

DÖRT SERBESTLİK DERECELİ BİR ÜST KOL REHABİLİTASYON ROBOTUNUN KURGUSAL TASARIMI VE KİNEMATİĞİ

Murat Han UYSAL^{1, a)}, Recep Doğaç KILIÇOĞLU^{1, b)}, Hüseyin Emir YÜKSEL, Berkin ŞİMŞEK,
Aytekin DÖNMEZ, Okan AYAR, Mertcan KOÇAK^{1, c)} ve Erkin GEZGİN^{1, d)}

¹İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü
35620, İZMİR

a) murathanuysal@gmail.com, b) dogac.kilicoglu@gmail.com
c) mertcan.kocak@ikcu.edu.tr, d) erkin.gezgin@ikcu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, inme sonrası üst ekstremitte rehabilitasyonuna yönelik dört serbestlik dereceli bir robotun kurgusal tasarımı ve kinematik analizi sunulmuştur. İki serbestlik dereceli bir beş çubuk mekanizmasının, yine iki serbestlik derecesine sahip uyarlanabilir bir taban üzerine entegre edilmesiyle oluşturulan sistemde uyarlanabilir taban, sistemin yüksekliğini ve eğimini ayarlayarak tedavi çeşitliliği ve kullanıcı ergonomisi sağlarken, uç noktadaki çift yönlü ve düşük maliyetli yük hücreleri, rehabilitasyon sırasındaki kuvvetlerin hassas bir şekilde ölçülmesini mümkün kılar. Çalışma kapsamında, oluşturulan ileri ve ters kinematik analizler mekanizmanın hareket kabiliyetini matematiksel olarak modellemek için detaylı bir şekilde yapılmış, ayrıca uyarlanabilir tabanın sisteme etkisi de incelenmiştir. Sonuç olarak, literatürdeki mevcut sistemler göz önünde bulundurularak geliştirilen sistem, özellikle kişisel kullanım için erişilebilir, ölçülebilir ve bütçe dostu bir rehabilitasyon çözümü sunma potansiyeli taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tıbbi Robotik, Robot Destekli Rehabilitasyon, Manipülatör Tasarımı, Uyarlanabilirlik

CONCEPTUAL DESIGN AND KINEMATICS OF A FOUR DEGREES OF FREEDOM UPPER LIMB REHABILITATION ROBOT

ABSTRACT

This study presents the conceptual design and kinematic analysis of a four-degree-of-freedom mechanism for post-stroke upper extremity rehabilitation. The system is created by integrating a two-degree-of-freedom five-bar mechanism onto an adaptive base, which also has two degrees of freedom. While the adaptive base provides therapy variety and user ergonomics by adjusting the system's height and tilt, the bi-directional and low-cost load cells on the end-effector enable the precise measurement of forces during rehabilitation. Within the scope of the study, forward and inverse kinematic analyses were conducted in detail to model the mechanism's motion capability mathematically, and the effect of the adaptive base on the system was also examined. As a result, this system, developed by considering existing systems in the literature, has the potential to offer an accessible, measurable, and budget-friendly rehabilitation solution, especially for personal use.

Keywords: Medical Robotics, Robot Assisted Rehabilitation, Manipulator Design, Adaptability

1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki yaşlanma, özellikle 60 yaş üstü bireylerde görülen inme vakalarının önemli ölçüde artmasına yol açmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü verilerine göre her yıl yaklaşık 15 milyon inme vakası görülmekte ve bu vakalardan 5 milyonu bireylerde kalıcı sakatlıklara yol açmaktadır [1].

