



Bir Ön Çalışma: El ve Bilek Rehabilitasyonu için Mobil Cihaz

A Preliminary Study: Mobile Device for Hand and Wrist Rehabilitation

Oğuz BEDİR

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
İstanbul Medipol Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
obedir@st.medipol.edu.tr

Elif HOCAOĞLU

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
İstanbul Medipol Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
ehocaoglu@medipol.edu.tr

Özetçe—Göreve özgü rehabilitasyon, belirli nörolojik problemleri ele almak için etkili bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Özellikle, hemiparezi ve hemipleji şikayet olan hastaların el ve el bileklerinin iyileşme sürecinde istemli egzersizler etkin rol oynamaktadır. Bu çalışmada, el-el bileği fonksiyonları kısıtlı olan bireyler için tekrarlı çalışan, düşük maliyetli, taşınabilir, kullanımı kolay insan-makine arayüzüne sahip pasif bir rehabilitasyon cihazı tasarlanmıştır. Bu cihaz, fizyoterapistin iş yükünü büyük ölçüde azaltırken, hastalara yüksek motivasyonla terapilerini sürdürmelerini ve aynı zamanda sağlık durumları hakkında nesnel geri bildirim almalarını da sağlamaktadır. Terapiye dayalı görev odaklı sanal gerçeklik oyunlarının önerilen rehabilitasyon cihazına eşlik etmesi sayesinde hastanın dikkati terapi üzerine yoğunlaştırılırken, terapiyi yüksek motivasyonla sürdürmesi sağlanır.

Anahtar Kelimeler — rehabilitasyon cihazları; el ve bilek rehabilitasyonu; el ve bilek fonksiyonları; inme sonrası terapi

Abstract—Task-specific rehabilitation has emerged as an influential approach to address the specific neurological problems. In particular, the recovery of hand and wrist functions of people suffering from hemiparesis and hemiplegia has appeared as a means of voluntary practices. In this study, a passive rehabilitation device has been designed to offer repetitive, low-cost, portable, easy-to-use human-machine interface for people who have limited hand-wrist mobility, also substantially decrease the therapist's workload, and provide motivation and objective feedback to users. Therapy-based task-oriented virtual reality games are also accompanied with the proposed rehabilitation device to raise patient's attention and motivation through the therapy.

Keywords — rehabilitation devices; hand and wrist rehabilitation; hand and wrist functions; after stroke therapy

I. GİRİŞ

İnme, dünya çapında ölüm nedenleri arasında ikinci sırada gelmektedir. Bununla beraber engellilikle geçirilecek yaşam yıllarının üçüncü önde gelen nedenidir [1]. Geçtiğimiz yirmi yılda, her yıl felç geçiren kişilerin sayısı, inme geçirip kurtulanların toplam sayısı ve inmeye bağlı tedavi ihtiyacı artmaktadır [2]. İnme mağdurlarının yarısından fazlası, nöral dokulara verilen hasardan kaynaklanan bir miktar kalıcı hemiparezi veya hemipleji ile karşılaşır. Bu hastalar günlük yaşam aktivitelerini (GYA) bağımsız olarak yapamamakta ve dolayısıyla günlük yaşamda beslenme, kişisel bakım ve hareketlilik gibi temel faaliyetler için insan desteğine ihtiyaç duymaktadırlar [3]. İnme hastalarının yaklaşık % 80'i üst ekstremité parezisinden muzdariptir. Kimi hastalar inme sonrası ilk dört ile altı hafta içinde parmaklarını tekrar hareket ettirmeye başlayabilir, bilek ve parmaklarını aktif olarak kullanma yeteneğini hızla geri kazanabilirler. Bu el fonksiyonunun restorasyonu için güçlü bir belirleyicidir [4]. Zarar görmüş el fonksiyonu serebral palsi ve çoklu skleroz gibi diğer nörolojik hastalıklarda da sık görülür [5]. El işlevi, dünya çapında 300 milyonu etkilediği tahmin edilen semptomatik el artriti gibi romatolojik ve ortopedik durumların bir sonucu olarak da sıklıkla bozulur [6]. Rehabilitasyonla, bu bozukluklar azaltılabilir ve fonksiyonların yeniden kazanımı sağlanabilir. İnme sonrası fiziksel fonksiyonu iyileştirmek için yapılan en önemli müdahalenin fizyoterapist tarafından denetlenen, hızlı ve daha başarılı iyileşme sağlayan, yüksek yoğunlukta, tekrarlanan, görev yönelimli egzersizler olduğu görülmüştür [7]. Araştırma sonuçlarında belirttiği üzere fizyoterapi gerektiren çok sayıda hastaya rağmen, kaynak ve bu kaynaklara erişilebilirlikler kısıtlıdır. Bu nedenle terapi süresi ve dozu yetersiz kalmaktadır [8][9].

