol mantığına dayanmaktadır. Ayrıca, VS-AnkleExo'nun yürüebilme kabiliyetini gösterebilmek için, önceki deneylerde en iyi performansı sergileyen Bulanık PD+PID kontrolcü ile gerçek insana ait yürüme verileri kullanılarak değişken bilek sertliği uygulaması altında bir pozisyon kontrol çalışması daha gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın devamında, dışarıdan uygulanan bozucu kuvvetler karşısında önerilen karma kontrolcülerin performansını analiz etmek için aynı deney düzeneği kullanılarak eyleyicinin farklı sertlik değerleri için bozuculu basamak ve sinüs eğrisi cevap deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Bütün bu çalışmalar ile VS-AnkleExo gibi sertliği değiştirilebilir eyleyiciler için en uygun kontrolcünün Bulanık PD+PID kontrolcü olabileceğine karar verilmiştir. Bu da sunulan bu makalenin özgün yönünü ortaya koymaktadır.

Makalenin devamında ilk olarak VS-AnkleExo isimli ayarlanabilir sertliğe sahip yumuşak eyleyici ile tahrik edilen ayak bileği dış iskelet robotunun mekanik tasarımından

kısaca bahsedilmiştir. Devamında, çalışmada kullanılan kontrolcü yapıları açıklandıktan sonra deney düzeneği anlatılmış, gerçekleştirilen deneylerin sonuçları ve tartışmaları sunulmuştur. Son olarak da bu araştırmanın sonuçları gelecek çalışmalar ile birlikte irdelenmiştir.

2. SERTLİĞİ DEĞİŞTİRİLEBİR AYAK BİLEĞİ DİŞ İSKELET ROBOTUNUN MEKANİK TASARIMI (MECHANICAL DESIGN of VARIABLE STIFFNESS ANKLE EXOSKELETON ROBOT)

İnsan-robot uyumu için dış iskelet robot tasarımlarında insan alt uzuv eklemlerinin biyomekanik işleyişinin taklit edilmesi beklenmektedir. Bu nedenle insan alt uzuv eklemlerinin biyolojik davranışlarını anlamak dış iskelet robot tasarımlarında önem arz etmektedir. Yürüme çevrimi esnasında eklemlerin biyomekanik davranışını anlamak için Shamaei vd. [32] tarafından gerçekleştirilmiş olan biyomekanik çalışma incelenmiştir. Bu çalışmaya göre, ayak bileği kas iskelet sistemi yürüme çevriminin basma fazı boyunca eklem sertliğini farklı değerlere ayarlamaktadır. Buna göre, insan bilek eklemi ile uyumlu bir ayak bileği dış iskelet robot tasarımı gerçekleştirebilmek için yürüme çevrimi esnasında robotun eklem sertliğinin de sürekli değiştirilmesi gerekmektedir.

İnsan ayak bileği eklemine biyomekanik işleyişinden esinlenilerek, VS-AnkleExo isimli ayarlanabilir sertliğe sahip yumuşak bir eyleyici ile tahrik edilen giyilebilir bir ayak bileği dış iskelet robotun tasarım ve ön test çalışmaları başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir [20]. Şekil 1 söz konusu bu robotun CAD modelini ve hareket birimi olan eyleyici kinematığının şematik resmini göstermektedir. Eyleyicinin sertlik ayarlama prensibi hareket kolu yardımıyla değişen iletim oranı mekanizmasına dayanmaktadır. Bu yüzden, bu eyleyici kontrol edilebilir iletim oranı ile sertliği değiştirilebilir bir eyleyici olarak sınıflandırılmaktadır. Eyleyici tasarımında, yayların bağlantı noktası ve dönme noktası sabit kalırken, yük uygulama noktasının pozisyonu değişmektedir. Eyleyici sertliği, çıkış bağlantısı ve yay arasındaki iletim oranı değiştirilerek ayarlanmaktadır.

Şekil 1'de görüldüğü gibi, x_1 ve x_2 sırasıyla, bütün mekanizmanın denge pozisyonunun ayarlanması için birinci motor ($M1$) tarafından kontrol edilen giriş pozisyonunu ve ayak bileği sertliğinin ayarlanması için ikinci motor ($M2$) tarafından kontrol edilen kuvvet kolu bağlantısının pozisyonunu göstermektedir. Eş. 1 bilek ekleminde istenilen bir sertlik değerine göre ikinci motor tarafından ayarlanan kuvvet kolu mesafesini hesaplamak için kullanılmaktadır. Eş. 1'de θ_{bilek} , $K_{\theta_{bilek}}$ ve K ifadeleri sırasıyla ayak bileği açısını, ayak bileğinin yürüme esnasında istenen eklem sertliğini ve mekanik yay sabitini göstermektedir. Ayrıca a ve L mekanizmanın geometrik kısıt uzunluklarını göstermektedir. VS-AnkleExo isimli sertliği değiştirilebilir ayak bileği dış iskelet robotunun kinematik hesaplamaları, gerekli motor gücü hesaplamaları ve motor seçimleri [33]'te sunulmuştur.

$$x_2 = \frac{(a+L)L}{L + \cos(\theta_{bilek}) \sqrt{\frac{K_{\theta bilek}}{2K}}} \quad (1)$$

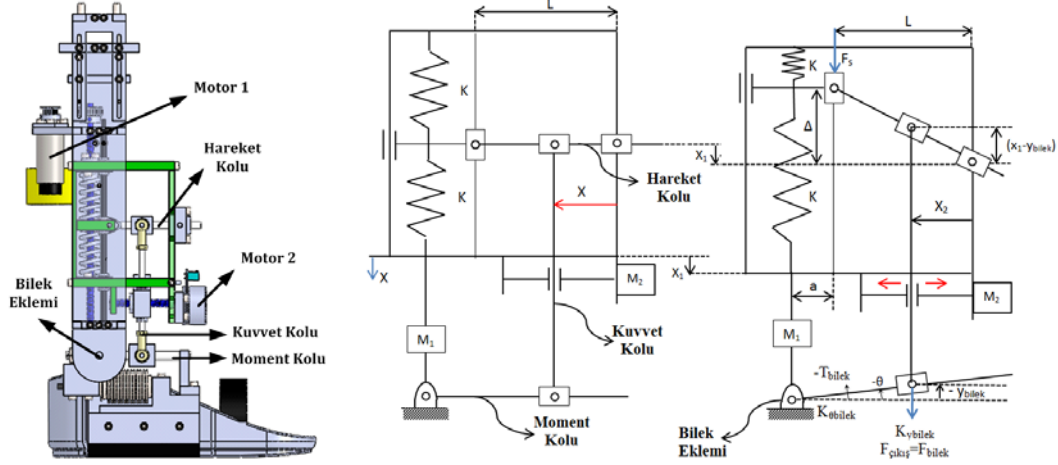
VS-AnkleExo'nun prototip tasarımı Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu prototipte birinci motor ($M1$) vidalı mil yardımıyla kutu şeklindeki sertlik ayarlama mekanizmasını aşağı-yukarı hareket ettirerek bilek eklemin pozisyonlamasını sağlamaktadır. Eyleyici sertliğini ayarlamak için ise lineer bir hareket mekanizması tasarlanmıştır. Bu mekanizmada, hareket kolu üzerindeki kuvvet kolunun pozisyonunu ayarlamak için kullanılan ikinci motor ($M2$) direk olarak vidalı mil mekanizmasına bağlanmıştır. Böylece ikinci motorun konumu kontrol edilerek eyleyicinin sertliği ayarlanabilmektedir. Ayrıca, giyilebilir robotik cihazlarda etkileşim kuvvetlerini ölçmek önemlidir. Bu nedenle bu prototip tasarımda insan-robot ve yer-robot arasındaki etkileşim kuvvetlerini ölçmek için iki adet yük hücresi kullanılmıştır. VS-AnkleExo'nun diğer bütün mekanik tasarım ayrıntıları [20]'de detaylarıyla sunulmaktadır.

