

Egzersiz Eğitmeni Robotu İçin Hareket Takliti

Gesture imitation for a robotic fitness coach

Binnur Gorer, Albert Ali Salah, H.Levent Akın
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Boğaziçi Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
Email: binnur.gorer,salah,akin@boun.edu.tr

Özetçe —evre destekli yaşama ortamlarının amacı gerekli yardımcı araçların bir araya getirilmesi ile oluşturulan akıllı teknolojiler ile yaşlı kişilerin kendi evlerinde sağlıklı bir yaşam sürdürmesinin sağlanmasıdır. Bu bildiride, bahsedilen teknolojinin bir parçası olarak geliştirilmesi hedeflenen, yaşlı kişilere günlük egzersiz hareketlerinde yardımcı olacak egzersiz eğitmeni robotu anlatılmaktadır. Bu robot eğitmen önce bir dizi egzersiz hareketini profesyonel egzersiz eğitmenlerinden öğrenecek ve daha sonra yaşlı kişilere bu egzersiz hareketlerini yapmaları sırasında yardımcı olacaktır. Robotun yapması planlanan egzersiz hareketleri gerçek dünya ile en st seviyede benzerlik taşıması açısından bir huzur evinde gerçekleştirilen toplu egzersiz seansları sırasında sergilenen hareketlerden seçilmiştir. İnsan eğitmeden RGB-D kamera yardımı ile öğrenilen hareketlerin robota aktarılması sırasında insan ve robotun fiziksel yapılarının aynı olmamasından kaynaklanan eşleştirme problemi robotun fiziksel dengesini bozmadan öğrenilen hareketlerin karakteristiğinin en az seviyede bozulması olarak modellenip bir eniyileme problemi olarak çözülmüştür.

Anahtar Kelimeler—Robotik; Yaşlı Kişiler İçin Ortam Destekli Yaşama; Taklit Ederek ğrenme.

Abstract—The ultimate goal of ambient assisted living is to help elderly people live a healthy life in the convenience of their homes by making more intelligent technology bring them a set of required assistive tools. In this paper we describe a robotic fitness coach that helps elderly people in their daily exercise activities. The robotic fitness coach learns a set of physical exercises from a professional trainer, and assists elderly subjects in performing these gestures. The gestures were selected from an actual training programme at an elderly care home in order to create a real world scenario. We optimize a function that combines robot stability and appearance similarity in order to find the best mapping from the trainers gesture, observed by an RGB-D camera, to the gesture performed by the robot to solve the mapping problem between human and robot which stems from the embodiment differences.

Keywords—Robotics, Ambient Assisted Living Environments for Elderly, Imitation Learning.

I. GİRİŐ

evre destekli yaşama kavramı yaşlı kişilerin evlerinde sürekli bir sağlık personelinin gözetimi altında olmadan, akıllı teknolojiler yardımı ile yüksek standartlı bir yaşam sürbilmeleri için harcanan çabayı özetleyen bir kavramdır [1].

Burada asıl amaç, yaşlılığın getirdiği fiziksel ve sosyal olumsuz etmenlerin kişilerin yaşam standartları üzerinde yarattığı düşüşün insan müdahalesini en aza indirecek şekilde akıllı teknolojilerin ürünleri kullanarak engellenmesidir. Öncelikli hedef kişinin hem fiziksel hem de zihinsel açıdan sağlıklı bir yaşlılık süreci geçirmesi olduğu için düzenli olarak yapılması gereken egzersiz etkinlikleri evre destekli yaşama kavramında önemli bir yer tutmaktadır.

Fiziksel egzersiz hareketlerinin yaşlı kişilerin kan basıncının düzenlenmesi ile birlikte kalp sorunlarına, şeker hastalığına ve yağ oranının artmasının önlemesine yararlı olduğu bilinmektedir [2]. Bunların yanı sıra kas ve kemik yapısının güçlenmesine, nörobilişsel fonksiyonların iyileştirilmesine de yardımcı olmaktadır [3]. Hastane ortamında yapılan fiziksel rehabilitasyon çalışmalarının kişilerin evlerinde bir sağlık personelinin gözetimi altında olmadan yaptıkları egzersiz etkinliklerinden daha etkili olduğunu gösteren bazı bulgular olmasına rağmen [4], akıllı yaşama ortamları ile bu farkın kapatılması amaçlanmaktadır.