Fizyoterapi için gerekli kaynaklara erişilebilirliklerin yetersizliğini giderebilmek, artan hasta sayısı ve fizyoterapi



ihtiyacı ile kaynaklara erişilebilirlikler arasındaki farkı kapatabilmek amacıyla robotik teknoloji alanında çalışmalar yapılmaktadır [10][11]. Rehabilitasyon robotları aracılığıyla klinik müdahalelerden elde edilen mevcut kanıtlar bu robotların hastaların fonksiyonlarının geri kazanımında etkili olduklarını göstermektedir [12-14]. Ancak bahsi geçen rehabilitasyon robotları yüksek maliyetli, hantal, taşınmalarının zor olması ya da mümkün olmaması ve hastadan yüksek seviyede bir başlangıç performansı beklemesi gibi nedenlerle yaygın olarak kullanılamamaktadır. Mevcut rehabilitasyon robotlarının kullanımları özel rehabilitasyon merkezleriyle sınırlı kalmaktadır [18].

El rehabilitasyonu amacıyla geliştirilen AMADEO adlı cihaz, fonksiyonel rehabilitasyonla birlikte hastaya pasif, yarı - aktif ve aktif destek sunabilmektedir. Hastanın terapiye olan ilgisini terapi bazlı sanal gerçeklik oyunları ile canlı tutmaktadır. Ancak, cihazın boyutları nedeniyle kullanımı yalnızca belirli kliniklerle sınırlı kalmaktadır [15]. Benzer bir şekilde, MIT-MANUS robotu, kendisi için geliştirilen aparatlarla birlikte bütün kolun rehabilitasyonunu amaçlamasına rağmen boyutlarından dolayı klinik olarak kullanılmakta ve birçok hasta tarafından erişilememektedir [16]. MusicGlove ise terapi amaçlı yapay gerçeklik oyunu aracılığıyla hastanın ilgisini rehabilitasyon süresince terapiye odaklayan, tüm elin hareketine izin veren, kolay taşınabilir bir cihaz olmasına rağmen, cihazda kullanılan sensörlerin aktivasyonu için hastanın kompleks parmak hareketleri gerçekleştirmesi gerekmektedir. Zaten hali hazırda bu hareketleri gerçekleştiremeyen büyük bir grup hasta bu cihazdan faydalanamamaktadır [17]. GripAble [19] adlı cihaz ise, portatiftir, birçok platformda çalışabilmektedir. Hastadan başlangıç seviyesinde yüksek bir performans beklememektedir. Yüksek hassasiyete sahip olmasının verdiği avantajla hareket kabiliyetinde noksanlık ve nöromotor bozukluğu şikayeti olan hastaların parmaklarının sık sık gerçekleştirdiği çok küçük titreme hareketlerini dahi algıyabilmektedir. Ancak ayrı ayrı her bir parmağın terapisine izin verebilecek şekilde tasarlanmadığından hastanın gelişimsel süreçlerini tek tek parmaklar seviyesinde izlemeye olanak tanımamaktadır. Bunun yanı sıra, cihaz yalnızca parmak fonksiyonlarının tedavisine izin vermekle kısıtlı kalmaktadır.