3. KONTROL ALGORİTMASI YAPISI (CONTROL ALGORITHM STRUCTURE)

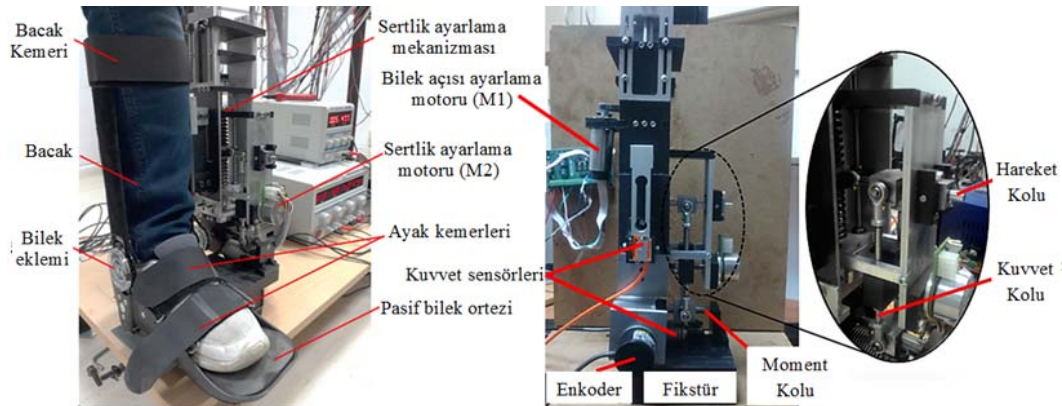
Bu bölümde VS-AnkleExo isimli sertliği değiştirilebilir ayak bileği dış iskelet robotunun pozisyon kontrolünde kullanılan kontrol algoritması anlatılmaktadır. Şekil 3 VS-

AnkleExo'nun pozisyon takibi için geliştirilen kontrol algoritması blok diyagramını göstermektedir. Bu algoritma robotun verilen referansları takip edebilmesini sağlamak ve bozucu girişe karşı robotun duyarlılığını test etmek için kullanılmaktadır. Şekil 3'te gösterilen kontrol algoritmasında q_{ref} pozisyon referansını, q_m eyleyicinin çıkış açısını, K kontrol edilen eyleyici sertliğini, G_{poz} eklemin pozisyon kontrolcüsünü ve $G_{hız}$ motor hız sürücüsünün kontrolcüsünü göstermektedir. Bu çalışmada, algoritmadaki G_{poz} için farklı tiplerde kontrolcüler denenmiştir. Bununla birlikte cihazın sertliğini ayarlamak için ikincil bir PID kontrolcü kullanılmaktadır (Şekil 3'teki üst kısım). Bu PID kontrolcü istenen bir sertlik için sadece ikinci motorun pozisyonunu kontrol etmektedir. Burada önemle vurgulamak gerekir ki; deneyleri basitleştirmek için eyleyici sertliği yüksek (900 Nm/rad), orta (550 Nm/rad) ve düşük (200 Nm/rad) olarak üç farklı sertlik değerine sabitlenmiş ve eklem açısı pozisyon kontrolü deneyleri bu üç farklı sertlik değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

Geleneksel PID, robotik sistemleri kontrol etmede kullanılan genel bir kontrolcüdür. Fakat PID kontrolcü sistem parametrelerine duyarlı olup, VS-AnkleExo gibi doğrusal olmayan ayak bileği dış iskelet robotunda farklı sertlik değerlerinde aynı performansı gösterememektedir. PID



Şekil 1. VS-AnkleExo'nun CAD modeli ve kinematik resmi (CAD model and kinematic view of VS-AnkleExo)

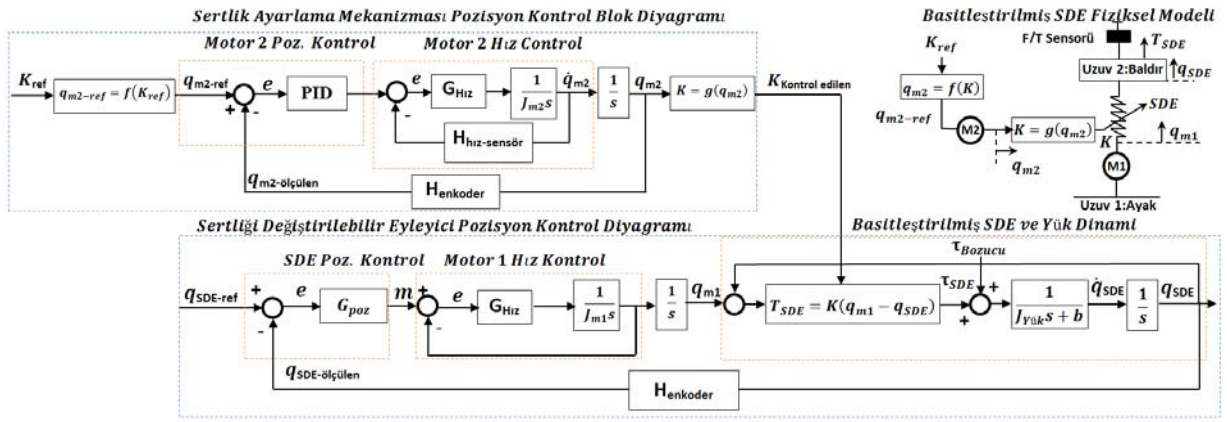


Şekil 2. VS-AnkleExo prototip tasarımı (VS-AnkleExo prototype design)