Bu bildiride öncelikli amacı yaşlı kişilerin zihinsel zinde deliğinden daha çok fiziksel olarak zinde kalmasına yardımcı olacak bir robot egzersiz eğitmenin tasarımı anlatılmaktadır. İnsan eğitmenler kişilere egzersiz hareketleri yaptırmanın yanında onların bu etkinlikleri sırasındaki fiziksel ve psikolojik durumlarını da gözlemleyip sağlıklarına hiçbir şekilde zarar vermeyecek, kişiye özel bir eğitim programı belirlemeye çalışmaktadırlar. Fakat bu süreç řu anki robotik sistemlerin yapabileceklerinden çok daha fazlasını kapsadığı için bu çalışmada önerdiğimiz robot eğitmenin en temel görevi insan eğitmeden öğrendiği bir dizi egzersiz hareketini yaşlı kişinin en başarılı şekilde tekrarlayabilmesine yardımcı olmasıdır. Egzersiz hareketlerinin düzenli ve uzun vadeli yapılması gerektiği için bu süreçte robotun yaşlı kişiyi gözlemleyerek performans değerlendirmesi yapması ve motivasyonu artırmak için eğlenceli bir arkadaşlık kurması önerdiğimiz sistemin ek özellikleri arasında öngörülmektedir.

Önerilen sistem temel olarak iki farklı aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, robot insan eğitmenin gösterdiği egzersiz hareketlerini taklit ederek öğrenecek ve ikinci aşamada da kendi fiziksel yetenekleri dahilinde bu hareketleri yaşlı kişiye gösterecektir. Yaşlı kişi robotla beraber egzersiz hareketlerini tekrarlarken robot performans değerlendirmesi yaparak kişinin

hareketleri doğru yapabilmesi için ona geri bildirimde bulunacaktır. Çok fazla sayıda hareket konfigürasyonu bulunduğu için bu hareketlerin statik olarak kodlanması pratik bir yöntem değildir ve bunun için öğrenme yöntemleri kullanılmıştır. Robotun hareketleri öğrenmesindeki zorluklardan biri, bu hareketler için iyi bir gösterim biçimi bulunmasıdır. Bunun için son zamanlarda robot sistemlerinde sıklıkla kullanılan RGB-D kameradan faydalanılmıştır. Diğer bir problem ise robotun ve insanın farklı fiziksel yapıya sahip olmasından kaynaklanan eşleştirme sorunudur. İnsandan gözlenen hareketler robota aynen aktarılamadığı için robotun kendi dengesini bozmadan ve fiziksel becerileri dahilinde hareketi tekrarlaması gerekmektedir. Buradaki performans ölçütü robotu izleyen kişinin sergilenen hareketi ne kadar doğru algıladığıdır.

II. bölümde bu konu ile ilgili yapılmış çalışmalar-
dan bahsedilmekte, III.bölümünde bizim yaklaşımımız ve yöntemimizin ayrıntıları verilmektedir. IV. bölümünde ise geliştirmekte olduğumuz sistemin ilk sonuçları ile ilerisi için planlanan çalışma özetlenerek bildiri sonlandırılmaktadır.