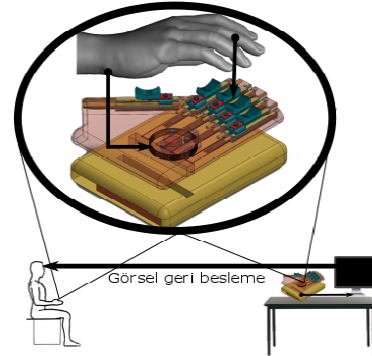
Bu çalışmada el ve bileğin fonksiyonel terapisini amaçlayan, hastanın destek almaksızın tek başına kendi yaşam alanında da kullanabileceği, düşük maliyetli, kullanımı kolay, portatif ve hastanın terapiye bağlılığını ve takibini sürekli kılan bir rehabilitasyon cihazının tasarımı sunulmaktadır. Özellikle her bir parmağın ekstansiyon ve fleksiyon hareketlerinin kazanımına, bileğin ulnar ve radial deviasyonuna ve elin kavrama fonksiyonunun tedavisine yönelik bir rehabilitasyon cihazının tasarımı, bu donanımı tamamlayıcı, tedavi süresince hastanın gelişimsel süreçlerini takip edebilmek ve hastanın ilgisini terapiye odaklı tutabilmek için gerekli, terapi bazlı, görev yönelimli sanal gerçeklik oyunlarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Diğer çalışmalara kıyasla bu çalışma, el parmakları ve el bileğinin tedavisine tek bir cihazla destek olabileme imkanı sağlamaktadır. Buna ek olarak, diğer çalışmalarda parmakların tek tek ekstansiyon ve fleksiyon hareketlerinin ölçümünü sağlayan cihazlar genellikle yüksek maliyetli ve hantaldır. Daha düşük maliyetli ve mobil olan cihazların ise sağladıkları fonksiyonellik yetersiz kalmaktadır.

Önerdiğimiz cihaz, birden fazla fonksiyonu bünyesinde barındırma özelliğinin yanı sıra düşük maliyeti ve kolaylıkla taşınabilme imkanı sağlayan ayırdedici yönleriyle de ön plana çıkmaktadır.

Hem izometrik hem de izotonik egzersizlerin, romatoid artrit gibi hareket bozukluklarından şikayeti olan hastaların ağrı ve hastalık aktivitesini azalttığı, el fonksiyonlarını, el becerisini ve yaşam kalitesini iyileştirdiğinin ve kas gücünü hafif miktarda artırdığının [20] bilinmesiyle birlikte hareket temelli egzersizlerin interphalangeal eklemleri etkinleştirmesinin daha fonksiyonel terapiye olanak sağlaması [21], yapılması planlanmış oyunda bahsedilen, parmakların ekstansiyonu, fleksiyonu ve elin kavrama fonksiyonu çalışmaları ile izometrik ve izotonik egzersizlerin oyuna entegre edilmesi planlanmıştır. Ayrıca, kasların gerilmelerine izin vermek eklemlerde kolajen birikimini ve kontraktürleri azaltabilir [22]. Bunun ötesinde, egzersizler hareket ile gerçekleştiğinde kas içikleri ve golgi tendon refleksi dahil olmak üzere duyu geri bildirim mekanizmalarını güçlendirerek kinestetik yeniden öğrenmeye öncülük etmektedir [20].

II. GEREÇ VE YÖNTEM

Önerilen el ve bilek rehabilitasyon cihazı, elektromekanik cihaz tasarımı ve görev tabanlı sanal gerçeklik oyunlarının tasarımı olmak üzere iki ayrı temel çalışma üzerine kuruludur. Hasta eli Şekil 1'de gösterildiği gibi rehabilitasyon cihazı üzerinde konumlandırılır. Hasta, oyunda tanımlanan görevleri cihazı kumanda etmek suretiyle yerine getirirken el ve bilek aktivitelerinde bulunması sağlanır.



Şekil 1. Hastanın parmaklarının ekstansiyon ve fleksiyon hareketi bilgileri, parmakların kavrama sırasında uyguladıkları kuvvet bilgisi ve bileğin ulnar ve radial deviasyonu hareketi bilgileri cihaz tarafından alınmakta ve bilgisayara aktarılıp işlenmekte, sanal gerçeklik oyun aracılığıyla bilgisayardan görsel geri bildirim yoluyla hastaya dönmektedir.