Hong ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmaya göre, 65–74 yaş aralığı tüm inme vakalarının %31,4'ünü oluşturmakta, bu oran erkeklerde %31,8 ve kadınlarda %31,1 olarak ölçülmektedir. Aynı zamanda küresel ölçekte yaşlanan nüfusun doğrudan bir sonucu olarak, inme vakalarının görülme sıklığı yıllar içinde belirgin şekilde artmaktadır. 1995–2003 yılları arasında 35–74 yaş grubunda inme sıklığında belirgin bir artış gözlenmiş, yıllık ortalama artış oranı %7 civarında gerçekleşmiştir. Bu artışın en önemli nedeni olarak yaşlı nüfusun giderek büyümesi gösterilmektedir. Bu veriler, yalnızca yaşlı nüfusun artışını değil, aynı zamanda inme vakalarının halk sağlığı üzerindeki artan yükünü de ortaya koymaktadır [2]. Türkiye özelinde yapılan bir çalışmada ise 2019 yılında 1.080.380 bireyde inme vakası tespit edilmiş ve yıllık artış miktarı 123.345 kişi olarak belirlenmiştir [3]. İnme sonrası rehabilitasyon, yoğun, tekrarlı ve uzun süreli hareketler gerektirmekte olup, artan vaka sayısı nedeniyle fizyoterapistlerin üzerindeki iş yükü ciddi anlamda artmaktadır. Bu durum, hem sağlık sistemleri üzerindeki yükü arttırmakta, hem de hastaya özel bireyselleştirilmiş tedavi seçeneklerini sınırlandırmaktadır [4], [5]. Literatürde robot destekli rehabilitasyon sistemleri üzerine yapılan araştırmalar, bu sistemlerin sahip olduğu tekrarlanabilirlik, süreklilik ve ölçülebilirlik özellikleri sayesinde inme sonrası motor becerilerin geri kazanımını ve nöroplastisite oluşumunu kolaylaştırdığını ortaya koymuştur [2], [3]. Ayrıca, robotik rehabilitasyon cihazlarının, fizyoterapistlerin üzerindeki iş yükünü azalttığı ve böylece sağlık bakım maliyetlerini düşürdüğü belirtilmiştir [6], [7]. Özellikle evde kullanıma uygun, düşük maliyetli ve kişiselleştirilebilir robotik rehabilitasyon sistemleri, rehabilitasyonun erişilebilirliğini artırarak daha sürdürülebilir hale getirmektedir [5]. Literatürdeki çalışmalardan MIT-MANUS sistemi omuz ve dirsek eklemleri için tasarlanan bir beş çubuk mekanizması olarak tasarlanmıştır [6].

Rehabilitasyon sırasındaki uzanma hareketleri için tasarlanan bu mekanizma üzerinde yapılan çift kör kontrollü çalışmalarda hem erken dönem hem de geç dönem inme hastalarında omuz ve dirsek motor fonksiyonları ve kas kuvvetinde artış gösterdiği gözlenmiştir. Benzer prensiplere sahip olan ve yine omuz ve ön kol hareketleri için tasarlanmış olan InMotion2, doğrudan tahrikli beş çubuk mekanizması ile birlikte iki boyutta doğrusal serbestlik sunmaktadır [8]. Empedans kontrol sayesinde kullanıcı hareketlerine destek sağlanırken kuvvetleri ve pozisyonları hassas şekilde ölçülebilmektedir. Kronik inme hastalarının Fugl-Meyer skorlarında yaklaşık %5 iyileşme gözlemlenmiş, ayrıca robot tarafından ölçülen parametrelerde belirgin iyileşmeler tespit edilmiştir. Bu sayede InMotion2 sistemi yalnızca mekanik olarak değil aynı zamanda nöroplastisiteyi teşvik etme potansiyeliyle de etkili bir rehabilitasyon çözümü sunmaktadır. MIT Newman Laboratuvarı MANUS yaklaşımını daha da genişleterek omuz ve dirseği destekleyen düzlemsel robotun uç kısmına entegre, üç serbestlik dereceli küresel mekanizmaya sahip bir bilek modülü geliştirmiştir [6]. Bu modüler yapının geri sürülebilir yapısı ile klinikteki etkileşim iyileştirilmekte, kullanıcı istemiyle uyumlu kinematik tepki verebilmekte ve doğal hareket dinamiklerine müdahale edilmemektedir. Cihazın omuz-dirsek ve bilek kombinasyonlu modüler yapısı tüm kolu kapsayan fonksiyonel destek sistemleri açısından önemli bir ilerleyiş olarak değerlendirilmektedir. Bir diğer düzlemsel yapı sistem olarak değerlendirilen ve Heaxel s.r.l. firması (Roma, İtalya) tarafından geliştirilen iCONE, evde uygulanabilir kompakt bir robotik sistemdir [9]. Mekanik olarak, omuz ve dirsek eklemlerinin kontrolünü iki serbestlik dereceli bir robot kol ile sağlamak ve hem aktif hem de pasif terapi modlarını desteklemektedir. İleriye dönük uzanma hareketlerini yönlendiren bu sistemin yapılan pilot çalışmalarında sistemin günlük kullanım entegrasyonunun kolay olduğu, hasta başına ortalama 15 dakikalık kısa oturumlarla dahi anlamlı motor kazanım sağladığı rapor edilmiştir. Koçak ve arkadaşları tarafından geliştirilen PARS, üst kol rehabilitasyonu için düşük maliyetli ve taşınabilir bir yapı sunmaktadır [5]. Sistem, tek serbestlik dereceli ve kullanıcının fleksiyon-ekstansiyon hareketlerini admitans kontrol algoritması

aracılığıyla hassas ve dirençli kuvvet ya da destek kuvvet olarak gerçekleştirmektedir.

