

Çevrim Oranının Geri Sürülebilirlik Üzerindeki Etkisi

Osman Nuri Şahin, Barış Bağdadioğlu, Gökay Yıldız, M. İ. Can Dede

Makine Mühendisliği Bölümü

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Urla İzmir

osmansahin@iyte.edu.tr, barisbagdadioglu@iyte.edu.tr
gokayyaldiz@iyte.edu.tr, candede@iyte.edu.tr

Özetçe

Kısaca bir eyleyicinin çıkış shaftından kuvvet uygulayarak sürmek anlamına gelen geri sürülebilirlik, insanlarla aynı çalışma ortamında çalışan robotlar, insanlar tarafından kullanılan robotlar (haptik cihazlar, rehabilitasyon cihazları) ve robotların programlanması için kullanılan geriye sürülerek öğrenme yöntemleri için kilit önem taşımaktadır. Eyleyici türü, redüksiyon türü ve çevrim oranı gibi faktörler eyleyicinin geri sürülebilirliğini etkileyen temel faktörlerdir. Bu çalışmanın amacı redüksiyon oranının geri sürülebilirlik üzerindeki etkisini görmektir. Bu nedenle çalışmada redüksiyon oranı değiştirilebilir bir düz dişli mekanizmasına sahip deney düzeneği hazırlanmış ve çevrim oranının geri sürülebilirlik üzerine etkisi gözlemlenmiştir. Test sonuçları bildiride sunulmuş ve sonuçlar tartışılmıştır.

1. Giriş

Teknolojinin gelişimiyle robotların kullanım alanları genişlemekte, insan robot etkileşimi de buna bağlı olarak artmaktadır. Geri sürülebilirliğin istendiği temel robotik uygulamaları insanların direk olarak kullandıkları haptik cihazlar ve rehabilitasyon cihazlarıdır [1]. Ayrıca, günümüzde endüstriyel robotlar ile insanlar aynı çalışma ortamında birlikte çalışmaktadır ve bu tip durumda robotun geri sürülebilir olması güvenlik açısından önemli bir fayda sağlamaktadır [2]. Endüstriyel robotların yörüngelerinin programlanmasında kullanılan, geriye sürülerek öğrenme yönteminin uygulanması için de robotun geri sürülebilir olması gerekmektedir. Bu tip robotlara örnek olarak UR5/10 verilebilir [3].

Bütün eyleyiciler uygulanacak kuvvetin sınırsız olduğu düşünülürken, teknik olarak geri sürülebilirlik. Fakat gerçekte, bir robotun geri sürülebilir olarak ifade edilebilmesi için gerekli kuvvetin insanın uygulayabileceği kuvvetlere göre belirlenmesi gerekmektedir. Bir eyleyicinin veya sistemin geri sürülebilirliğinin en iyi olduğu durum, geri sürüş için gerekli olan kuvvetin sifra en yakın olduğu durumdur.

Robotun amacı ve çalışma şartları doğrultusunda robot tasarımı yapılırken eyleyici seçimi, geri sürülebilirlik özelliği göz önüne alınarak yapılmalıdır. Geri sürülebilirliği etkileyen faktörler şu şekilde sıralanabilir:

