

Robot Destekli Pasif Bilek ve Ön Kol Rehabilitasyonu: Dış İskelet Tasarımı ve Uygulanması Robotic Assisted Passive Wrist and Forearm Rehabilitation: Design of an Exoskeleton and Implementation

M.Erkan KÜTÜK¹,

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Gaziantep Üniversitesi,
Gaziantep, Türkiye
mekutuk@gantep.edu.tr

M.Taylan DAŞ², L.Canan DÜLGER³

²Makine Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale Üniversitesi,
Kırıkkale, Türkiye
mtdas@kku.edu.tr

³Makine Müh. Bölümü, İzmir Ekonomi Üniversitesi,
İzmir, Türkiye
canan.dulger@ieu.edu.tr

Özetçe—Bilek ve ön kol rehabilitasyonu için bir dış iskelet tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Günlük yaşam aktiviteleri için gerekli olan tork değerleri göz önüne alınarak yapısal analiz çalışması sunulmuştur. Gerçek insan bilek ve ön koluna uyumlu olması gereken tasarım üç serbestlik derecesine sahiptir. İnsan uzuvlarının anatomik hareket aralıkları tasarım sırasında dikkate alınmış, IMU sensörü uzuvlardaki kinematik verilerin elde edilmesinde ve rehabilitasyonun performans seviyesinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Bilek ve ön kol terapileri denenmiştir. Altı eksenli seri Denso robot rehabilitasyona uyarlanmış, dış iskelet robotla çalışır hale getirilerek deneyler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler — Robotik Rehabilitasyon, Dış İskelet, Bilek ve Ön Kol Rehabilitasyonu, İnersiyal Hareket birimi (IMU), Hareket yakalama.

Abstract—An exoskeleton for human wrist and forearm rehabilitation has been designed and manufactured. Considering the torque values required for daily life activities, a structural analysis study has been presented. It has three degrees of freedom (DOF) which must be fitted to real human wrist and forearm. Anatomical motion ranges of human limbs have been taken into account during design. IMU has been used in order to get the kinematic values of the limbs and to evaluate the performance level of the therapy. Adapting a six DOF Denso robot to rehabilitation has been completed and experiments have been performed.

Keywords —rehabilitation robotics, wrist&forearm rehabilitation, inertial movement unit (IMU), motion capturing, exoskeleton.

I. GİRİŞ

Günümüzde fizyoterapide robotik sistemler hastanelerde ve özel kliniklerde kullanılmaktadır. Rehabilitasyon robotiği ile son yıllarda insan-robot etkileşiminin doğrudan örneklerinin verilebilme ve uygulama alanları, hedef kitle, mekanik tasarım, denetim sinyal ve stratejileri konularında çeşitlilik içermesi araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Robotlar rehabilitasyon sistemlerinde programlanabilme özellikleriyle terapistlerde sınırlı düzeyde olan hız, his, mukavemet ve hareketlerin tekrar edilebilirliği konularında daha başarılı olup fizik tedavi ve rehabilitasyon alanında robotik sistemler medikal tedavi amaçlı kullanılmaktadır. Her hastanın fiziksel özellikleri farklıdır. Dolayısıyla robotların uygulayacakları yürümlerinin de hastalara göre değişkenlik göstermesi beklenen bir durumdur. Yapılan egzersizler aktif ve pasif olmak üzere iki gruba ayrılır. Aktif egzersizlerde denekler uzuvlarını aktif olarak hareket ettirir, tork ve / veya kuvvet uygular. Pasif egzersizlerde ise aktif egzersizlerin aksine, denekler egzersiz sırasında pasif kalırken aktif bir cihaz uzvu hareket ettirir. Bu şekilde Sürekli Pasif Hareket (CPM) üretilir [1]. İnme sonrası açma germe hareketleri bu yolla yapılır. Bu çalışmada pasif egzersizler hedeflenmiştir.