Gezgin ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen Watt II tipi altı çubuk mekanizmasının sentezi çalışmasında, inme sonrası el rehabilitasyonu için tek serbestlik dereceli bir mekanizma tasarımı ele alınmıştır [10]. Elin doğal kavrama hareketini taklit etmek üzere Watt II altı çubuk mekanizmasının kinematik sentezinden faydalanılmıştır. İlk devre (loop), girişin tek yönlü sürekli dönüşünde tekrarlayan sürekli kavrama hareketi sağlarken, ikinci devre ise uç noktanın istenen yörüngenin belirli yönelimlerde takip etmesini sağlar.

Bu çalışmada literatürdeki sistemlerin gereksinimleri incelenerek, dört serbestlik dereceli uyarlanabilir alt platform yapısına sahip bir rehabilitasyon robotunun kavramsal tasarımı gerçekleştirilmiş; tasarım sürecinde sistemin kinematik işlevselliğinin yanı sıra bütçe dostu bir yaklaşım benimsenmiştir.

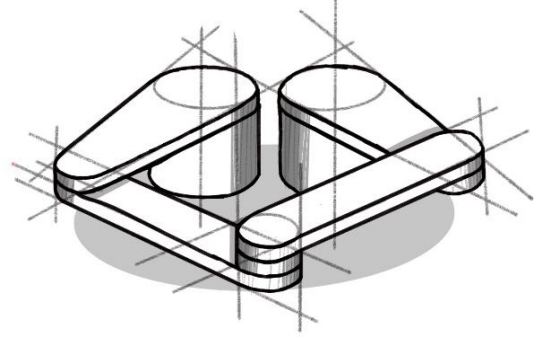
2. YAPISAL TASARIM

Geliştirilen rehabilitasyon sistemi, dört serbestlik dereceli bir mekanik yapıdan oluşmakta ve iki ana sistemden meydana gelmektedir. Kullanıcı ergonomisi ve sistemin kinematik işlevselliğini sağlayacak şekilde sistemin yapısal tasarımı çok kriterli bir yaklaşımla gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle sistemin ihtiyaçları tanımlanmış ve rehabilitasyon uygulamaları için gereksinim duyulan hareket kabiliyeti, mekanizmanın uç noktasında hassas konumlandırma yapılabilmesi, kullanıcıya uygulanan kuvvetlerin tekrarlanabilir, ölçülebilir ve güvenli olması için gerekli kriterler göz önünde bulundurulmuştur.

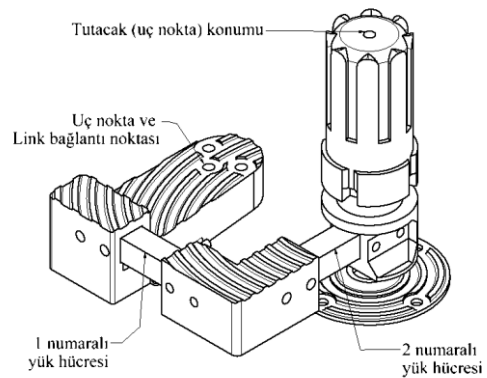
Tasarlanmış olan uyarlanabilir taban üzerine yerleştirilen iki serbestlik dereceli beş çubuk mekanizması için yapılan taslak çizim Şekil 1'de gösterilmiştir. Dikey olarak konumlandırılmış iki adet eyleyici ve rulmanlarla desteklenen beş eklem bölgesi sayesinde uç noktanın istenilen pozisyonlara serbestçe ve zorlanmadan hareketi sağlanmaktadır. Yapısal tasarım aşamasında, mekanik sistemin gereksinimleri ve kısıtlamaları detaylı olarak belirlenmiş olup, ardından kinematik analizleri gerçekleştirilmiştir. Kinematik analiz kısmında ileri ve geri analizleri kapsayan matematiksel

hareket denklemleri geliştirilmiş ve istenilen yapısal ölçümler belirlenmiştir.