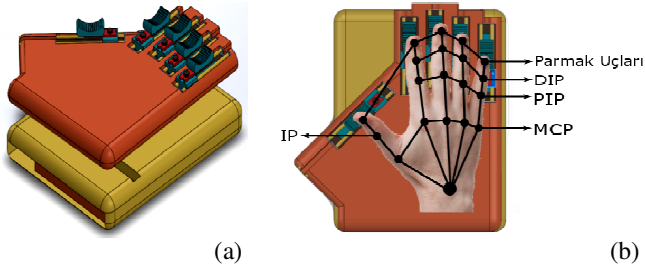
A. Tasarım Kriterleri

Cihaz, parmakların fleksiyon ve ekstansiyonuna, bileğin ulnar ve radial aktivitelerine izin veren, kullanıcılar tarafından kolay adapte olunan, ergonomik, ve taşınabilir özelliklerde olmalıdır.

B. Sisteme Genel Bakış

Günlük yaşam aktivitelerinin gerçekleştirilmesinde büyük role sahip el, bilek, parmak işlevleri hasar görmüş hastalara yetilerinin geri kazandırılması amacıyla tasarlanan cihazın katı

modeli Şekil 2a'da gösterilmektedir. Cihaz, parmak ve bilek işlevlerinin rehabilitasyonundan sorumlu iki ayrı kısımdan oluşmaktadır.



Şekil 2. (a) Elin rehabilitasyon cihazı üzerinde konumlandırılması
(b) Rehabilitasyon cihazının katı modeli

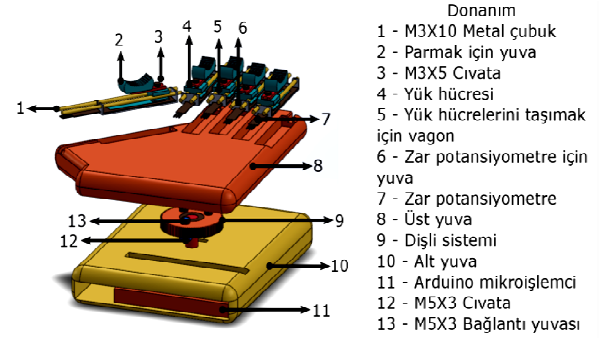
Cihazın üst kısmında herbir parmağın ekstansiyon ve fleksiyonunun birbirinden bağımsız olarak sağlanabilmesi ve parmakların pozisyon, hız ve kuvvet verilerinin ölçümlenebilmesi amacıyla herbir parmağın konumlandırıldığı yuvalar yer almaktadır. Parmak uçlarının yerleştirildiği yuvalar parmak ergonomisine uygun olarak tasarlanmıştır. Yuvalar parmaklar tarafından uygulanan dikey ve yatay kuvvetlerin doğrudan ölçülebilmesi için yük hücrelerine (TAL230 miniature load cell) monte edilmiştir. Herbir parmağın ekstansiyon ve fleksiyon aktiviteleri sırasında pozisyon, hız ve hareket açıklığı bilgilerinin gerçek zamanlı olarak ölçümlenebilmesi için zar potansiyometrelerden (SoftPot Membrane Potentiometre) faydalanılmaktadır. Seçilen zar potansiyometreler hareket bilgilerini 50mm boyunca algılayabilirler. Bu sayede, hastanın parmak uçlarının pozisyonu Şekil 2b'de gösterildiği gibi belirlenebilmektedir.

Cihazın ikinci ana kısmı bileğin ulnar ve radial deviasyonuna ait pozisyon ve hız bilgilerini ölçümlemektedir. Bu kısımda bileğin ulnar ve radial deviasyonuna izin verecek dönel bir mekanizma yer almaktadır. Doğrusal dönen bir potansiyometreye bilek kinematikini ölçümlemek üzere bu kısımda yer verilmiştir. Potansiyometrenin dönüş hassasiyetini iyileştirmek amacıyla bir dişli mekanizması yine bu bölümde yer almaktadır.

Parmaklar ve bileğin aktiviteleri sırasından ölçümlenen veriler gerçek zamanlı olarak Arduino mikroişlemci aracılığıyla işlenmek üzere kaydedilir. Kaydedilen veriler sayesinde hastanın iyileşme süreci takip altında tutulabilecek; hem bireyin, hem fizyoterapistin, hem de doktorun tedavi süreci boyunca objektif bilgiye erişme imkanı mümkün olacaktır.