II. ROBOT EGZERSİZ EĞİTMENİ

Yaşlı kişilere günlük işlerinde yardımcı olması için tasarlanan çok sayıda robotik sistem bulunsa da fiziksel egzersiz uygulaması için yapılmış sistemlerin sayısı görece daha azdır. Bu amaç için tasarlanmış sistemlerin birçoğu ya insan şeklinde bir görünüme sahip değildir [5] ya da insanlarla iletişime geçilebilmek için sosyal açıdan yeterli düzeyde bulunmamaktadır. Geue ve diğerlerinin egzersiz eğitmeni uygulaması için geliştirdikleri sistemde Pioneer robotunun üstüne monte edilen tablet bilgisayardan faydalanılmıştır [6]. Egzersiz hareketleri tablet bilgisayar üzerinde gösterilmekte olup kullanıcıya belirli aralıklarla sorulan sorularla sistemin kendini kişiye uyarlaması amaçlanmıştır. Bilgisayar ortamında yaratılan iki boyutlu ya da üç boyutlu karakterler ile egzersiz hareketlerin temsil edilmesi görsel açıdan ne kadar gerçekçi bir his yaratsa da elle tutulabilen, fiziksel bir insansı robotun sosyal yetenekleri ile kullanıcıyı motive edebilmesi gibi özelliklerden yoksun olmaktadır. [7] de geliştirilen sistemde ise tekerlekli bir taban üstünde insansı gövdeye sahip 19 serbestlik derecesi olan bir robot kullanılmıştır. Bu çalışmada öncelikli hedef robotun sosyal yeteneklerinin insanla olan ilişkisini nasıl etkilediğini ve insanın bu duruma karşı nasıl tepki verdiğini değerlendirmesidir. Örneğin yaşlı kişinin performansına göre robotun sadece olumlu geri bildirimde bulunmasının kişinin motivasyonunu nasıl etkilediği yaşlı kişilerle yapılan deney sonuçlarına göre tartışılmaktadır. Fakat bu robot tekerli bir yapıya sahip olduğu için çalışma sadece oturularak yapılan egzersiz hareketlerini kapsamaktadır.

III. YÖNTEM

A. Sistem Düzenegi

Çalışmamızda Nao insansı robotunu, RGB-D kamera olarak Kinect algılayıcısı kullanılmıştır. Algılayıcıdan gelen verinin işlenmesi ve robota aktarılması sırasında Robot İşletim Sisteminden(ROS) yararlanılmaktadır.

B. İnsan Hareketlerinin Taklit Edilmesi

İnsan eğitmenin gösterdiği hareketleri robotun yapabilmesindeki en büyük zorluk farklı anatomik yapıya sahip



Şekil 1. İnsan eğitmenden hareketlerin öğrenilebilmesi için Nao robot ve Kinect algılayıcısından kurulan deney düzenegi

olmalarından kaynaklanan eşleştirme sorunudur. Robotun eklemlerinin serbestlik derecesi insana göre daha azdır ve her bir eklem alabileceği maksimum ve minimum açı değerleri de insana göre farklılık göstermektedir. Robotun insanın gösterdiği her hareketi yapabilmesi mümkün olmadığı gibi yapabileceği hareketler için de insandan alınan verinin bir takım ön işlemlerden geçtikten sonra robota aktarılması gerekmektedir.

Bizim yaklaşımımızda insanın sergilediği hareketleri bu sırada vücut açılarının aldığı değerler temsil etmektedir. Bu açı değerleri OpenNI SDK'sını ve Kinect'in derinlik haritalarını kullanarak elde edilmektedir. API aracılığı ile her bir video karesi için insan iskeletinin 17 eklemine aldığı açıları saptamak mümkündür. Biz bunların arasından baş, omuz, dirsek, bilek, kalça, diz ve ayak açılarını kullanıyoruz.