- Eyleyici türü

- Eyleyici boyutu
- Redüktör tipi
- Çevrim oranı

En iyi geri sürülebilirlik eyleyicinin yalın (Direct-drive) olarak kullanıldığı durumda sağlanır. Fakat birçok uygulamada bu tip kullanım ihtiyaç duyulan tork değerlerini sağlayamadığından, redüktör kullanımı kaçınılmaz hale gelmektedir. Robotik uygulamalarında en çok kullanılan redüksiyon mekanizmaları: dişli kutuları, kayış kasnak mekanizmaları, harmonik sürücüler ve kapstan tipi sürücülerdir. Literatürde aktif olarak geri sürülebilirliğin sağlanması üzerine çalışmalar mevcuttur fakat yukarıda sıralanan faktörlerin geri sürülebilirlik üzerine etkisini gösteren bir çalışma mevcut değildir. Bu nedenle, geri sürülebilirlik gerektiren durumlarda motor ve redüktör seçimi genellikle tasarımcının veya araştırmacının önceki deneyimlerinden edindikleri tecrübelerle göre yapılmaktadır. 2007 yılında yapılan bir çalışmada, kollardaki sensorimotor fonksiyonunu geliştirmek için tasarlanan rehabilitasyon cihazında geri sürülebilirliğin sağlanması için nispeten küçük 1/2 çevrim oranına sahip bir redüktör seçilmiştir [4]. Bir diğer çalışmada, seçilen 1/8 çevrim oranına sahip redüktörlerin geri sürülebilirlik açısından uygun olduğu, ayrıca mekanizmaya eklenecek kuvvet algılayıcısından alınacak bilgiye göre oluşturulacak geri sürülebilirlik telafi algoritmasına ihtiyaç duyulmadığı belirtilmiştir [5]. Özellikle yüksek tork gerektiren ve mekanizmanın küçük olması istenen giyilebilir mekanizmalarda, yüksek çevrim oranına sahip redüktörler kullanılmakta bundan kaynaklanan geri sürülebilirlik problemini gidermek için çeşitli geri sürülebilirlik telafi algoritmaları geliştirilmiştir [6,7,8].

Bu çalışmanın amacı çevrim oranının geri sürülebilirlik üzerindeki etkisini görmektir. Çevrim oranının etkisini görebilmek için test düzeneği tasarlanmış ve geliştirilen test düzeneğiyle farklı çevrim oranları için geri sürülebilirlik deneyleri yapılmıştır. Bildirinin ikinci bölümünde geliştirilen test düzeneğinde kullanılan cihazlar ve yöntemler anlatılmıştır. Üçüncü bölümde deneylerde kullanılan kuvvet/tork sensörünün ölçüm doğruluğunun sınanması için uygulanan yöntem ve hassas tutuşta bir insanın uygulayabileceği en büyük kuvvet değerinin bulunması anlatılmıştır. Çalışmada on farklı çevrim oranı için geri sürülebilirlik testleri yapılmış ve bildirinin dördüncü bölümünde bu testlerin sonuçlarına yer verilmiştir. Son bölümde, test sonuçları değerlendirilmiş ve gelecekte yapılacak çalışmalar anlatılmıştır.

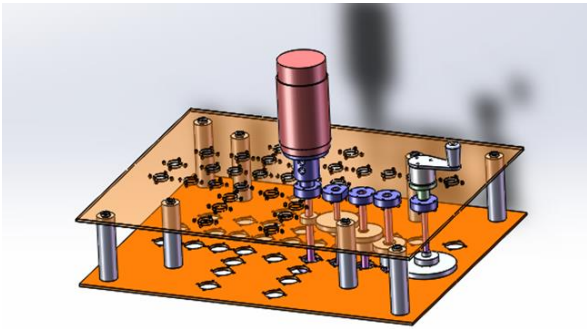
2. Geri Sürülebilirlik Deney Düzenegi

Geri sürülebilirliği etkileyen en önemli iki faktör redüktör türü ve çevrim oranıdır. Robotik sistemlerde kullanılan redüktörler geniş bir yelpazeye sahiptir. Her redüktör türü kendi içinde değerlendirilip geri sürülebilirlik üzerindeki etkisi gösterilmelidir. Fakat böyle bir çalışmanın genişliği göz önüne alındığında, başlangıç olarak düz dişli mekanizmasına sahip dişli kutusu redüktör türü olarak seçilmiştir. Daha öncede bahsedildiği gibi geri sürülebilirlik insanların uygulayabileceği kuvvetlere göre belirlenmelidir. Bir insanın farklı uzuvlarıyla uygulayacağı kuvvetler birbirinden farklı olduğundan, geri sürülebilirlik de farklı insan hareketlerine göre sınıflandırılmalıdır. Bu çalışmada seçilen hareket haptik cihazlardaki hassas tutuş (Şekil 1) için uygun olan sadece bilekten yapılan harekettir. Bu nedenle test düzeneginin boyutları bu harekete uygun olarak seçilmiştir.