Şekil 1. Beş çubuk mekanizması

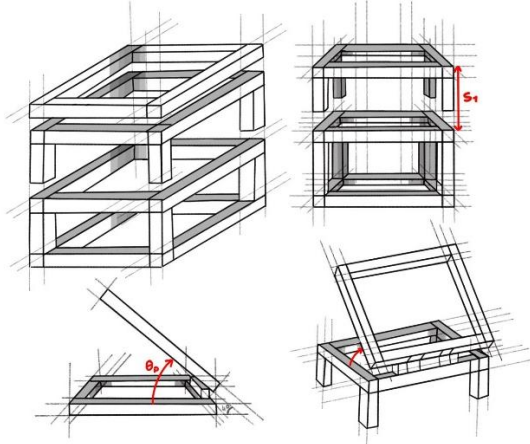
Kuvvet etkileşimi ve istek belirlenmesi için beş çubuk mekanizması üzerine entegre edilecek olan uç nokta tasarımı Şekil 2'de gösterilmiştir. Tasarım, birbirine dik konumlandırılmış iki yük hücresi ile uç noktada yer alan ergonomik bir tutacak içermektedir. Kullanılan motorların geri sürülemez olması dolayısıyla, kullanıcının uyguladığı kuvvetler doğrudan ölçülmekte ve bu verilere göre admitans kontrol aracılığıyla yapılması gereken hareketler ve kullanıcıya uygulanmak istenen yapay geri kuvvet hissi motorlar aracılığıyla oluşturulmaktadır. Böylece hareketin doğruluğu ve tedavi sürecinin ölçülebilirliği sağlanmaktadır. Sistemde düşük maliyetli kuvvet algılayıcıları kullanılmış olup, bu sayede mekanik performans etkin biçimde izlenebilmekte ve sistemin genel verimliliği artırılmaktadır. Bu yaklaşım, literatürdeki benzer sistemlere kıyasla ekonomik bir çözüm sunmaktadır.



Şekil 2. Uç nokta tasarımı

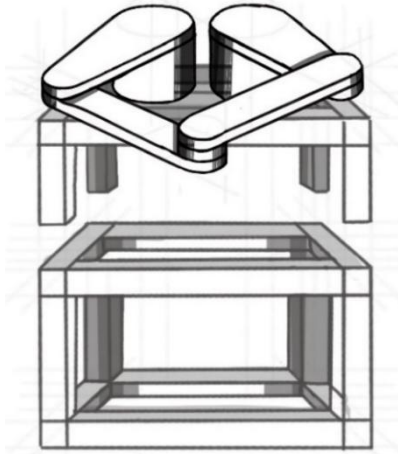
Şekil 3'te gösterilen iki serbestlik dereceli "Adaptif Uyarlanabilir Taban" sayesinde hem kullanıcı ergonomisini artırmak hem de tedavi çeşitliliğini zenginleştirmek amaçlanmıştır. Beş çubuk mekanizmasının yerleştirildiği bu taban, kullanılan iki adet

doğrusal eyleyici sayesinde mekanizmanın hem yüksekliğini hem de uzaydaki eğimini ayarlama imkânı sunmaktadır.



Şekil 3. Uyarlanabilir taban

Sonuç olarak, tasarlanan bu dört serbestlik dereceli mekanizma (Şekil 4), üst ekstremite rehabilitasyonunda ölçülebilir, tekrarlanabilir ve sürekli çalışma imkânı sunarak etkili ve bütçe dostu bir yaklaşım sergilemektedir.



Şekil 4: Manipülâtör ve Uyarlanabilir taban entegrasyonu

3. KİNEMATİK ANALİZ

3.1. Beş Çubuk Mekanizması İleri Kinematik Analizi

Beş çubuk mekanizmasının uç nokta konumunu eyleyici değişkenlerine (θ_2 ve θ_5 , Şekil 4) bağlı olarak hesaplayabilmek için ilk olarak, sistemin kapalı çevrim denklemi yazılır (Denklem 1-3).