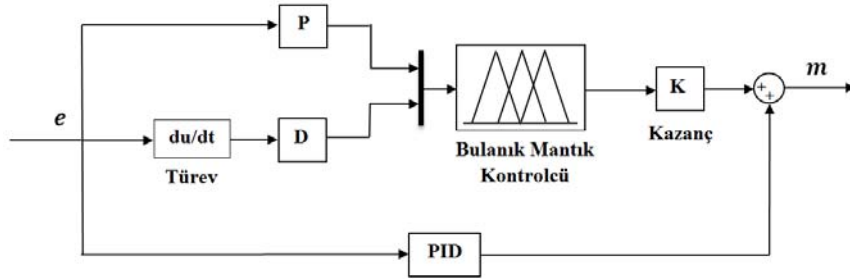
kontrolcünün bu dezavantajı nedeni ile doğrusal olmayan sistemleri kontrol etmede kullanılan bulanık mantık kontrolcü [34] ile geleneksel kontrolcüler birleştirilerek yeni karma kontrolcüler geliştirilmiştir. Doğrusal olmayan sistemlerin kontrolü için geliştirilen bulanık mantık tabanlı karma kontrolcü türleri Bulanık PD, Bulanık PD+I, Bulanık PD+PID ve ZTS Bulanık PD kontrolcülerdir. Bulanık kontrolcüler, sistemden istenen performansı elde etmek için gerçek zamanlı duruma bağlı olarak kontrolcü parametrelerini ayarlamaktadır. Örnek olarak Bulanık PD+PID kontrolcünün blok diyagramı Şekil 4'te gösterilmiştir. Diğer kontrolcülerin blok diyagramı da buna benzemekte olup, sadece blok diyagramında PID ifadesi değişmektedir. ZTS (Z, T ve S tip üyelik fonksiyonlu) Bulanık PD kontrolcüsü, Bulanık PD kontrolüne

benzemektedir. Sadece ZTS Bulanık PD kontrolcüde kullanılan üyelik fonksiyonları diğer kontrolcülerden farklıdır. Bu kontrolcüde kullanılan üyelik fonksiyonları hakkında kısa bir bilgi aşağıda verilmiştir.

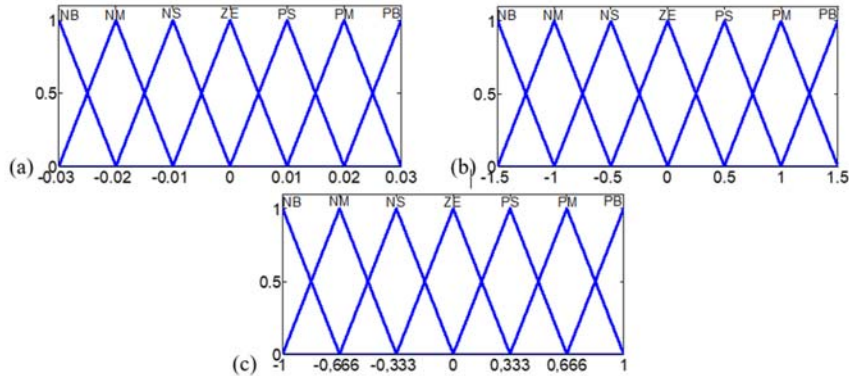
Bulanık kontrolcü iki giriş ve bir çıkışa sahiptir. Girişler hata ve hatanın türevi, çıkış manipülasyon sinyalidir. Bulanık sistem modellerinin konfigürasyonu üç durumdan oluşmaktadır; (i) bulanıklaştırma, (ii) bulanık temelli bir kural tarafından karar verilen çıkarsama mekanizması ve (iii) durulaştırma. ZTS Bulanık PD kontrolcü hariç diğer kontrolcülerde, giriş ve çıkış değişkenleri için üçgen (T) üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Şekil 5a ve Şekil 5b'de görüldüğü gibi, her giriş değişkeni için yedi adet üçgen üyelik fonksiyonu (Negatif Büyük (NB), Negatif Orta (NM),



Şekil 3. VS-AnkleExo'nun pozisyon kontrolü blok diyagramı (Position control block diagram of VS-AnkleExo)



Şekil 4. Bulanık PD+PID kontrolcünün blok diyagramı (Block diagram of fuzzy PD+PID controller)



Şekil 5. Giriş (a, b) ve çıkış (c) değişkenleri için üyelik fonksiyonları (Membership functions for the inputs (a,b) and output (c))

Negatif Küçük (*NS*), Sıfır Hata (*ZE*), Pozitif Küçük (*PS*), Pozitif Orta (*PM*), Pozitif Büyük (*PB*) tanımlanırken, Şekil 5c’de görüldüğü gibi çıkış değişkeni için de aynı üyelik fonksiyonları tanımlanmıştır. Bulanıklaştırmadan sonra, çıktı değişkeni için mantıklı değerler elde edebilmek amacıyla Tablo 2’deki kurallar dizini belirlenmiştir.

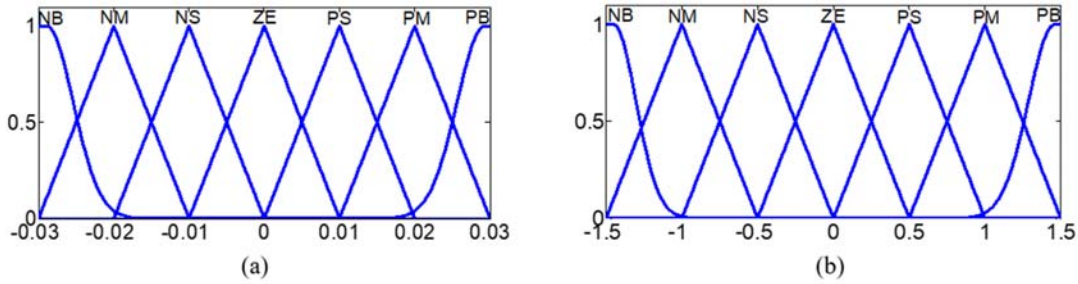
ZTS Bulanık PD algoritmasında ise limit değerlerin ötesinde bulanık kontrolcünün sürekli devrede kalabilmesi için *Z* (*z-shape*), *T* (*triangle*) ve *S* (*s-shape*) tipi üyelik fonksiyonu kombine edilerek kullanılmıştır. Böylelikle bu algoritmada giriş değişkenleri olan hata ve hatanın türevi için ZTS tipi bir üyelik fonksiyonu tercih edilmiştir. ZTS Bulanık PD algoritmasında kullanılan ZTS üyelik fonksiyonlarından oluşan kombinasyon, hata ve hatanın türevi için Şekil 6’da gösterilmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