Hareketlerin ne kadar başarılı taklit edildiğini gösteren iki performans ölçütünden birincisi robotun hareketi insana ne kadar benzer yapabildiğidir. Her egzersiz hareketinde çalıştırılması amaçlanan belirli kas grubu ya da eklem bölgesi olduğu için robot tarafından tekrarlanan hareketin o bölgedeki açı konfigürasyonunu insana maksimum benzerlikte yapabilmesi hareketin faydalı olabilmesi için önemlidir. Fakat bunun için hareketlerin uzman bir kişinin eşliğinde yapılması ve açımlanması gerekmektedir. Diğer bir seçenek ise aynı hareketin birçok defa tekrarlanması ve en az varyansa sahip açı grubunun hareketin zorunlu kısmı olarak düşünülmesidir. Bunun için yine bu işlemin farkında olan uzman bir kişinin yardımına başvurulması gerekmektedir. Bu sebeple ilk aşamada bizim benzerlik ölçütümüz insanın her bir açı değeri ile robotun karşılık gelen açı değerlerinin arasındaki farkların çarpımının en az düzeye indirilmesidir.

Diğer performans ölçütü ise robotun hareketi yaparken dengesini koruyabilmesindeki başarısıdır. Bütün vücudu kullanarak yapılan hareketlerde denge sorunu kısıtlayıcı bir faktör olduğu için bazı açı değerlerinden vaz geçerek dengeyi sağlamak gerekebilmektedir. Özellikle tek ayak üstünde durularak yapılan bacak salınım hareketlerinde gövdeyi, üzerinde durulan bacağa doğru eğme gibi asıl harekete ek yardımcı değişiklikler yapılması gereklidir. Üst vücut hareketlerinde bu sorun olmadığı için tekrarlanması çok daha kolaydır. Bu sebeple tüm sistem üst vücut hareketlerinin ve bütün vücut hareketlerinin taklit edilmesi olmak üzere iki alt başlıkta anlatılmaktadır.

1) *Eklem pozisyonlarından açı değerlerinin hesaplanması:* OpenNI SDK'sı yardımı ile insanın derinlik haritasına oturtulan ve takip edilen iskeletten yukarıda bahsedilen eklemelerin üç boyutlu uzaydaki pozisyonlarını almak mümkündür. Kemiklerimizi iki eklem arasında oturtulmuş bir vektör olarak düşüdüğümüzde bu vektörün üç boyutlu uzayda XY-XZ-YZ düzlemleri ile yaptığı açı vektörün başlangıç noktasında bulunan eklemün sahip olduğu açı değerlerini göstermektedir. V iki eklem arasındaki vektörü gösterdiğinde

$$\phi = \arccos(|V|/|Proj(V_x)|)$$

$$x \in \{XY, YZ, XZ\}$$

bu vektörün açısı hesaplanmak istenen düzlemdeki izdüşümü ile kendisinin skalar uzunluğunun bölümünün ters kosinüs fonksiyonu bize istenilen açı değerini vermektedir.

Dirsekler arasındaki açıyı hesaplamak istediğimizde elimizde omuzla dirsek arasında bir vektör $V1$ ve dirsek ile bilek arasındaki diğer bir vektör $V2$ bulunmaktadır. Bu açıyı bulmak için ise

$$\theta = \frac{V1 \cdot V2}{|V1| \cdot |V2|}$$

denklemleri kullanılmıştır. * operatörü vektörlerde skalar çarpımı ifade etmektedir.

Dizler arasındaki açıyı bulmak için de aynı denklem kullanılmıştır.

2) *Açı değerlerinin ön işlenmesi:* RGB-D kamera yardımı ile alınan iskelet verisinin gürültülü olması sebebi ile bazı video karelerinde eklemün pozisyonu yanlış ya da tamamıyla işe yaramaz değerler olarak alınabilmektedir. Bu durumlarda hesaplanan açı değerlerinin de robotun donanımının hasar görmemesi ve çok ani denge kayıplarına sebep olmaması için filtrelenmesi gerekmektedir. Bu sebeple aşağıda belirtildiği gibi basit bir Kalman filtresi uygulanmıştır.