Şekil 1: Hassas tutuş [9]

Şekil 2’de tasarlanan test düzeneginin mekanik aksamı ve CAD modeli görülebilmektedir. Test düzeneginin mekanik aksamı, 2 adet Cr-Ni sac plaka, rulman yatakları ve düz dişlilerden oluşmaktadır. Sac plakalar üzerinde 10 farklı çevrim oranına uygun olarak açılmış delikler mevcuttur. Rulman yataklarının ve dişlilerin yerleri plakalar üzerinde değiştirilerek farklı çevrim oranları elde edilebilmektedir. Testlerde kullanılan dişlilerin diş sayıları ve oluşturulan çevrim oranları Tablo 1 ve 2’de verilmiştir. Tablo 1’de görüldüğü üzere bazı dişliler iki kademelidir. Mekanizmada kullanılan plastik dişliler Şekil 3’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil2: (a) CAD model, (b) Test düzeneginin mekanik aksamı



Şekil 3: Mekanizmada kullanılan plastik dişliler

Test düzeneginde geri sürüş için uygulanan kuvvetleri ölçmek için mekanizmanın çıkış shaftına ATI Industrial Automation tarafından üretilen Nano25 model kuvvet/tork sensörü yerleştirilmiş ve bu sensörden analog sinyal olarak alınan kuvvet/force bilgileri National Instruments’e ait NI PXIe - 1071 model veri toplama sistemi kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Verilerin işlenmesi ve grafiksel olarak gösterilmesi Matlab kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo1: Test düzeneginde kullanılan dişliler

Dişli Numarası	Diş Sayısı
1	33
2	66
3	22
4	43/24
5	48/19
6	20
7	41/17
8	41
9	35/23
10	41/19
11	37/22
12	37/25

Tablo 2: Elde edilen çevrim oranları

Çevrim Oranı	Dişli Numaraları
1/2	1-2
1/3	3-2
1/4	3-4-5
1/8	6-5-2
1/10	6-7-4-5
1/15	9-10-7-2
1/20	6-5-7-2
1/25	6-5-4-11-2
1/30	6-5-7-12-2
1/35	6-5-7-4-2

3. Hassas Tutuşta Uygulanabilecek En Büyük Kuvvetin Bulunması

Deneylerin doğruluğu açısından öncelikle kuvvet/tork sensörünün ölçüm doğruluğu test edilmiştir. Öncelikle sensör yere paralel olarak sabitlenmiş ve sabit ağırlıklar yüklenerek ölçülen değer ile gerçek değer arasında karşılaştırma yapılmıştır (Şekil 4). Yapılan testler sonucunda sensörün gerçek değere çok yakın sonuçlar verdiği ve diğer testlerde kullanıma uygun olduğu görülmüştür. Test sırasında sensöre yüklenen ağırlıklar ve ölçüm değerleri Tablo 3’de gösterilmektedir.

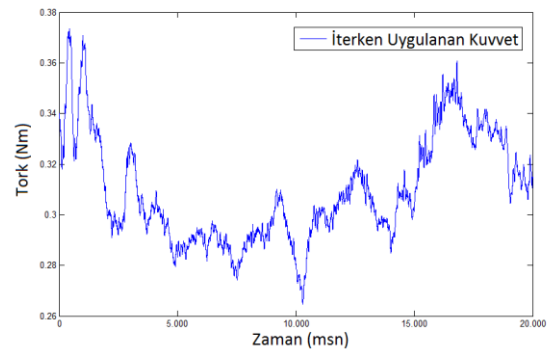


Şekil 4: Kuvvet/tork sensörü ölçüm hassasiyeti testi

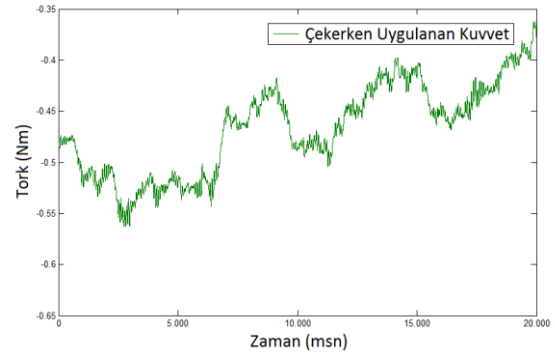
Tablo 3: Kuvvet/tork sensörü ölçüm değerleri

Gerçek Değer (gr)	Ölçülen Değer (gr)	Hata(%)
500	502,038	0,408
200	201,325	0,662
100	101,936	1,937
50	50.968	1,937
20	20.387	1,937