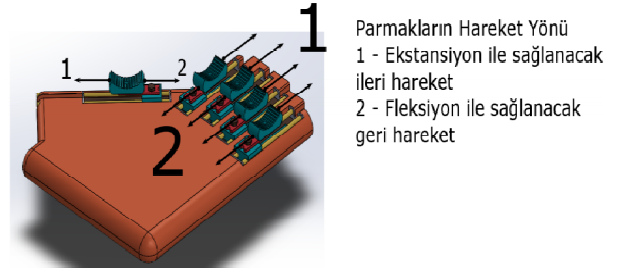
C. El ve Parmak Rehabilitasyonu

Parmakların ekstansiyon ve fleksiyon fonksiyonlarının geri kazanımından sorumlu kısım Şekil 3'te yer alan ayrıntılı görüntüde gösterilmektedir. Üst yuvaya gömülü kızaklar herbir parmağın ekstansiyon ve fleksiyon hareketlerini sağlamaktadır. Üst bölümün tasarlanmasında insan elinin antropometrik verilerinden yararlanılmıştır [23]. Bu veriler baz alınarak hastanın parmaklarını doğal pozisyonunda cihaza yerleştirebilmesi için işaret, orta, yüzük ve serçe parmaklar arasında 6.60mm açıklık bırakılmıştır. Parmakların yerleşebilmeleri için 68mm uzunluğunda açıklıklar oluşturulmuştur. Metakarpofalangeal eklemler arası mesafeler $\pm 15^\circ$ 'dir.



Şekil 3. Mobil cihazın katı modelinin parçalarına ayrılmış görünümü

Herbir kızakta yer alan, uygulanan kuvvetin ölçümünden sorumlu yük hücrelerinin hassasiyeti, bu hücrelerin nominal çıkış değerlerine bağlı olup ($mV/V = 1.7 \pm 0.15$) hastanın parmakları tarafından istemli olarak uygulayabildiği en küçük kuvvetlerle birlikte, hareket bozuklukları ve nöromotor bozukluklardan şikayeti olan hastaların parmaklarında meydana gelen çok küçük titreme hareketlerini dahi algılayabilmektedir.



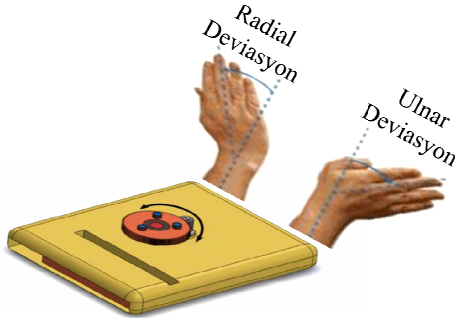
Şekil 4. Parmakların ekstansiyon ve fleksiyonlarının gerçekleştirildiği kızakların hareket serbestliği gösterilmektedir.

Parmakların ekstansiyon ve fleksiyonları Şekil 4'te gösterilen zar potansiyometrelere temas ederek ileri ve geri hareket eden kızaklar aracılığıyla gerçekleşir. Bu potansiyometreler aracılığı ile her parmağın ayrı ayrı ekstansiyon ve fleksiyon hareketlerinin algılanması ve parmakların buldukları pozisyonlar ile birlikte parmakların hareket açıklığı bilgilerinin saptanması amaçlanmıştır. Parmakların ekstansiyon ve fleksiyonları esnasında buldukları pozisyonlarının ve hareket açıklığının belirlenebilmesi amacıyla kullanılacak olan zar potansiyometrelerin aktivasyonu için uygulanması gereken minimum kuvvet $23^\circ C$ 'de 0.6 N olmakla birlikte maksimum kuvvet 1.5 N'dur. Bu sayede hastanın özel bir çaba sarf etmeden sadece parmaklarını, parmaklar için olan yuvalara yerleştirmesiyle parmakların pozisyon ve hareket açıklığı bilgilerinin alınabilmesi mümkündür.