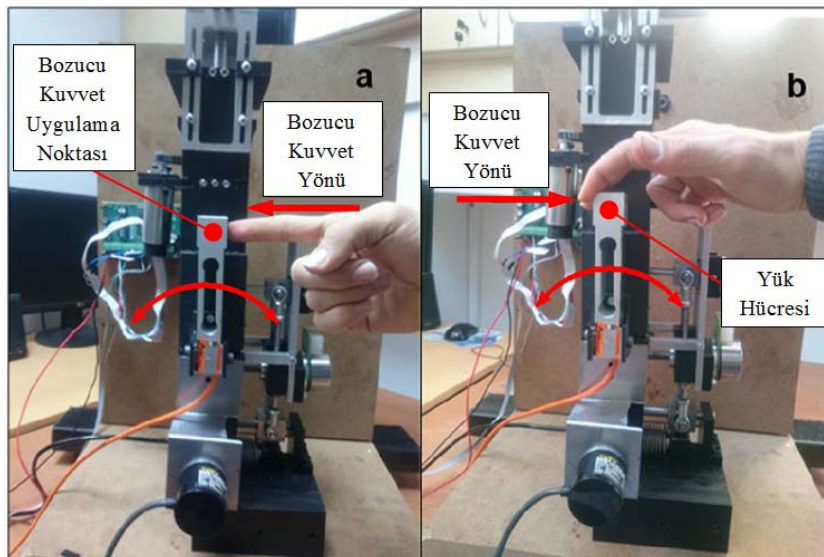
Bu çalışmada, bulanık mantık tabanlı karma kontrolcülerin VS-AnkleExo üzerindeki performanslarını değerlendirmek için iki çeşit deney gerçekleştirilmiştir; (i) bozucusuz pozisyon takip deneyleri, (ii) bozuculu basamak ve sinüs eğrisi cevap deneyleri. Bu deneyleri gerçekleştirebilmek için, yürüme çevriminin basma fazı düşünülerek bir deney düzeneği kurulmuştur. Şekil 7’de görüldüğü gibi, deney düzeneğinde robotun ayak kısmı bir zemine sabitlenirken, bacak kısmı serbest bırakılmıştır. Böylelikle, yürüme esnasında ayak tabanı ile zemine basan bir kişinin durumu oluşturulmuştur. Bozuculu basamak ve sinüs eğrisi cevap deneylerinde, robot üzerine uygulanan bozucu girişler insan-robot bağlantısını sağlayan yük hücresi üzerinden

Tablo 2. P ve D parametreleri için bulanık modelin kural tabanı (Rule base of the fuzzy model for P and D parameters)

e/ė	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NM	ZE
NM	NB	NB	NB	NB	NM	ZE	PB
NS	NB	NB	NB	NM	ZE	PM	PB
ZE	NB	NB	NM	ZE	PM	PB	PB
PS	NB	NM	ZE	PM	PB	PB	PB
PM	NM	ZE	PM	PB	PB	PB	PB
PB	ZE	PM	PM	PB	PB	PB	PB



Şekil 6. (a) Hata ve (b) hatanın türevi için ZTS Bulanık PD kontrolcüde kullanılan ZTS üyelik fonksiyonlarının kombinasyonu (Combination of ZTS type membership functions used in ZTS Fuzzy PD controller for (a) error and (b) deviation of error)



Şekil 7. VS-AnkleExo pozisyon kontrolü deney düzeneği (Experimental setup for position control of VS-AnkleExo)

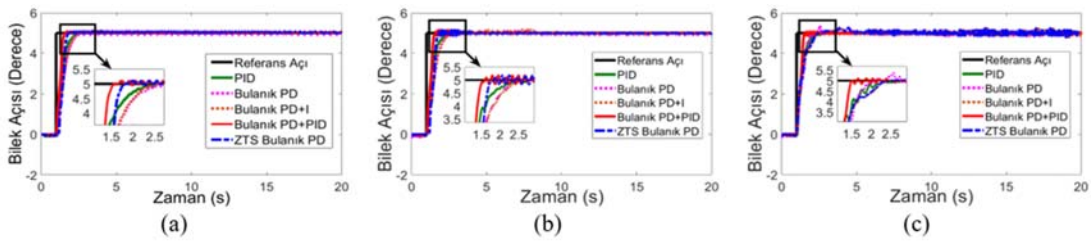
uygulanmıştır. Gerçekleştirilen deneylerde dışarıdan uygulanan bozucu kuvvetler el ile uygulanmış olup, bu kuvvetler bütün deneylerde aynı değerde uygulanmaya çalışılmıştır. Bozucusuz pozisyon takibi, bozuculu basamak ve sinüs eğrisi cevap deneyleri üç farklı sertlik değerinde (düşük, orta ve yüksek) tekrarlanmıştır.

4.1. Bozucusuz Pozisyon Takip Deneyleri (Position Tracking Experiments without Disturbance)

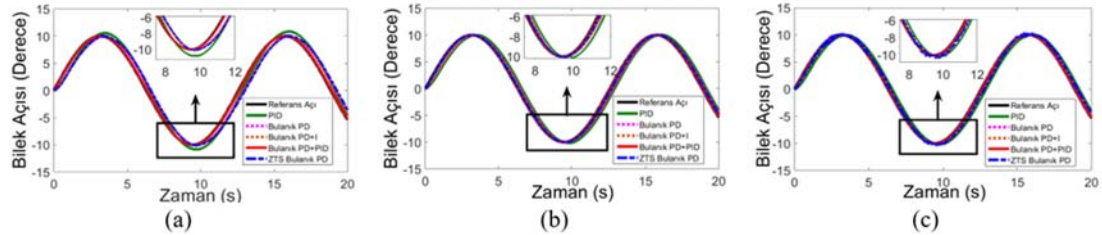
Pozisyon takip deneylerinde amaç farklı kontrolcüler altında robotun pozisyon takip performansını göstermektir. Bu kontrol çalışmaları, rehabilitasyon ve yürütme uygulamalarında önemli olan pozisyon tabanlı pozisyon takip kontrolüne dayanmaktadır. Şekil 7’de gösterilen deney düzeneğinde basamak ve sinüs referansları kapalı döngü pozisyon kontrol algoritması girişine verilmiş ve ölçülen pozisyon değerlerinin referansları ne kadar iyi takip edebildiğine bakılmıştır. Bütün deneylerde, kontrolcülerin tasarımı (kontrolcü parametrelerinin seçimleri) sistem cevabının aşım yapmaması ve mümkün olan en hızlı yükselme zamanına göre cevap vermesi ilkelerine göre ayarlanmıştır. Deneylerde ilk olarak robotun pozisyon kontrolü için PID kontrolcü uygulanmıştır. En uygun PID kontrolcü parametrelerini elde etmek için Ziegler-Nichols yöntemi kullanılmıştır. Ancak, bu yöntem ile elde edilen PID parametre değerleri kullanıldığında robot belirlenen tasarım ilkelerini sağlayamamaktadır, basamak girişi cevapları aşım yaparak sistemin bozucu etkiler altında daha kolay kararsız hale gelmesine neden olmaktadır. Bundan dolayı, belirlenen bu ilk değerlerden başlayarak kontrolcü parametreleri belirtilen tasarım ilkelerine uygun olarak yeniden revize edilmiş ve pozisyon takip deneyleri revize edilen parametre değerleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geleneksel PID kontrolcülerden sonra pozisyon takip deneylerinde Bölüm 3’te bahsedilen karma bulanık kontrolcüler (Bulanık PD, Bulanık