Geri sürülebilirliğin sayısal olarak bulunabilmesi için, ilk olarak bir insanın hassas tutuşta uygulayabileceği en büyük kuvvetin bilinmesi gerekmektedir. Bunun için kuvvet sensörü sabitlenmiş ve 4 gönüllünün, tutacağı, uygulayabildikleri en büyük kuvvetle itmeleri ve çekmeleri istenmiştir. Maksimum kuvvet 4 gönüllünün sonuçlarının ortalaması alınarak bulunmuştur. Birinci gönüllü için kuvvet/tork algılayıcısından okunan tork bilgisi Şekil 5’de gösterilmektedir. Kuvvet kolu sabit ve 40 mm dir. Deneylerde dört gönüllünün uyguladıkları en büyük kuvvetin oluşturduğu torkun ortalama değeri 0,3976 Nm olarak bulunmuştur. Buna göre kuvvet değeri maksimum ortalama tork ve kuvvet koluna göre hesaplanmıştır. Deney sonucunda hassas tutuş için maksimum kuvvet $F_{a_{max}}=9.940$ N olarak bulunmuştur.



(a)



(b)

Şekil 5: (a) Birinci gönüllünün iterken uyguladığı en büyük kuvvetin oluşturduğu tork, (b) Birinci gönüllünün çekerken uyguladığı en büyük kuvvetin oluşturduğu tork

Gönüllülerin deney sırasında uyguladıkları kuvvetlerin ortalamaları, maksimum ve minimum değerleri Tablo 4’de gösterilmektedir.

Tablo 4: Hassas tutuşta uygulanabilecek en büyük kuvvetin bulunması deneyinde ölçülen tork değerleri

	Çekerken Ölçülen Tork (Nm)		
	Ortalama	Max.	Min.
Gönüllü 1	0,46708	0,56334	0,36221
Gönüllü 2	0,40353	0,48446	0,28226
Gönüllü 3	0,35446	0,45139	0,27146
Gönüllü 4	0,50447	0,60477	0,45673
	İterken Ölçülen Tork (Nm)		
	Ortalama	Max.	Min.
Gönüllü 1	0,309543	0,373562	0,264632
Gönüllü 2	0,38172	0,4335	0,31085
Gönüllü 3	0,313552	0,367338	0,236134
Gönüllü 4	0,446446	0,554076	0,39192

Geri sürülebilirlik testlerinde, her çevrim oranında mekanizmayı hareket ettirmek için uygulanacak kuvvet (F_a), kuvvet/tork sensörü ile ölçülmüş ve geri sürülebilirlikliğin hesapsal değeri yüzde olarak aşağıdaki denkleme göre bulunmuştur:

$$\text{Geri Sürülebilirlik} = \frac{(F_{a_{\max}} - F_a)}{F_{a_{\max}}} \times 100 \quad (1)$$

Deneylerde uygulanan kuvvet (F_a), hassas tutuş için deneysel olarak bulunan maksimum kuvvetten ($F_{a_{\max}}$) büyük veya eşit olursa o çevrim oranı hassas tutuş için geri sürülemez kabul edilmiştir (%0 geri sürülebilir).

4. Geri Sürülebilirlik Testleri

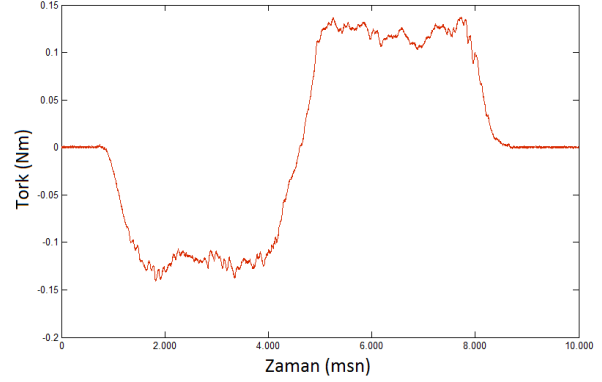
Geri sürülebilirlik testi, her bir çevrim oranı için 4 ayrı gönüllünün mekanizmayı önce saat yönünde 180° sonra saat yönünün tersi yönünde yine 180° hareket ettirerek başlangıç noktasına getirmesi olarak tanımlanmıştır. Gönüllülerin istenen hareketi 10 saniye içerisinde tamamlaması istenmiştir. (Şekil 6).