$c_i = \cos(\theta_i)$, $s_i = \sin(\theta_i)$ olmak üzere

$$AB + BC = AE + ED + DC \quad (1)$$

$$l_2 c_3 = d + l_1 c_5 + l_2 c_4 - l_1 c_2 \quad (2)$$

$$l_2 s_3 = l_1 s_5 + l_2 s_4 - l_1 s_2 \quad (3)$$

Denklem (2) ve (3)'teki bağımlı değişken θ_3 her iki denklemin kareleri alındıktan sonra toplanarak yok edilebilir. Daha sonra kullanılan yarım açı formülleri ile θ_4 açısı hesaplanarak manipülâtörün uç nokta konumu (Denklem 4-5) kullanılarak hesaplanmaktadır.

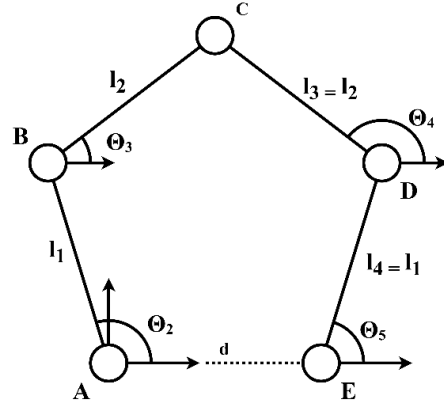
$$C_x = d + l_1 \cos \theta_5 + l_2 \cos \theta_4 \quad (4)$$

$$C_y = l_1 \sin \theta_5 + l_2 \sin \theta_4 \quad (5)$$

3.2. Beş Çubuk Mekanizması Ters Kinematik Analizi

Ters kinematik; bir kinematik zincirin uç noktasını, zincirin başlangıcına göre belirli bir konum ve yönelime yerleştirmek için gereken eyleyici parametrelerini hesaplamaya yönelik matematiksel bir süreçtir.

Ters kinematik çözümünde, Şekil 4'te gösterildiği gibi uç nokta konumu (C) bilinmekte, bu konuma ulaşabilmek için, iki giriş açısı olan θ_2 ve θ_5 açıları hesaplanmalıdır.



Şekil 5. Beş çubuk mekanizması

Denklem (6) üzerinde ilk seri kinematik zincirden elde edilen vektör devre kapanış ifadesi verilmiştir

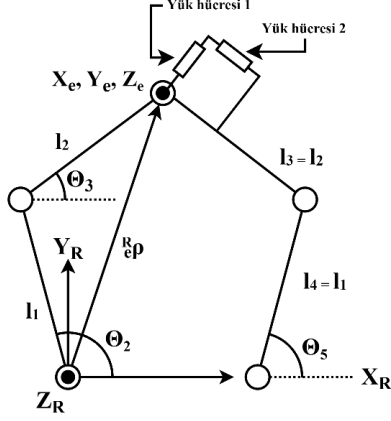
$$AB + BC = AC \quad (6)$$

Denklem (7) üzerinde ikinci seri kinematik zincir için vektör devre kapanış denklemi verilmiştir

$$AE + ED + DC = AC \quad (7)$$

$${}^0_R R = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -c_p & -s_p \\ -1 & -s_p & c_p \end{bmatrix} \quad (16)$$

$${}^0_R T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_p & -s_p & -s_p \cdot s_3 \\ 0 & -s_p & c_p & (s_1 + c_p) s_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$



Şekil 7. Uç nokta ekseninin mekanizma eksenine göre konum vektörü

$${}^0_F = {}^0_R R \quad {}^R F = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(\theta_p) & -\sin(\theta_p) \\ 0 & -\sin(\theta_p) & \cos(\theta_p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^R x^F \\ {}^R y^F \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -{}^R x^F \\ -\cos(\theta_p) \cdot {}^R y^F \\ -\sin(\theta_p) \cdot {}^R y^F \end{bmatrix} \quad (20)$$