PD+I, Bulanık PD +PID ve ZTS Bulanık PD) uygulanmıştır. Kontrolcülerde hata ve hatanın türevi üyelik fonksiyonlarının oranları kullanılarak çıktı sinyali elde edilmiştir. Bu üyelik fonksiyonlarının çalışma aralıkları hata için $[-0,03-0,03]$ ve hatanın türevi için $[-1,5-1,5]$ olarak alınmıştır. Durulaştırma işleminden sonra elde edilmiş olan çıktı sinyali bir K katsayı ile çarpılmıştır. Bulanık PD ve ZTS Bulanık PD kontrolcülerin çıkışları direk birinci motor girişi olarak verilirken, Bulanık PD+I ve Bulanık PD+PID kontrolcülerde bulanık kontrolcü çıkışı I ve PID kontrolcülerin çıkışları ile toplanarak birinci motora verilmiştir (Şekil 4).

Üç farklı sertlik değeri için çeşitli kontrolcülerin bozucusuz basamak ve sinüs eğrisi cevapları Şekil 8 ve Şekil 9’da sırasıyla gösterilmiştir. Ayrıca, robot üzerinde denenen her bir kontrolcünün basamak ve sinüs eğrisi cevapları için RMS (karekök ortalama) hata karşılaştırması Tablo 3 ve Tablo 4’te sunulmuştur. Şekil 8’de görüldüğü gibi, bütün sertlik değerleri için Bulanık PD+PID kontrolcüsü cevabı referansa hızlı bir şekilde ulaşmakta ve sistemin oturma zamanı daha erken olmaktadır. Bulanık PD+PID kontrolcü ile kıyaslandığında diğer kontrolcülerde sistem hem referansa geç ulaşmakta hem de kararlı durumda az da olsa salınımlar meydana gelmektedir. Yüksek ve orta sertlik değerleri için Bulanık PD ve Bulanık PD+I en geç oturma zamanına sahiptir. Ayrıca, Tablo 3’teki RMS hataları incelendiğinde, bütün sertlik değerlerinde Bulanık PD+PID kontrolcünün diğer kontrolcülere kıyasla en az hatayı vererek en iyi bir performansı sergilediği görülmektedir. Sinüs eğrisi girişi için, Şekil 9 incelendiğinde, yüksek sertlik için PID kontrolcü hariç bütün kontrolcüler referansı düzgün bir şekilde takip edebilirken, orta ve düşük sertlik değerleri için bütün kontrolcüler referansı düzgün bir şekilde takip edebilmektedir. Ancak, sinüs eğrisi pozisyon takip performansının daha hassas bir kıyaslaması için oluşturulan Tablo 4’teki RMS hata değerleri ve maksimum hata



Şekil 8. (a) Yüksek, (b) orta ve (c) düşük sertlik değerleri için kontrolcülerin basamak cevapları
(Step response of the controllers for (a) high, (b) medium and (c) low stiffness values)



Şekil 9. (a) Yüksek, (b) orta ve (c) düşük sertlik değerleri için kontrolcülerin sinüs cevapları
(Sine response of the controllers; (a) high, (b) medium and (c) low stiffness values)

değerleri incelendiğinde, Bulanık PD+PID kontrolcünün en az hata vererek en iyi performansa sahip olduğunu bir kez daha anlaşılmaktadır.

Pozisyon takibi deneyleri kapsamında robotun yürütme kabiliyetini gösterebilmek için bilek eklemi pozisyon kontrol çalışması bir de gerçek insan yürüme verileri ile tekrarlanmıştır. Bu deneyde, yürüme esnasında ayak bileği sertliğinin ayarlanması önemli bir unsur olduğundan, robotun hem denge pozisyonu hem de sertliği aynı anda bağımsız olarak kontrol edilmiştir. Burada, gerçekleştirilen kontrol çalışması için yine Şekil 3'teki kontrol yapısı kullanılmıştır. Kontrol yapısında Bovi [35] tarafından sağlanan ayak bileği açısı yürüme verisi robota referans olarak girilmiş ve G_{pos} pozisyon kontrolcüsü olarak da basamak ve sinüs eğrisi takibi deneylerinde en iyi performansı veren Bulanık PD+PID kontrolcü kullanılmıştır.

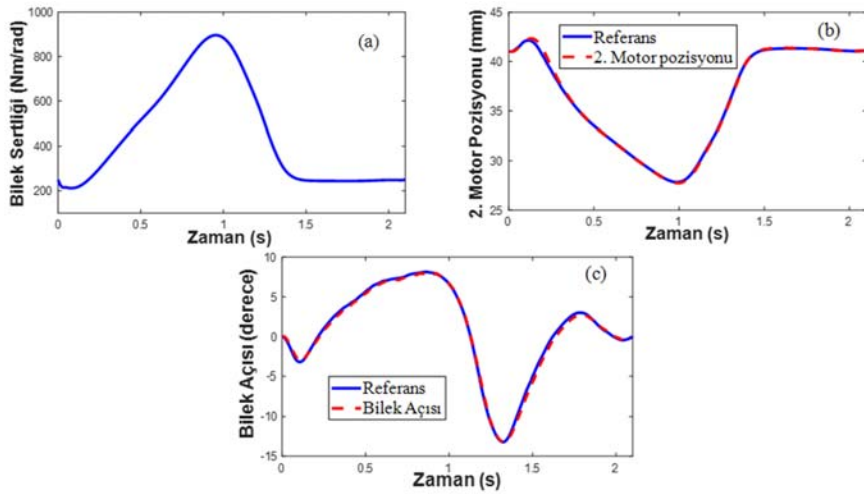
Ayak bileği yürüme sırasında sertliği de değiştirmektedir. Buna göre, bilek eklemi yürüme verileri takip edilirken bilek sertliğini de ayarlamak için ikinci motorun konum bilgisi gerekmektedir. Eklem sertliğini ayarlamak için gerekli olan ikinci motor konum bilgisi (x_2) Bölüm 2'de bahsedilmiş olan Eş. 1 ile ifade edilmektedir. Bu eşitlikteki $K_{\theta_{bilek}}$ ifadesi yürüme esnasındaki ayak bileği sertlik değişimlerini göstermekte olup, bu deneylerde $K_{\theta_{bilek}}$ için Şekil 10a'da gösterilen ayak bileği sertlik değişim grafiği referans alınmıştır. Ayak bileği sertlik değişimi grafiğinin nasıl belirlendiği referans [33]'te ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Bu ayak bileği sertlik değişimlerine göre, robotun ayak bileği sertliğinin ayarlanması için ikinci motor ($M2$) pozisyon referansı x_2 Eş. 1 kullanılarak Şekil 10b'deki gibi hesaplanmıştır. Deneylerde, ikinci motorun bu konum bilgisini takip edebilmesi için ise PID kontrolcü kullanılmıştır. Buna göre, gerçek insan yürüme verileri