Şekil 6: Geri Sürülebilirlik Testi

Mekanizmanın çevrim oranı rulman yataklarının plakalar üzerinde uygun yerlere getirilmesiyle değiştirilmiş ve elde

edilen yeni çevrim oranı için test tekrarlanmıştır. Örnek olarak Şekil 7'de üç numaralı gönüllünün 1/15 çevrim oranında ayarlanmış mekanizma ile belirlenen hareketi yaparken sensörden okunan tork bilgisi gösterilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü üzere uygulanan kuvvetin oluşturduğu torkun en büyük olduğu değer, mekanizmaya ilk hareketin verildiği anındaki değerdir. Yapılan geri sürülebilirlik hesaplamaları ölçülen bu en büyük değere göre yapılmıştır.

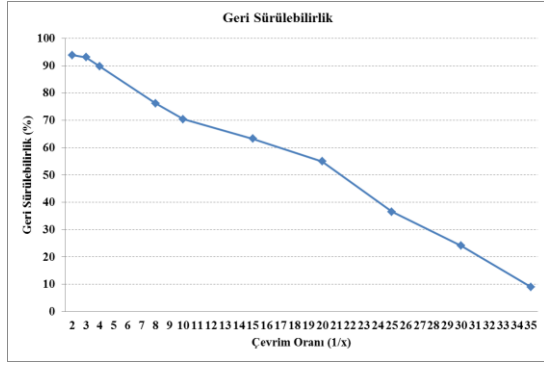


Şekil 7: Üçüncü gönüllünün 1/15 çevrim oranına ayarlı mekanizmayı hareket ettirmek için uyguladığı kuvvetin oluşturduğu torkun zamana göre değişimi

Deneyler sırasında bulunan tüm değerler Tablo 5'de listelenmiştir. Tablo 5'in son sütunu, ölçümlerden elde edilen tork değerlerinin sabit kuvvet koluna bölünmesi ile bulunan, her çevrim oranında uygulanan ortalama kuvvet değerlerini (F_a) içermektedir. Her çevrim oranı için geri sürülebilirliğin yüzde cinsinden değeri, uygulanan ortalama kuvvet değerleri Denklem (1) de yerine konularak hesaplanmıştır. Bulunan değerler Şekil 8 ve Tablo 6'da görülebilmektedir.

Tablo5: Geri sürülebilirlik test verileri

Çevrim Oranı	Ölçülen Tork Değerleri (Nm)				Ortalama	Uygulanan Kuvvet (F_a) (N)
	G1	G2	G3	G4		
1/2	0,023	0,0245	0,0233	0,027	0,02445	0,61125
1/3	0,0272	0,0248	0,0299	0,0284	0,027575	0,689375
1/4	0,037	0,0413	0,0416	0,0432	0,040775	1,019375
1/8	0,0863	0,102	0,0973	0,0936	0,0948	2,37
1/10	0,1097	0,1181	0,1195	0,1236	0,117725	2,943125
1/15	0,145	0,1464	0,1386	0,1538	0,14595	3,64875
1/20	0,174	0,1819	0,1872	0,1724	0,178875	4,471875
1/25	0,2541	0,2582	0,2496	0,2473	0,2523	6,3075
1/30	0,2955	0,3122	0,2925	0,3074	0,3019	7,5475
1/35	0,3775	0,349	0,3785	0,3428	0,36195	9,04875



Şekil 8: Çevrim oranlarına göre geri sürülebilirlik değerleri

Tablo 6: Çevrim oranlarına göre hassas tutuş için geri sürülebilirlik değerleri

Çevrim Oranı	Geri Sürülebilirlik (%)
1/2	93,9
1/3	93,1
1/4	89,7
1/8	76,2
1/10	70,4
1/15	63,3
1/20	55,0
1/25	36,5
1/30	24,1
1/35	9,0