Şekil 6'da beş çubuk mekanizması üzerindeki uç nokta (e)'nin, Robot (R) eksenine göre konum vektörü gösterilmektedir. Konum vektörünün '0' eksenine göre ifade edilebilmesi için, tanımlı oldukları Robot (R) ekseninden uygun dönüşümle aktarılmaları gerekir. Uç nokta (e) ekseninin Robot(R)

$${}^0_{e\rho} = {}^0_R T \quad {}^R_{e\rho} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_p & -s_p & -s_p \cdot s_3 \\ 0 & -s_p & c_p & (s_1 + c_p) s_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_e \\ -c_p \cdot y_e - s_p \cdot z_e - s_p \cdot s_3 \\ -s_p \cdot y_e + c_p \cdot z_e + (s_1 + c_p) s_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Kuvvet ve konum vektörlerinin '0' eksenine göre dönüştürülmesiyle, sistemdeki tüm fiziksel büyüklükler ortak bir referans çerçevesinde ifade edilmiştir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, inme sonrası üst ekstremité motor fonksiyonlarının rehabilitasyonla yeniden kazanımı amacıyla dört serbestlik dereceli, beş çubuk mekanizması temelli bir rehabilitasyon mekanizmasının kavramsal tasarımı gerçekleştirilmiş ve kinematik analizleri sunulmuştur. Özgün katkı olarak, iki

Yük sensörlerinden Robot (R) eksenine göre olmak üzere kuvvet vektörleri denklem 18 ve 19'daki gibi elde edilir.

$${}^R_x F = \cos\theta_3 \cdot F_{x_3} - \sin\theta_3 \cdot F_{y_3} \quad (18)$$

$${}^R_y F = \sin\theta_3 \cdot F_{x_3} - \cos\theta_3 \cdot F_{y_3} \quad (19)$$

Kuvvet vektörlerinin '0' eksenine göre ifade edilebilmesi için, tanımlı oldukları robot (R) ekseninden uygun dönüşümle aktarılmaları gerekir. Bu amaçla, Kuvvet vektörlerini "0" eksenine göre dönüştürmek için ${}^0_R R$ dizeyi ile çarpılmalıdır. Dönüşüm işlemi sonucu elde edilen kuvvet vektörü denklem 20'deki gibi hesaplanır

eksenine göre olan konum vektörünün o eksenine göre dönüştürmek için ${}^0_R T$ dizeyi ile çarpılmalıdır. Dönüşüm işlemi sonucu elde edilen konum vektörü denklem 21'deki gibi hesaplanır.

serbestlik dereceli beş çubuk mimarisinin uyarlanabilir taban ile birleştirilmesi ve uç noktada çift eksenli yük hücresi temelli kuvvet algılama—gerçek zamanlı admitans kontrolü ile birlikte—tek bir bütünleşik yapı içinde ele alınmıştır. Literatürde yer alan robotik rehabilitasyon sistemleri incelenmiş ve bu sistemlerin avantajları ve sınırları göz önünde bulundurularak taşınabilir, kullanıcı dostu, kişiselleştirilebilir ve bileşen düzeyinde seçimlerle maliyeti düşürülmüş bir alternatif geliştirilmesi hedeflenmiştir.

İki serbestlik dereceli beş çubuk mekanizması ve uyarlanabilir manipülatör tabandan oluşan

bu sistemin yapısal tasarım sürecinde kullanıcı ergonomisi ile rehabilitasyon verimliliğini artıran ölçülebilirlik, tekrarlanabilirlik ve güvenliğe yönelik gereksinimler detaylı biçimde tanımlanarak fonksiyonel bir prototip kurgulanmıştır. Uç noktaya entegre edilen çift yönlü yük hücreleriyle rehabilitasyon esnasında uygulanan kuvvetlerin hassas ölçümü mümkün kılınmış; motorların geri sürülemez yapıda olması nedeniyle kuvvet sensörleri ve gerçek zamanlı admitans kontrolü zorunlu hâle gelmiştir. Bu seçim, daha pahalı geri sürülebilir aktüatörler yerine sensör–denetim entegrasyonuna dayanarak maliyet/performans dengesini gözetten bir yaklaşım sunar ve tedavi sürecinin objektif verilerle izlenebilirliğini sağlayacaktır.