Tablo 3. Basamak giriş fonksiyonu için kontrolcülerin RMS hataları (RMS errors of the controllers for step input function)

Kontrolcü	RMS hataları		
	Yüksek sertlik	Orta sertlik	Düşük sertlik
PID	0,5	0,49	0,50
Bulanık PD	0,63	0,63	0,53
Bulanık PD+I	0,62	0,64	0,54
Bulanık PD+PID	0,44	0,46	0,47
ZTS Bulanık PD	0,61	0,49	0,51

Tablo 4. Sinüs giriş fonksiyonu için kontrolcülerin RMS hataları ve maksimum hata değerleri (RMS errors and maximum error values of the controllers for sine input functions)

Kontrolcü	RMS hataları			Maks. hata		
	Yüksek sertlik	Orta sertlik	Düşük sertlik	Yüksek sertlik	Orta sertlik	Düşük sertlik
PID	1,13	1,67	1,68	1,18	1,79	1,68
Bulanık PD	1,15	2,04	1,48	0,73	1,22	1,03
Bulanık PD+I	1,16	1,98	1,66	0,72	1,18	1,06
Bulanık PD+PID	0,21	0,28	0,35	0,21	0,39	0,36
ZTS Bulanık PD	0,51	1,01	0,65	0,29	0,53	0,59



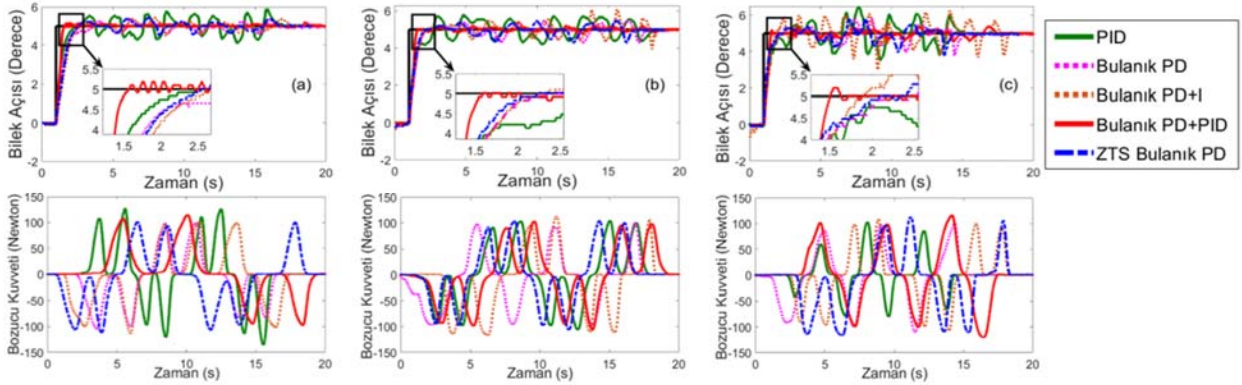
Şekil 10. (a) Bilek eklemine yürüme çevrimi boyunca sertlik değişimi, (b) bu sertlik değişimine göre ikinci motorun konumu ve (c) değişen sertlik altında robotun bilek eklemi pozisyon takibi ((a) Stiffness variation of the ankle for a gait cycle, (b) second motor position according to this stiffness variation and (c) ankle position tracking of the robot with varying stiffness)

kullanılarak bilek eklemi pozisyon takibi kontrol deneyi sonuçları Şekil 10c’de sunulmuştur. Bu şekilden görüldüğü gibi, Bulanık PD+PID kontrolcü robotun ayak bileği yürüme verisini bir yürüme çevrimi boyunca düzgün bir şekilde izleyebilmesini sağlamıştır. Benzer şekilde ikinci motor, yürüme çevrimi esnasında gerekli olan konum bilgisini çok yakın bir şekilde takip edebilmektedir (Şekil 10b). Gerçekleştirilen bu deney, sertlik değişirken, VS-AnkleExo’nun Bulanık PD+PID kontrolcü ile yürüme çevrimi boyunca insan ayak bileği yürüme verilerini hassas bir şekilde takip edebildiğini göstermektedir.

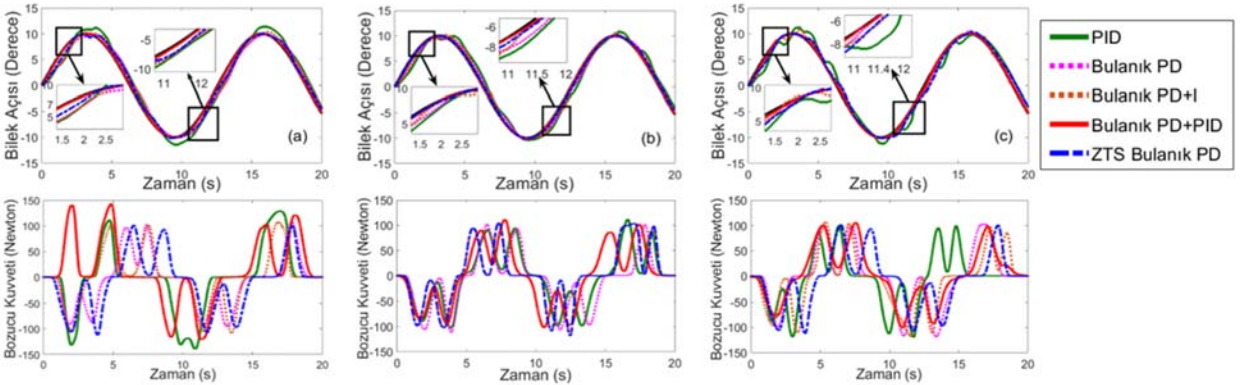
4.2. Bozuculu Basamak ve Sinüs Cevap Deneyleri (Step and Sinus Response Experiments with Disturbance)