D. Bilek Rehabilitasyonu

Bileğin ulnar ve radial deviasyonunun ölçülmesi için cihazda kullanılacak olan doğrusal dönen potansiyometre aracılığıyla bileğin açılma değişimi ölçümlenir. İnsandan insana değişimle birlikte bir insanın yapabildiği toplam ulnar ve radial deviasyon miktarı yaklaşık olarak 65° 'dir [24]. Bileğin ulnar ve radial deviasyonu cihazın üst kısmından alt kısmında yer alan potansiyometreye Şekil. 5'de gösterilen 1:5 oranında

tasarlanan dişli sistemi aracılığıyla aktarılmakta, böylece potansiyometreden yüksek hassasiyette ölçüm elde edilmektedir. Bileğin ulnar ve radial deviasyonu cihazın kullanımında 0° ile $65^\circ \pm 5^\circ$ arasında sınırlandırılmaktadır.



Şekil. 5. Bilek hareketleri ve dişli sisteminin hareket yönü gösterilmektedir.

E. Terapi Bazlı Görev Yönelimli Oyun Tasarımı

Terapi bazlı görev yönelimli sanal gerçeklik oyununda parmakların hareketine bağlı olarak hastanın oyunda yöneteceği göstergenin dikey eksen boyunca hareketi zar potansiyometrelerden ölçümlenen parmak deviasyonu sağlanır. Hastanın yük hücrelerine uygulayabildiği kuvvetler dahilinde normalizasyonu yapıldıktan sonra belirlenecek eşik değeri geçmesi durumunda, hastanın oyunda yöneteceği gösterge çevreyle etkileşime girer. Bileğin açılma değişimi ise hastanın oyunda yöneteceği göstergenin yatay eksen boyunca hareketinin gerçekleştirmektedir. Hastanın rehabilitasyondan en iyi şekilde yararlanabilmesi için oyunda çeşitli zorluk seviyeleri olması ve hastanın süreci refleksif bir hale getirmesinin önüne geçilebilmesi için oyunda gerçekleştirilecek olaylarda randomizasyon kullanılmaktadır.

III. TARTIŞMA

El ve bilek hemiparezi ve hemiplejisinden muzdarip olan hastaların el ve bileklerinin fonksiyonel kabiliyetlerini geri kazanmalarında el ve bilek rehabilitasyonu kritik bir önem taşımaktadır. Hastaların el ve bilek fonksiyonlarını geri kazanabilmeleri amacıyla düşük maliyetli, portatif, kullanımı kolay, terapi sürecine yardımcı ve bireysel kullanıma uygun robotik cihaz tasarımı ve çalışma prensibi sunulmaktadır. Hastanın terapi süresince motivasyonunun yüksek tutulması, terapiye odaklı tedavinin sağlanması ve tedavi süresince istikrarlı olması için mobil cihazın fonksiyonları ile uyumlu terapi bazlı görev yönelimli sanal gerçeklik oyunu tasarlanmıştır. Çalışmanın kapsamında yer almaktadır. Cihazdan alınacak olan, hastanın parmak hareketleri, parmakların uyguladığı kuvvetler ve bilek rotasyonu verileri aracılığıyla, oyunda hastanın yöneteceği göstergenin hareketi ve oyundaki çevreyle etkileşimi sağlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Lozano R, Naghavi M, Foreman K, et al. "Global and regional mortality from 235 causes of death for 20 age groups in 1990 and 2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010". The Lancet. 2012;380(9859):2095–2128.
- [2] Feigin VL, Forouzanfar MH, Krishnamurthi R, et al. "Global and regional burden of stroke during 1990–2010: findings from the global burden of disease study 2010". The Lancet. 2014;383(9913):245–255.