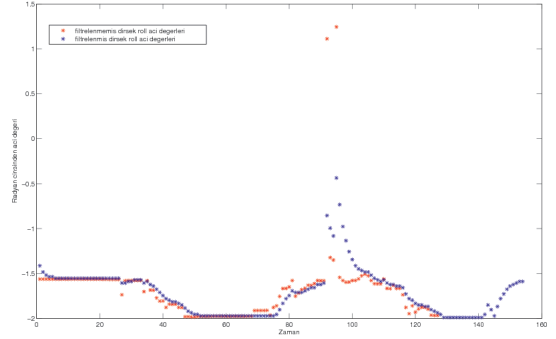
$$\begin{aligned} p &= p + q; \\ k &= p / (p + r); \\ x &= x + k * (m - x); \\ p &= (1 - k) * p; \end{aligned} \quad (1)$$

p tahmin hatası varyansını, q işlem gürültüsü varyansını, r ölçme gürültüsü varyansını, k Kalman kazanımı, x önerilen değeri, m ise gözlenen açı değerini temsil etmektedir. Şekil 2 de görüldüğü gibi filtrelenmiş veri algılayıcısının gürültüsünü azalttığı gibi robotun hareketleri için daha yumuşak bir yörünge elde etmeye olanak da sağlamaktadır.

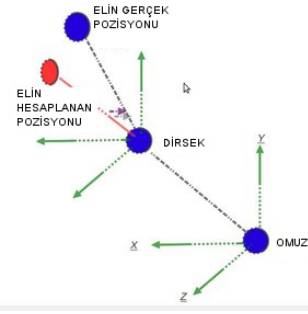
Bir diğer ön işlem ise robotun fiziksel sınırlarına göre gerekli kısıtlamaları yapılmasıdır. Filtrelenmiş açı değerleri robotun eklemün alabileceği en büyük değerden daha fazla olması halinde en büyük değere, en az değerden küçük olması halinde en az değere ayarlanmaktadır.

3) *Üst Vücut Hareketlerinin Taklit Edilmesi:* Nao robotunun kolu 2 tane omuzda ve 2 tane dirsekte olmak üzere 4 serbestlik derecesine sahiptir. İnsan da omuzda 3, dirsekte 1 olmak üzere 4 serbestlik dereceli bir kola sahiptir. Bu farklılıktan dolayı insandan robota doğrudan bir aktarım başarılı sonuçlar vermemektedir.

Bu sorunu çözebilmek için düz ve ters kinematik yöntemleri birlikte kullanılmıştır. İnsanın ve robotun aynı olan



Şekil 2. Dirsek yuvarlanma açı değerinin filtrelenmiş ve filtrelenmemiş değerleri



Şekil 3. Robot kolunun çubuk şekil gösterimi

omuz sapma ve yuvarlanma açıları ile dirsek yuvarlanma açısı iskelet verisinden hesaplanan açı değerlerine aynen ayarlanmıştır. Bu açı değerleri ile robotun elinin, omuzunu orijin kabul eden üç boyutlu uzaydaki konumu düz kinematik yöntemi ile hesaplanmıştır. Bulunan bu xyz koordinatının insanın elinin kendi omuzunu orijin kabul eden üç boyutlu uzaydaki koordinatı robotun ve insanın uzuv uzunlukları ile normalize edilerek karşılaştırılmıştır. Aradaki farkı kapatmak için gerekli robot dirsek yuvarlanma açısı ters kinematik yöntemi ile hesaplanmıştır. Kinematik yöntemlerinde Tablo I'de gösterilen Denavit-Hartenberg parametreleri kullanılmıştır. j_1, j_2, j_3 ve j_4 sırasıyla omuz sapma, omuz yuvarlanma, dirsek yuvarlanma and dirsek yuvarlanma açılarını sembolize etmektedir. L_1 robotun üst kol ve L_2 robotun alt kol uzunluğunu göstermek için kullanılmıştır.