Dış iskelet robotlar insanlarla sürekli etkileşim halinde çalışan cihazlardır ve devamlı dış kuvvetlere maruz kalmaktadırlar. Bu bölümde, insan-robot etkileşimini temsilen dışarıdan uygulanan bozucu kuvvetler altında önerilen kontrolcülerin bozucuya karşı duyarlılığını test etmek amacıyla bozuculu basamak ve sinüs eğrisi cevap deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 7’de gösterilen deney düzeneği kullanılarak bozuculu cevap deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 7’deki bozucu kuvvet uygulama

noktası insan-robot arasındaki temas noktası olup bu noktadaki yük hücresi vasıtasıyla VS-AnkleExo insana adapte edilebilmektedir. Dolayısıyla insan-robot arasında oluşan etkileşim kuvveti bu yük hücresi ile robota iletilmektedir. Etkileşim kuvvetinin kontrolcü performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için, robot istenen referanslara ulaştıktan sonra insan-robot arasındaki etkileşim kuvvetini ölçen yük hücresi üzerine el ile bozucu kuvvetler uygulanmıştır. Bozucu kuvvetin değeri bu yük hücresi yardımıyla ölçülmektedir. Robotun düşük, orta ve yüksek sertlik değerleri için farklı kontrolcüler kullanılarak gerçekleştirilen deney sonuçları uygulanan bozucu kuvvetler ile birlikte Şekil 11 ve Şekil 12’de verilmiştir. Ayrıca, Tablo 5 ve 6’da sırası ile basamak ve sinüs eğrisi cevapları için her bir kontrolcünün RMS hata karşılaştırmaları gösterilmektedir. Bu tablolarda, PD+PID kontrolcünün RMS hata değerleri diğer kontrolcülere kıyasla daha düşük çıkmıştır. Bununla birlikte Tablo 6’daki sinüs giriş fonksiyonunun maksimum pozisyon hata değerleri PD+PID kontrolcüde en düşük çıkmıştır. Bu deney sonuçları Bulanık PD+PID kontrolcünün VS-AnkleExo gibi sertliği değiştirilebilir eklem tasarımlarının uygulamalarında bozucu etkilerden en az etkilenen kontrolcü çeşidi olduğunu göstermektedir.



Şekil 11. (a) Yüksek, (b) orta ve (c) düşük sertlik değerleri için kontrolcülerin bozuculu basamak cevapları ve uygulanan bozucu kuvvetler (Step response of the controllers with external disturbances; (a) high, (b) medium and (c) low stiffness values)



Şekil 12. (a) Yüksek, (b) orta ve (c) düşük sertlik değerleri için kontrolcülerin bozuculu sinüs cevapları ve uygulanan bozucu kuvvetler (Sine response of the controllers with external disturbances; (a) high, (b) medium and (c) low stiffness values)

Tablo 5. Bozucu kuvvet altında basamak giriş fonksiyonu için kontrolcülerin RMS hataları
(RMS errors of the controllers for the step input function with disturbance)

Kontrolcü	RMS hataları		
	Yüksek sertlik	Orta sertlik	Düşük sertlik
PID	0,62	0,68	0,74
Bulanık PD	0,65	0,60	0,57
Bulanık PD+I	0,71	0,65	0,71
Bulanık PD+PID	0,43	0,48	0,50
ZTS Bulanık PD	0,68	0,53	0,63

Tablo 6. Bozucu kuvvet altında sinüs giriş fonksiyonu için kontrolcülerin RMS hataları, maksimum ve minimum değerleri
(RMS errors and max.-min. values of the controllers for sine input function with disturbance)

Kontrolcü	RMS hataları			Maks. hata		
	Yüksek sertlik	Orta sertlik	Düşük sertlik	Yüksek sertlik	Orta sertlik	Düşük sertlik
PID	1,45	2,34	2,08	1,29	2,32	2,12
Bulanık PD	1,23	1,29	1,96	0,81	1,56	1,38
Bulanık PD+I	1,20	2,57	1,94	0,79	1,83	1,65
Bulanık PD+PID	0,21	0,43	0,47	0,32	0,51	0,53
ZTS Bulanık PD	0,54	1,17	2,03	0,33	0,93	0,72

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

İnsan ayak bileği eklemi, yürüme çevrimi boyunca anlık olarak eklem sertliğini değiştirmektedir. Bu çalışmada, ayak bileği eklemine bu biyomekanik davranışından esinlenilerek tasarlanan VS-AnkleExo isimli sertliği değiştirilebilir bir ayak bileği dış iskelet robotun farklı kontrolcü türleri ile pozisyon takibi kontrol performansı araştırılmıştır. Bu çalışmadaki amaç VS-AnkleExo gibi sertliği değiştirilebilir yumuşak eklemlerin, özellikle bozucu etkiler altındaki pozisyon takibini en iyi şekilde sağlayabilecek kontrolcü tipinin tespit edilmesidir. Bundan dolayı PID ile bulanık mantık tabanlı Bulanık PD, Bulanık PD+I, Bulanık PD+PID ve ZTS Bulanık PD gibi karma kontrolcüler VS-AnkleExo'nun pozisyon kontrol çalışmalarında sırası ile denenmiştir. Pozisyon takibi kontrol çalışmalarında deneyler ilk olarak bozucusuz basamak ve sinüs pozisyon referansları için gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonuçları Bulanık PD+PID kontrolcünün pozisyon izleme hatalarını en etkili şekilde azalttığı ve bozucusuz pozisyon takibinde en iyi performansı sağladığını göstermiştir. Ayrıca, pozisyon takip deneyleri kapsamında, robotun yürütme kabiliyetini göstermek için bir kontrol çalışması daha gerçekleştirilmiştir. Yürütme çalışmasında gerçek bir insana ait yürüme verileri kontrol algoritması referans girişi olarak alınmış ve pozisyon takip performansı en iyi olan Bulanık PD+PID kontrolcü kullanılmıştır. Sonuçlar, Bulanık PD+PID kontrolcü ile robotun yürüme verilerini düzgün bir şekilde takip edebildiğini göstermektedir. VS-AnkleExo üzerinde gerçekleştirilen diğer bir pozisyon kontrolü çalışması ise önerilen kontrolcülerin bozuculu basamak ve sinüs eğrisi cevap deneyleridir. Bu deneylerde, robot üzerine insan-robot etkileşimini temsilen bozucu kuvvetler uygulanmış ve elde edilen deney sonuçları ayrıntılı olarak her bir kontrolcü için verilmiştir. Bu deney sonuçları, geleneksel PID ve diğer kontrolcüler ile karşılaştırıldığında, Bulanık PD+PID

kontrolcünün VS-AnkleExo gibi sertliği değiştirilebilir yumuşak eklemlerin kontrolünde bozuculara karşı daha sağlam olduğunu göstermektedir. Gelecekte, VS-AnkleExo ayak bileği robotu yumuşak diz ve kalça eklemi tasarımları ile birleştirilerek bütünüyle yumuşak olan bir alt uzuv dış iskelet robotun kullanıcı ile etkileşim halindeki kontrol çalışmaları gerçekleştirilecektir.

TEŞEKKÜR (ANKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar bu makale ile ilgili olarak 213M297 no'lu "Biyomimetik bir alt uzuv dış iskelet robotun tasarımı ve denetimi" başlıklı kariyer projesi ile finansal destek sağlamasından dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunmaktadırlar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kazerooni H., Steger R., Huang L., Hybrid control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX), The International Journal of Robotics Research, 25 (5-6), 561-573, 2006.
2. Neuhaus P.D., Noorden J.H., Craig T.J., Torres T., Kirschbaum J., Pratt J.E., Design and evaluation of Mina: A robotic orthosis for paraplegics, In Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on 1-8, 2011.
3. Suzuki K., Mito G., Kawamoto H., Hasegawa Y., Sankai Y., Intention-based walking support for paraplegia patients with Robot Suit HAL, Advanced Robotics, 21 (12), 1441-1469, 2007.
4. Veneman J.F., Kruidhof R., Hekman E.E., Ekkelenkamp R., Van Asseldonk E.H., Van Der Kooij H., Design and evaluation of the LOPES exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 15 (3), 379-386, 2007.