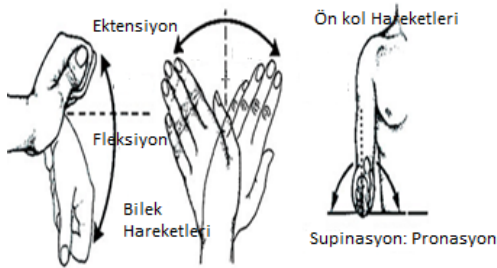
İnsan bileği rehabilitasyonu amacıyla bir robot tasarlanmak istendiğinde, üç döner serbestlik derecesine sahip bir sistem geliştirmek gerekmektedir. Her bir uzuvda bir döner serbestlik derecesi, yarattığı bağımsız

hareket kabiliyetinin yanında sisteme işlevsel olma özelliği de katmaktadır. Yapılan çalışmalardan bazıları temel olarak incelenerek burada anlatılmıştır. RiceWrist-S üç serbestlik dereceli bir sistemdir [3]. Üç serbestlik dereceli bilek ve önkol için kendinden hizalamalı bir dış iskelet tasarımı yapılmıştır [4]. Nu-Wrist üç serbestlik dereceli bilek bölgesinde kendinden hizalamalı bir sistemdir [5]. Son dönemlerde endüstriyel tip robotların rehabilitasyonda kullanıldığı görülmektedir [6].

Sunulan çalışma bir doktora çalışması temelinde gerçekleştirilen, etik kurul izinli bir projedir. Çalışma içeriğinde bir endüstriyel tip robot fizik tedavi rehabilitasyonu alanında kullanılabilir hale getirilmiştir. Uygulamalı ve disiplinler arası bir çalışma yapılmıştır.

II. BİLEK-ÖN KOL HAREKET ÖZELLİKLERİ

Bilek eklemi iki serbestlik derecelidir. Fleksiyon-Ekstansiyon ve Abduksiyon-Adduksiyon hareketleridir. Fleksiyon hareketinde bükülme veya eklem açısının küçülmesi, ekstansiyonda ise gerilme ya da eklem açısının büyümesi söz konusudur. Abduksiyon vücudun orta hattından uzaklaşan yanal hareket olup elin başparmak tarafını önkolun yan tarafına doğru hareket ettirmektir. Adduksiyon ise vücudun orta çizgisine doğru medyal hareket olup elin küçük parmak tarafının önkoldaki orta kısma doğru hareket ettirilmesiyle gerçekleştirilir. Ön kol ise tek serbestlik derecesine sahiptir. Pronasyon ve Supinasyon hareketleri yapılmaktadır. İlgili hareket çiftleri Şekil 1'de gösterilmektedir.



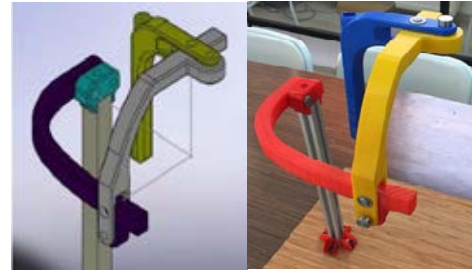
Şekil 1. Bilek-Ön kol Hareketleri [7]

Bileğin anatomik hareket aralığı Adduksiyonda 30°, Abduksiyonda 20°, Ekstansiyonda 60° ve Fleksiyonda 70°'dir. Önkolun Pronasyon Supinasyon hareketlerinin kabul edilebilir sınırlamaları sırasıyla 80° ve 90°'dir [8-9].

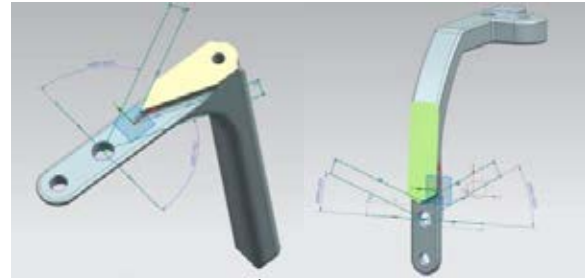
III DIŞ İSKELET TASARIMI

Dış iskeletler rehabilitasyon ve güç yardımı sırasında hastalarla temas eden mekanizmalardır. Segment uzunluğu, anatomik hareket aralığı ve serbestlik derecesi olarak insan vücudu ile uyumlu olmalıdır. Bu çalışmadaki sistem ortalama bir yetişkinine göre tasarlanmıştır. Hareket aralığının istenilen aralıklarda çalışmasını sağlamak ve olası aşırı hareketleri engellemek amacıyla mekanik durdurucular yerleştirilmiştir.

Şekil 2' de dönme eksenlerinin tek noktada (bilek) kesiştiği görülen dış iskelet 3 boyutlu yazıcı yardımıyla üretilmiştir. Üç döner serbestlik derecesine sahip olup, hepsi pasiftir. Ortalama bir yetişkin insanın uzuvlarına uygun olacak şekilde üretilmiştir. Eksen aktivasyonu seri robot yardımıyla sağlanacaktır. Terapi esnasında kullanılmayan eksenler geçici olarak kilitlenebilmektedir. Şekil 3'de anatomik limitler göz önüne alınarak tasarımda eklenmiş mekanik durdurucular görülmektedir.