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada geri sürülebilirliği etkileyen temel faktörlerden çevrim oranının, geri sürülebilirlik üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Bu etkiyi ölçmek için öncelikle haptik cihaz tutuşlarından biri olan hassas tutuşa uygun, çevrim oranı değiştirilebilir düz dişli mekanizmasına sahip bir test düzeneği hazırlanmıştır. Testler sırasında uygulanan kuvvetler mekanizmanın çıkış şaftına yerleştirilen kuvvet/tork sensöründen okunmuştur. 4 gönüllü ile on farklı çevrim oranı test edilmiş ve test sonuçlarına göre her çevrim oranının geri sürülebilirlik değerleri hesaplanmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen geri sürülebilirlik-çevrim oranı grafiğinde (Şekil 8) görüldüğü üzere çevrim oranı arttıkça geri sürülebilirlik de belirgin bir şekilde azalmaktadır. Genel olarak bu azalış doğrusala yakındır. Fakat özellikle kademenin arttığı yerlerde (1/3-1/4, 1/8-1/10, 1/20-1/25 arasında) azalışın bir önceki değerlere göre daha dikey yönde olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeni, dişli sayısındaki artışa bağlı olarak mekanizma içindeki genel sürtünme miktarı da arttığından mekanizmanın verimliliğinin düşmesidir.

Ayrıca testler sırasında gönüllülerin mekanizmanın geri sürülebilirliğini değerlendirmeleri istenmiştir. Gönüllülerin verdiği cevaplara göre, çevrim oranı 1/20 den büyük olan durumlarda gönüllülerin mekanizmayı hareket ettirmekte zorlandıkları ve rahat bir geri sürüş sağlanamadığı anlaşılmıştır.

Önceden de bahsedildiği gibi geri sürülebilirlik, eyleyici türü, redüktör tip, çevrim oranı ve mekanizmanın insanın hangi uzvuyla kullanılacağına göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada hassas tutuş şekline ve düz dişli mekanizmasının çevrim oranlarına göre bir geri sürülebilirlik analizi yapılmıştır. Bu çalışma için tasarlanan mekanizma kolaylıkla diğer tutuş pozisyonlarından kontak tutuş ve güçlü tutuş içinde uygun hale getirilebilir. İlerleyen çalışmalarda öncelikli olarak bu iki tutuş şekli için düz dişli mekanizmasının çevrim oranının geri sürülebilirlik üzerindeki etkisi araştırılacaktır. İlerleyen safhalarda bu üç tutuş şekli için, diğer redüksiyon tiplerinin de test edilmesi ve robot tasarımcılarına ve araştırmacılara yol gösterebilecek genel bir geri sürülebilirlik şablonu oluşturulması hedeflenmektedir. Bunların dışında, elde edilen veriler, dişli kullanımından dolayı oluşan sürtünmenin aktif bir şekilde telafisi için bir kontrol algoritması geliştirilmesinde kullanılabilir.

6. Kaynakça

- [1] C. Carignan, M. Liszka, "Design of an Arm Exoskeleton with Scapula Motion for Shoulder Rehabilitation", 12th International Conference on Advanced Robotics, ICAR '05. Proceedings , s:524-531, 2005
- [2] J. Lew, Y. T. Jou, H. Pasic, "Interactive Control of Human/Robot Sharing Same Workspace", Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, s:535-540, 2000
- [3] <http://www.universal-robots.com/GB/Products.aspx>
- [4] C.T. Freeman, A.M. Hughes, J.H. Burridge, P.H. Chappell, P.L. Lewin, E. Rogers, "A robotic workstation for stroke rehabilitation of the upper extremity using FES", Medical Engineering & Physics, Cilt:31, s:364-373, 2009
- [5] S.J. Ball, I. E. Brown, S.H. Scott, "MEDARM: a rehabilitation robot with 5DOF at the shoulder complex", IEEE/ASME international conference on Advanced intelligent mechatronics, s:1-6, 2007
- [6] T. Nef, P. Lum, "Improving backdrivability in geared rehabilitation robots", Medical & Biological Engineering & Computing, Cilt: 47, Sayı:4, s: 441-447, 2009
- [7] M. Grossard, G. Felipe, G. Hamon, J. Martin, "Force Sensing Strategy for the Backdrivable and Dexterous CEA Hand", 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), s:1-7, 2013
- [8] B. Na, J. Bae, K. Kong, "Backdrivability Recovery of a Full Lower Extremity Assistive Robot", 12th International Conference On Control, Automation and Systems, s:1030-1034, 2012
- [9] T. A. Kern, Engineering Haptic Devices, A Beginner's Guide for Engineers, ISBN: 978-3-540-88248-0, s: 65, 2009