5. Van Ham R., Sugar T.G., Vanderborght B., Hollander K.W., Lefeber D., Compliant actuator designs, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 16 (3), 2009.
6. Migliore S.A., Brown E.A., DeWeerth S.P., Biologically inspired joint stiffness control, In *Robotics and Automation, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, 4508-4513, 2005
7. Wang S., Wang L., Meijneke C., Van Asseldonk E., Hoellinger T., Cheron G., Tamburella F., Design and control of the MINDWALKER exoskeleton, *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 23 (2), 277-286, 2015.
8. Kwa H.K., Noorden J.H., Missel M., Craig T., Pratt J.E., Neuhaus P.D., Development of the IHMC mobility assist exoskeleton, In *Robotics and Automation, IEEE International Conference on*, 2556-2562, 2009.
9. Pratt J.E., Krupp B.T., Morse C.J., Collins S.H., The RoboKnee: an exoskeleton for enhancing strength and endurance during walking, *IEEE international conference on robotics and automation, proceedings*, 3, 2430-2435, 2004.
10. Cestari M., Sanz-Merodio D., Arevalo J.C., Garcia E., ARES a variable stiffness actuator with embedded force sensor for the ATLAS exoskeleton, *Industrial Robot: An International Journal*, 41 (6), 518-526, 2014.
11. Cestari M., Sanz-Merodio D., Arevalo J. C., Garcia E., An adjustable compliant joint for lower-limb exoskeletons, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20 (2), 889-898, 2015.
12. Zhu J., Wang Y., Jiang J., Sun B., Cao H., Unidirectional variable stiffness hydraulic actuator for load-carrying knee exoskeleton, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 14 (1), 1729881416686955, 2017.
13. Vanderborght B., Tsagarakis N. G., Semini C., Van Ham R., Caldwell D.G., MACCEPA 2.0: Adjustable compliant actuator with stiffening characteristic for energy efficient hopping, In *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on*, IEEE, 544-549, 2009.
14. Jafari A., Tsagarakis N. G., Sardellitti I., Caldwell D.G., A new actuator with adjustable stiffness based on a variable ratio lever mechanism, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19 (1), 55-63, 2014.
15. Liu L., Leonhardt S. ve Misgel B.J., Design and control of a mechanical rotary variable impedance actuator, *Mechatronics*, 39, 226-236, 2016.
16. Sun J., Zhang Y., Zhang C., Guo Z., Xiao X., Mechanical design of a compact Serial Variable Stiffness Actuator (SVSA) based on lever mechanism, In *Robotics and Automation (ICRA), 2017 IEEE International Conference on*, IEEE, 33-38, 2017.
17. Tsagarakis N.G., Sardellitti I., Caldwell D. G., A new variable stiffness actuator (CompAct-VSA): Design and modelling, In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, 378-383, 2011.
18. Dežman M., Gams A. Rotatable cam-based variable-ratio lever compliant actuator for wearable devices, *Mechanism and Machine Theory*, 130, 508-522, 2018.
19. Wolf S., Hirzinger G., A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation, In *Robotics and Automation, IEEE International Conference on*, 1741-1746, 2008.
20. Baser O., Kizilhan H., Mechanical design and preliminary tests of VS-AnkleExo, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40 (442), 1-16, 2018.
21. Sun J., Guo Z., Sun D., He S., Xiao X., Design, modeling and control of a novel compact, energy-efficient, and rotational serial variable stiffness actuator (SVSA-II), *Mechanism and Machine Theory*, 130, 123-136, 2018.
22. Schiavi R., Grioli G., Sen S., Bicchi A., VSA-II: A novel prototype of variable stiffness actuator for safe and performing robots interacting with humans, In *Robotics and Automation, 2008, IEEE International Conference on*, 2171-2176, 2008.
23. Kim B.S., Song J.B., Design and Control of a Variable Stiffness Actuator Based on Adjustable Moment Arm, *IEEE Trans. Robotics*, 28 (5), 1145-1151, 2012.
24. Ayasun S., Sönmez Ş., Gain and phase margin based stability analysis of time delayed single area load frequency control system with fractional order PI controller, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 945-959, 2019.
25. Gündüz H., Ayasun S., Sönmez Ş., Gain and phase margins based stability analysis of micro grid systems with time delay by using Rekasius substitution, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1) 553-567, 2019.
26. Zhang C., Liu G., Li C., Zhao J., Yu H., Zhu Y., Development of a lower limb rehabilitation exoskeleton based on real-time gait detection and gait tracking, *Advances in Mechanical Engineering*, 8 (1), 1687814015627982, 2016.
27. Madani T., Daachi B., Djouani K., Non-singular terminal sliding mode controller: Application to an actuated exoskeleton, *Mechatronics*, 33, 136-145, 2016.
28. Cao F., Li C., Li Y., Robust sliding mode adaptive control for lower extremity exoskeleton, In *Chinese Automation Congress (CAC), 2015, 400-405, 2015.*
29. Guo Z., Pan Y., Sun T., Zhang Y., Xiao X., Adaptive neural network control of serial variable stiffness actuators, *Complexity*, 2017.
30. Shi P., Lei C., Zhang Y., Wang Y., Wang F., PID control of the mechanical legs based on fuzzy adaptive, In *Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), 2015 IEEE International Conference on*, 1965-1970, 2015.
31. Khosla A., Leena G., Soni M.K., Performance evaluation of various control techniques for inverted pendulum, *Performance Evaluation*, 3 (4), 1096-1102, 2013.
32. Shamaei K., Sawicki G.S., Dollar A.M., Estimation of quasi-stiffness and propulsive work of the human ankle in the stance phase of walking, *PLoS one* 2013, 8 (3), e59935, 2013.

33. Kizilhan H., Baser O., Kilic E., Ulusoy N., Comparison of controllable transmission ratio type variable stiffness actuator with antagonistic and pre-tension type actuators for the joints exoskeleton robots, In 12th international conference on informatics in control, automation and robotics (ICINCO), 2, 188–195, 2015.
34. Pan D., Gao F., Miao Y., Cao R., Co-simulation research of a novel exoskeleton-human robot system on humanoid gaits with fuzzy-PID/PID algorithms, *Advances in Engineering Software*, 79, 36-46, 2015.
35. Bovi G., Rabuffetti M., Mazzoleni P., Ferrarin M., A multiple-task gait analysis approach: kinematic, kinetic and EMG reference data for healthy young and adult subjects, *Gait & posture*, 33 (1), 6-13, 2011.