Şekil 2. Tasarlanan Dış İskelet



Şekil 3. Dış İskelet Sınır Noktaları

V DENSO ROBOT VE DIŞ İSKELET

DENSO VP-6242G 6 döner eksenli bir seri robottur. Kaynak, seç-bırak gibi endüstriyel uygulamaların yanı sıra teleoperasyon, robot destekli cerrahi ve rehabilitation gibi uygulama alanları vardır. Kullanıcılar Matlab/Simulink ortamında denetim kazançlarını kendileri tasarlayabilir ya da QUARC ara yüzü sayesinde denetim kazanç değerlerini ayarlayabilirler [10]. Şekil 4'te Denso Robot ve dış iskelet bütünleştirilmiş halde görülmektedir. Burada dış iskelet dönebilir bir platform üzerinde konumlandırılmıştır. Anatomik hareketlerin tam anlamıyla gerçekleşebilmesi için bu yol kullanılmıştır. Görülen ilk konfigürasyonla FE ve PS hareketleri, ikinci konfigürasyonda ise AA hareketi yapılabilmektedir. Şekil 5'te ise gerçek deneğin dış iskeleti kavrama biçimi ve farklı konfigürasyonlardaki bilek mafsal konumları verilmektedir. İlgili hareket çiftlerinin yapılabilmesi için robot uç işlevcisinin konumu altıncı eksenin bilek noktasına getirilmiştir. Bu sayede robot uç işlevcisinin (roll, pitch, yaw) olarak adlandırılan açıların değiştirilmesi ile Şekil 5'te gösterilen sanal bilek noktası etrafında kartezyen yer değiştirme olmaksızın tüm hareket çiftleri başarıyla yapılabilmektedir. Robot kinematiği ile ilgili konular detaylı olarak irdelenmiştir [11].



Şekil 4. Denso Robot ve Dış İskelet



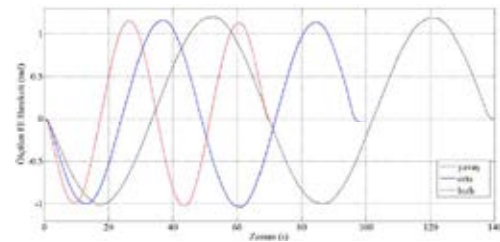
Şekil 5. Tutuş Biçimi ve Bilek Mafsalı Konumları

V. DENSO ROBOT İLE YÖRÜNGELERİN UYGULANMASI

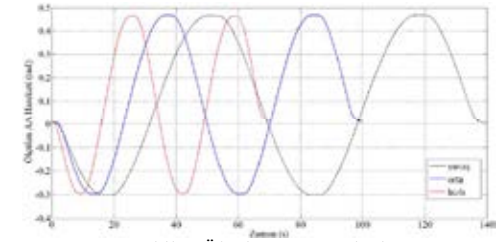
II. bölümün sonunda bahsedilen hareket aralıkları göz önüne alınarak harmonik yörüngeler oluşturulmuştur. Her hasta farklı hızlarda egzersizlere ihtiyaç duyabilir. Bu sebeple her bir hareket çiftinden 'yavaş', 'orta' ve 'hızlı' olmak üzere üçer adet yörünge oluşturulmuştur. Bu yörüngelerin periyodları 70s, 50s ve 35s'dir. Yörüngeler oluşturulan ters kinematik modelde Şekil 5'te gösterilen bilek mafsalları noktasında sadece yönelimi değiştirmek kaydıyla uygulanmıştır. Şekil 6'da sırasıyla FE, AA ve PS hareketleri sırasında alınmış anlık görüntüler verilmiştir. Şekil 4'te turuncu renkte görülen Xsens Mtw Awinda, hareket algılayıcı dış iskelet üzerine yerleştirilmiştir [12]. Dış iskelet üzerinden sensörle alınan FE, AA ve PS açılal konum verileri sırasıyla Şekil 7-9'da sunulmuştur. Grafiklerde görüldüğü üzere istenilen hareketler robottan dış iskelete düzgün bir şekilde iletilmektedir. Grafiklerde düşey eksen radyan olarak belirtilmiştir.