- [3] Miller E., Murray L., Richards L., et al. "Comprehensive overview of nursing and interdisciplinary rehabilitation care of the stroke patient: a scientific statement from the American Heart Association". Stroke. 2010;41:2402–2448.
- [4] Smiana N, Paolucci S, Tinazzi M, et al. "Active finger extension: a simple movement predicting recovery of arm function in patients with acute stroke". Stroke. 2007;38:1088–1090.
- [5] Mace M, Rinne P, Liardon J, Uhomobhi C, Bentley P, and Burdet E. 2017. "Elasticity improves handgrip performance and user experience during visuomotor control". Royal Society Open Science, 4:160961.
- [6] Zhang Y, Niu J, Kelly-Hayes M, Chaisson CE, Aliabadi P, Felson DT. 2002 "Prevalence of symptomatic hand osteoarthritis and its impact on functional status among the elderly: the Framingham Study". Am. J. Epidemiol. 156, 1021–1027.
- [7] Lohse KR, Lang CE, Boyd LA. "Is more better? Using metadata to explore dose-response relationships in stroke rehabilitation". Stroke. 2014;45(7):2053-8.
- [8] N. report, "Stroke rehabilitation: Long-term rehabilitation after stroke" 2013. [Online]. Available: <http://www.nice.org.uk/guidance/cg162>
- [9] Bernhardt J, Chan J, Nicole I, Collier JM. "Little therapy, little physical activity: rehabilitation within the first 14 days of organized stroke unit care". J Rehabil Med. 2007; 39(1): 43-8.
- [10] Balasubramanian S, Klein J and Burdet E. "Robot-assisted rehabilitation of hand function". *Curr Opin Neurol* 2010; 23: 661-670.
- [11] Maciejasz P, Eschweiler J, Gerlach-Hahn K, et al." A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation". J Neuroeng Rehabil 2014; 11:3.
- [12] Norouzi-Gheidari N, Archambault PS and Fung J. "Effects of robot-assisted therapy on stroke rehabilitation in upper limbs: systematic review and meta-analysis of the literature". J Rehabil Res Dev 2012; 49: 479-496.
- [13] Kwakkel G, Kollen BJ and Krebs HI. "Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: a systematic review". Neurorehabil and Neural Repair 2008; 22: 111-121.
- [14] Krebs HI, Saitoh E and Hogan N. "Robotic therapy and the paradox of the diminishing number of degrees of freedom". Phys Med Rehabil Clin 2015; 26: 691-702.
- [15] Sale PI, Lombardi V, Franceschini M. "Hand robotics rehabilitation: feasibility and preliminary results of a robotic treatment in patients with hemiparesis". Stroke Res Treat. 2012;2012:820931.
- [16] Aisen ML, Krebs HI, Hogan N, McDowell F, Volpe BT. "The Effect of Robot-Assisted Therapy and Rehabilitative Training on Motor Recovery Following Stroke". Arch Neurol. 1997;54(4):443–446.
- [17] N. Friedman, V. Chan, A. N. Reinkensmeyer, A. Beroukhim, G. J. Zambrano, M. Bachman, and D. J. Reinkensmeyer, "Retraining and assessing hand movement after stroke using the MusicGlove: comparison with conventional hand therapy and isometric grip training", *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 11, no. 76, pp. 1-14, 2014.
- [18] Wagner TH, Lo AC, Peduzzi P, Bravata DM, Huang GD, Krebs HI, et al. "An economic analysis of robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke". Stroke. 2011; 42(9):2630-2.
- [19] Mace M, Rinne P, Liardon J, Bentley P, and Burdet E., "Comparison of flexible and rigid hand-grip control during a feed-forward visual tracking task", ICORR, 2015.
- [20] B. Dogu, H. Sirzai, F. Yilmaz, B. Polat, and B. Kuran, "Effects of isotonic and isometric hand exercises on pain, hand functions, dexterity and quality of life in women with rheumatoid arthritis," *Rheumatology International*, vol. 33, pp. 2625-2630, 2013
- [21] A. Sangole and M. Levin, "Palmar arch dynamics during reach-to-grasp tasks," *Experimental Brain Research*, vol. 190, no. 4, pp. 443-452, 2008.
- [22] D. De and E. Wynn, "Preventing muscular contractures through routine stroke patient care," *British Journal of Nursing*, vol. 23, no. 14, pp. 781-786, 2014.
- [23] Dreyfuss, H. (1955). Designing for people. New York, NY: Simon and Schuster.
- [24] Unver, B., Gocen, Z., Sen, A., Gunal, I., & Karatosun, V. (2004). Normal Ranges of Ulnar and Radial Deviation with Reference to Ulnar Variance. *Journal of International Medical Research*, 32(3), 337-340.