4) *Tüm Vücut Hareketlerinin Taklit Edilmesi:* Robotun statik olarak dengede kalabilmesi için ağırlık merkezinin, yere basan ayakların yere değme noktalarının oluşturduğu dışbükey örtünün içinde kalması gerekmektedir. İki ayaklı robotlarda bu poligonun yüzey alanı yere basan ayak sayısı ile kritik bir şekilde etkilendiği için denge problemi daha zor bir hal

Tablo I. ALDEBARAN NAO İNSANSI ROBOTUNUN SAĞ KOLU İÇİN HESAPLANMIŞ DENAVIT-HARTENBERG PARAMETRELERİ.

i	α_i	a_i	Θ_i	d_i
1	$-\pi/2$	0	j_1	0
2	$\pi/2$	0	$\pi/2 + j_2$	0
3	$\pi/2$	0	$\pi + j_3$	L_1
4	$\pi/2$	0	$\pi/2 + j_4$	0
5	$-\pi/2$	L_2	0	0

almaktadır. Bizim yaklaşımımızda insandan aldığımız açıları robota en az değişiklikle aktarmaya çalışırken robotun dengecinin bozulmaması ve robotun eklemlerinin alabileceği açı değerlerinin belirli alt ve üst limitlerinin olması bir optimizasyon problemi olarak modellenip çözülmeye çalışılmıştır.

Robotun ağırlık merkezi robotun herhangi bir algılayıcı değerini kullanmaksızın robota gönderilen açı değerleri ile hesaplanmaktadır. Düz kinematik yöntemleri ile her bir uzvun üç boyutlu uzayda gövdeye göre konumları bulunarak o uzvun ağırlığı ile çarpılmaktadır. Tüm uzuvların ağırlık merkezlerinin toplamı ise robotun ağırlık merkezini vermektedir. RGB-D kameradan alınan ayak konumlarından hareketin hangi ayak üzerinde yapıldığı da saptanmaktadır. Buna göre robotun destek poligonu hesaplanıp ağırlık merkezini bu poligonun içine düşürmek için gereken en az açı değişiklikleri hesaplanmaktadır. Yere basan ayağın bilek sapma açısı ayağın yere koşut olabilmesi için kalça sapma ve diz sapma açısına göre hesaplanması gerektiği için ayrı bir koşul denklemi olarak Denklem 2'de gösterilen optimizasyon koşuluna eklenmiştir.

$$\begin{aligned} \min |A_h - A_r| \quad & s.t. \\ \sigma(A_r) & \in P(A_r), \\ A_r^j & \in [A_{min}^j \dots A_{max}^j], \quad \forall j = 1 \dots J, \\ \phi_{bilekSapma} & = -\phi_{dizSapma} - \phi_{kalcaSapma}, \end{aligned} \quad (2)$$

Optimizasyon sisteminin amaç fonksiyonu robota gönderilen açı değerleri (A_r) ile insandan alınan açı değerleri (A_h) arasındaki farkı en aza indirmektir. Bu fonksiyon robotun her bir açısı ile insanda karşılık gelen açının mutlak farkının çarpımları olarak modellenmiştir. $\sigma(A_r)$ değişkeni robotun ağırlık merkezini, $P(A_r)$ ise yere basan ayakların oluşturduğu destek poligonunu temsil etmektedir. Her iki değişken de robotun açı değerlerinin fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır. Robotun toplamda sahip olduğu J tane eklemin her birinin $j = 1 \dots J$ alabileceği en küçük değerler (A_{min}^j) ile, en büyük değerler ise (A_{max}^j) ile gösterilmiştir ve bir diğer kısıt olarak sisteme eklenmiştir.

Optimizasyon problemini çözmek için NLOpt kütüphanesinden [8] COBYLA algoritması [9] kullanılmıştır. Amaç fonksiyonun ardışıl doğrusal yaklaşımları oluşturularak, her adımda bu yaklaşımları eniyilemeye çalışırken, J boyutlu girdi uzayının kısıtlamaları sağlanmıştır.