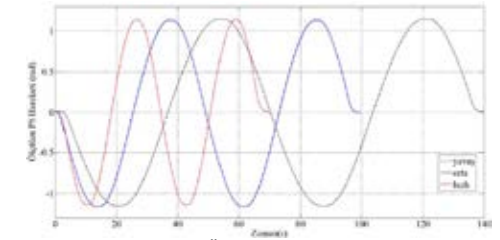
(a) (b) (c)
Şekil 6. Hareketlerin Robotla Uygulanması



Şekil 7. Ölçülen FE Hareketi



Şekil 8. Ölçülen AA Hareketi



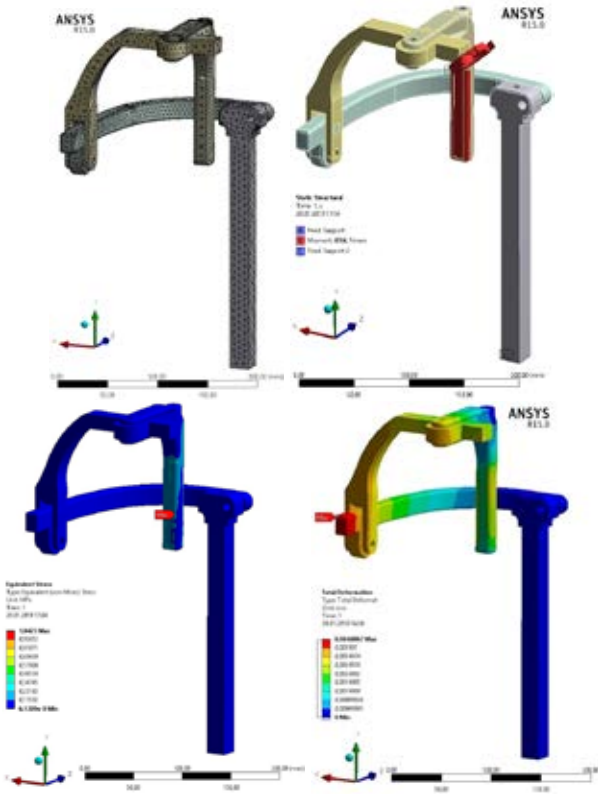
Şekil 9. Ölçülen PS Hareketi

VI. DIŞ İSKELET YAPISAL ANALİZİ

Dış iskeletler yeterli yoğunluk ve sertliğe sahip olmak gibi gereksinimleri sağlamalıdır. Üst ve alt ekstremitelerde dış iskeletlerinin yapısal sorunlarını araştıran çalışmalar yayınlanmıştır [13-14]. Bu çalışmada dış iskelet ve Robot metal bir çubuk yardımıyla birbirine bağlanmıştır. Bu metal çubuk Şekil 5'te deneğin tutmuş olduğu mavi parçanın içinden geçmekte olup, alt kısımdan civatalı bağlantı yapılmıştır.

Dış iskeletin 3 boyutlu yapısal analizi ANSYS ile gerçekleştirilmiştir. ABS-M30 malzemesinin mekanik özellikleri $E = 2.413 \text{ GPa}$ (Elastisite Modülü) ve $\nu = 0.35$ (Poisson oranı) olarak alınmış olup lineer elastik ve izotropik olduğu varsayılmıştır. Her ne kadar dış iskelet dönme mafsalları serbestçe dönebilse de, parçalar arasındaki tüm temaslar bağlı temas olarak tanımlanarak sabit kabul edilmiştir. Dış iskeletin masaya temas noktası

ve deneğin kavradığı parçanın iç yüzeyi de (içinden metal geçtiği için) sabit destek olarak kabul edilmiştir. Maksimum eleman boyutu 5 mm olarak tanımlanmıştır, tüm analizlerde toplam eleman sayısı 27693'tür ve düğüm noktası sayısı 48728'dir. Daha ince bir ağ yapısının sonuçları önemli ölçüde etkilemediği fark edilmiştir. Kavranılan parçanın yüzeyine günlük yaşam aktiviteleri için gerekli tork değerleri, PS, FE ve AA hareketleri için sırasıyla 0.06 Nm, 0.35 Nm ve 0.35 Nm uygulanmıştır [2]. Kavrama noktasına bu değerlerden on kat fazla tork uygulanmıştır. Dış iskeletin ağ yapısı, sınır koşulları, eşdeğer stres ve toplam deformasyon sırasıyla Şekil 10'da gösterilmiştir. Normalden fazla tork uygulanmasına ve dönen parçaların sabit kabul edilmesine rağmen eşdeğer stresin 1.0423 Mpa olduğu görülmüştür. Dış iskeletin zarar görmeye başlaması için bu değer 26 Mpa olması gerekmektedir. Toplam deformasyonun da 4 µm gibi küçük bir değer olduğu görülmüştür.