Kinematik analizlerde ileri ve ters analiz çözümleri sunulmuş; uç nokta konumlarının giriş açılarına bağlı belirlenmesi ve istenen yörünge takibi için gerekli matematiksel altyapı ayrıntılı şekilde kurulmuştur. Bu kapsamda çalışma uzayının görevle ilişkili bölgesinin kapsanması ve teklik bölgelerinin konumlanması tartışılmış, yörünge takibi için gerekli dönüşüm ve türevsel büyüklüklerin hesaplanmasına dayanak oluşturulmuştur; böylece mimarinin hedeflenen rehabilitasyon görevleri için kinematik olarak yeterli olduğu temellendirilmiştir. Ayrıca uyarlanabilir taban yapısının kinematığı analiz edilerek sistemin genel fonksiyonelliğini artıran dönüşüm ve kuvvet hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak önerilen dört serbestlik dereceli rehabilitasyon sistemi; taban–manipülator–kuvvet algılama–admitans kontrolü entegrasyonuna dayalı özgün mekanik/denetim mimarisi, yük hücresi ve standart hazır bileşen kullanımıyla desteklenen düşük maliyetli donanım tercihleri ve ileri/ters kinematik ile uyarlanabilir taban dönüşümlerine dayalı kinematik yeterliliğiyle özellikle evde rehabilitasyon için erişilebilir, etkin ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda sistemin prototipleme, kontrol algoritmalarıyla entegrasyon ve klinik validasyon süreçlerine odaklanılarak kavramsal tasarımın somut bir tedavi aracına dönüştürülmesi hedeflenmektedir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir

6. KAYNAKLAR

- [1] WHO Doğu Akdeniz Bölgesi. (2024). Stroke, Cerebrovascular Accident. <https://www.emro.who.int/health-topics/stroke-cerebrovascular-accident/index.html>, Erişim: 27 Haziran 2025.
- [2] Hong, K. S., Bang, O. Y., Kang, D. W., Yu, K. H., Bae, H. J., Lee, J. S., Heo, J. H., Kwon, S. U., Oh, C. W., Lee, B. C., Kim, J. S., Yoon, B. W. (2013). Stroke statistics in Korea: part I. epidemiology and risk factors: a report from the Korean Stroke Society and Clinical Research Center for Stroke. *Journal of Stroke*, 15(1), 2–20. DOI: 10.5853/jos.2013.15.1.2.
- [3] Topçuoğlu, M. A. (2022). Stroke epidemiology and near future projection in Turkey: analysis of Turkey data from the Global Burden of Disease Study. *Turk J Neurol*, 28(3), 200–211. DOI: 10.4274/tnd.2022.31384.
- [4] Li, J., Wang, S., Wang, J., Zheng, R., Zhang, Y., Chen, Z. (2012). Development of a hand exoskeleton system for index finger rehabilitation. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 25(2), 223–233. <https://link.springer.com/article/10.3901/CJME.2012.02.223>.
- [5] Koçak, M., Gezgin, E. (2022). PARS, low-cost portable rehabilitation system for upper arm. *HardwareX*, 11, e00299. DOI: 10.1016/j.ohx.2022.e00299.
- [6] Hidler, J., Nichols, D., Pelliccio, M., Brady, K. (2005). Advances in the understanding and treatment of stroke impairment using robotic devices. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 12(2), 22–35. DOI: 10.1310/RYT5-62N4-CTVX-8JTE.
- [7] Krebs, H. I., Volpe, B. T., Williams, D., Celestino, J., Charles, S. K., Lynch, D., Hogan, N. (2007). Robot-aided neurorehabilitation: a robot for wrist rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and*

Rehabilitation Engineering, 15(3), 327–335.
DOI: 10.1109/TNSRE.2007.903899.

[8] Di Lazzaro, V., Capone, F., Di Pino, G., Pellegrino, G., Florio, L., Zollo, L., Simonetti, D., Ranieri, F., Brunelli, N., Corbetto, M., Miccinilli, S., Bravi, M., Milighetti, S., Guglielmelli, E., Sterzi, S. (2016). Combining robotic training and non-invasive brain stimulation in severe upper limb-impaired chronic stroke patients. *Frontiers in Neuroscience*, 10, 88. DOI: 10.3389/fnins.2016.00088.

[9] Bressi, F., Campagnola, B., Cricenti, L., Santacaterina, F., Miccinilli, S., Di Pino, G.,

Fiori, F., D’Alonzo, M., Di Lazzaro, V., Ricci, L., Capone, F., Pacilli, A., Sterzi, S., Bravi, M. (2023). Upper limb home-based robotic rehabilitation in chronic stroke patients: A pilot study. *Frontiers in Neurorobotics*, 17, 1130770. DOI: 10.3389/fnbot.2023.1130770.

[10] Gezgin, E., Chang, P. H., Akhan, A. F. (2016). Synthesis of a Watt II six-bar linkage in the design of a hand rehabilitation robot. *Mechanism and Machine Theory*, 104, 303–318. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.023.