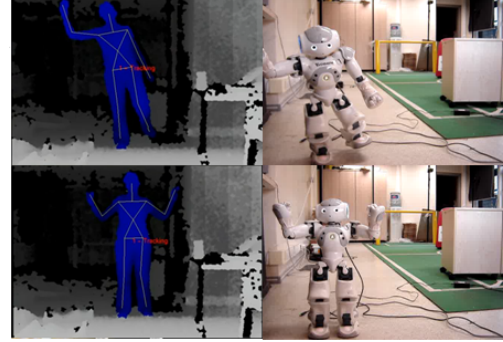
Bu yaklaşım kullanılarak robotun öğrenerek insan eğitmen ile beraber başarılı bir şekilde tekrar edebildiği bazı hareketler Şekil 4'de ve Şekil 5'de görülmektedir.

IV. SONUÇ

Huzur evinde gerçekleştirilen toplu egzersiz seansları sırasında sergilenen hareketlerin büyük çoğunluğu oturularak yapılan hareketlerdir. Fakat ayakta yapılan bacak ve sırt esneme ile güçlendirme hareketleri de bulunmaktadır. Bu sebeple denge sorununun başarılı bir şekilde çözülmesi önem arz etmektedir. Özellikle tek bacak üzerinde öne ya da arkaya eğilerek yapılan esneme hareketleri destek poligonunun alanının küçülmesi ve robotun gövdesinin diğer kısımlarına göre daha ağır olması sebebi ile robot tarafından tekrar edilmesi zor olan hareketler grubu içerisindedir. Bunun yanı sıra dizi ellerle



Şekil 4. Robotun insan eğitmenle beraber kol hareketlerini tekrar etmesi



Şekil 5. Dengesiz tüm vücut hareketlerinin robotun kendisini dengede tutan açı konfigürasyonu ile tekrar etmesi

tutup baş bölgesine çekmek gibi robotun fiziksel yetersizliğinden dolayı yapması mümkün olmayan bazı hareketler de bulunmasına rağmen bu çalışmada geliştirilen yöntemle yararlı bir egzersiz setinde kullanılacak bir çok hareketi robotun başarılı bir şekilde yapmayı öğrendiği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] B. Kröse, T. Oosterhout, and T. Kasteren, "Activity monitoring systems in health care", in *Computer Analysis of Human Behavior*, A. A. Salah and T. Gevers, Eds. 2011, pp. 325–346, Springer Verlag.
- [2] T. Vogel, P.H. Brechat, P.M. Leprêtre, G. Kaltenbach, M. Berthel, and J. Lonsdorfer, "Health benefits of physical activity in older patients: a review", *International Journal of Clinical Practice*, vol. 63, no. 2, pp. 303–320, 2009.
- [3] R.J. Nied and B. Franklin, "Promoting and prescribing exercise for the elderly", *American Family Physician*, vol. 65, no. 3, pp. 419–430, 2002.
- [4] J.G. Regensteiner, T.J. Meyer, W.C. Krupski, L.S. Cranford, and W.R. Hiatt, "Hospital vs home-based exercise rehabilitation for patients with peripheral arterial occlusive disease", *Angiology*, vol. 48, no. 4, pp. 291–300, 1997.
- [5] R. Colombo, F. Pisano, A. Mazzone, C. Delconte, S. Micera, M.C. Carrozza, P. Dario, and G. Minuco, "Design strategies to improve patient motivation during robot-aided rehabilitation", *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 4, no. 3, 2007.
- [6] P.O. Geue, A. Scheidig, J. Kessler, and H.M. Gross, "Entwicklung eines robotischen bewegungsassistenten für den langzeiteinsatz zur physischen aktivierung von senioren", *Technik für ein selbstbestimmtes Leben*, 2012.
- [7] J. Fasola and M.J. Matarić, "Using socially assistive human-robot interaction to motivate physical exercise for older adults", *Proceedings of the IEEE, Special Issue on Quality of Life Technology*, Takeo Kanade (Ed.), 2012.
- [8] Steven G. Johnson, The NLOpt nonlinear-optimization package, <http://ab-initio.mit.edu/nlopt>.
- [9] M. J. D. Powell, "Direct Search Algorithms for Optimization Calculations", *Acta Numerica* 7, pp.287–336,1988.