Şekil 10. Yapısal Analiz Sonuçları

VII SONUÇLAR

Bilek ve ön kol rehabilitasyonunda kullanılmak üzere bir dış iskelet tasarımı yapılmış olup, 6 serbestlik derecesine sahip, Denso Robot ile bütünleştirilerek söz konusu egzersizlerin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Çalışmada endüstriyel tip robot fizik tedavi rehabilitasyon alanında kullanılabilir hale getirilmiştir. Yapılması gereken egzersizlerde terapistlerin yükü hafifleyecek ve yapılan işlemler daha doğru ve verimli gerçekleşecektir. Dış

iskelet tasarımı insan uzuvlarının anatomik aralıkları ve hareket karakteristikleri göz önüne alınarak tamamlanmıştır. Üzerinde bulunan mekanik durdurucular ile hareketlerin kısıtlanıp, serbest hale gelmesi mümkün olmaktadır. Uzayda dönme ve öteleme hareketi yapabilen robotların hareket sağlayıcısı olduğu, uçlarına çıkarılıp takılabilen farklı dış iskeletler ile tek bir robot yardımıyla farklı zamanlarda birden fazla bölgenin rehabilitasyonu mümkün olabilir.

TEŞEKKÜR

Gaziantep Üniversitesi BAP MF 17.03 kodlu projesi ile desteklenmiştir. Fizyoterapist İbrahim Küçükcan'a katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- [1] Maciejasz, P., Eschweiler, J., Gerlach-Hahn, K., Jansen-Troy, A., Leonhardt, S. "A Survey on Robotic Devices for Upper Limb Rehab.", *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 11(3), 2014.
- [2] Pehlivan A., Lee S. and O'Malley M. "Mechanical Design of RiceWrist-S: A Forearm-Wrist Exoskeleton for Stroke and Spinal Cord Injury Rehab.", *4th IEEE RAS EMBS (BioRob)*: 1573-1578, 2012.
- [3] Beekhuis J. H., Westerveld A. J., van der Kooij H. and Stienen A. H. A. "Design of A Self-Aligning 3-Dof Actuated Exoskeleton for Diagnosis and Training Of Wrist and Forearm After Stroke", *IEEE Int. Conf. on Rehabilitation Robotics*, 2013.
- [4] Martinez J., Ng P., Lu S., Campagna M. and Celik O. "Design of Wrist Gimbal: A Forearm and Wrist Exoskeleton for Stroke Rehab.", *IEEE (ICORR)*:1-6, 2013.
- [5] Omarkulov N., Telegenov K., Zeinnullin M. and Tursynbek I. "Preliminary Mechanical Design of NU-Wrist: a 3 DOF Self-Aligning Wrist Rehabilitation Robot", *IEEE (BioRob)*, 2016.
- [6] Sheng B., Xie S., Tang L., Deng C. And Zhang Y. "An Industrial Robot-Based Rehabilitation System for Bilateral Exercises", *IEEE Access*, 7: 151282-151294, 2019.
- [7] Coastal Breeze News, Producing different trajectories, www.coastalbreezenews.com, 2015.
- [8] Gopura, R., Kiguchi, K. "Development of an Exoskeleton Robot for Human Wrist and Forearm Motion Assist", *Int. Conf. on Industrial and Information Systems, Penadeniya, Sri Lanka*, 9-11 August, 2007.
- [9] Schiele, A., van der Helm, F. C. T. "Kinematic Design to Improve Ergonomics in Human machine Interaction", *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 14(4): 456-469, 2006.
- [10] www.quanser.com
- [11] M. Erkan Kütük, PhD Thesis, Trajectory Planning and Implementation for Robot-Assisted Rehabilitation, Gaziantep University, 2019.
- [12] www.xsens.com
- [13] Ding, B., Qian, J., Shen, L., Zhang, Y. "Finite Element Analysis and Optimized Design of Exoskeleton for Lower Extremity Rehab. Training", *Proc. of the 2012 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, 1397-1402, 2012.
- [14] Guo, S., Zhang, F., Wei, W., Guo, J., Ge, W. "Development of Force Analysis based Exoskeleton for the Upper Limb Rehabilitation System", *ICME International Conference on Complex Engineering*, China, 285-289, 2013.