

İnsan-robot etkileşiminin biyomimetik yaklaşımla sağlanması

Providing the human-robot interaction with biomimetic approach

Gökhan GELEN^{1*}, Sinan ÖZCAN²

^{1,2}Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa.
gokhan.gelen@btu.edu.tr, sinan2094@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 29.08.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 10.10.2018
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.83584
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, insan kol ve el hareketlerinin taklit edilmesiyle insan-robot etkileşimini sağlayan biyomimetik bir yaklaşım sunulmuştur. İnsan kol hareketleriyle robotun aynı doğrultuda hareket etmesi sağlanmış ve el hareketleri ile de robot tutucusunun kontrolü sağlanmıştır. Robot hareketi için; ilk olarak insan elinin, bel hizasında orijin noktası olarak belirlenen noktaya olan konumunu verecek kinematik model oluşturulmuştur. Modellemede, insan kolu, ön kol, pazy ve omuz olmak üzere üç ayrı uzuv olarak incelenmiştir. Omuza, pazyya ve ön kola yerleştirilen algılayıcılar ile dönüş açısı bilgileri elde edilmiş ve uzuv uzunlukları ile birlikte matematiksel modelde kullanılmıştır. Bu hesaplamalarda rotasyon kinematiği ve hareket kinematiği matrisleri kullanılmıştır. Tutucu kontrolü için ise bünyesinde EMG sensörleri bulunduran MYO kol bandı kullanılmıştır. Bu kol bandı üzerindeki EMG sensörleri ile kol kaslarından parmak hareketleri algılanmıştır ve bu hareketler doğrultusunda pnömatik tutucu kontrol edilmiştir. Uygulamalarda 6-eksen robot kolu kullanılmıştır. Hesaplanan konum verileri ve tutucu bilgisi ethernet üzerinden TCP/IP protokolü ile robot denetleyicisine aktarılmaktadır. Robotun hesaplanan konuma gitmesini ve tutucu kontrolünü sağlayan kod oluşturularak robota aktarılmıştır. Yapılan testlerde, endüstriyel robotun insan kol ve el hareketleri ile başarılı biçimde kontrol edildiği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Endüstriyel robotlar, Biyomimetik kontrol, Rotasyon ve hareket kinematiği, Tutucu kontrolü, İnsan-robot etkileşimi

Abstract

In this work, a biomimetic approach to provide human-robot interaction by mimicking the motion of human arm and fingers is presented. The movement of an industrial robot is performed by human arm movement in same direction and the control of gripper is also performed by hand movements. For the movement of robot, as a first step, a kinematic model is obtained to give the position of the human hand to the point determined as the origin point in the waist line. In the modelling, the human arm is considered as three limb that are forearm, biceps and shoulder. The rotational angles are obtained from sensors placed in the shoulder, biceps, and forearm, are used in the mathematical model with limb lengths. Rotation kinematics and kinematics matrices are used in these calculations. For the gripper control, a MYO armband with EMG sensors is used. With this EMG sensor on the armband, finger movements are detected from the arm muscles and the pneumatic gripper was controlled in the direction of these movements. A 6-axis robot arm is used in the applications. The calculated position data and the gripper information are transferred to the robot controller via the TCP/IP protocol over Ethernet. A code that provides reaching of robot to calculated position and control the gripper is created and transferred to robot. In the tests, it has been observed that the industrial robot has been successfully controlled by human arm and hand movements

Keywords: Industrial robots, Biomimetic control, Rotation and motion kinematics, Gripper control, Human-robot interaction

1 Giriş

İnsanoğlu tüm zamanlar boyunca daha konforlu, güvenli ve rahat yaşamın yollarını aramıştır. Bilim ve teknolojideki ilerlemeler ile farklı ürün ve imalat sanayileri gelişmiştir. Bu sanayi kuruluşları hızlı, güvenli ve aynı kalitede ürün üretebilmek için robotik sistemler içeren modern otomasyon çözümlerine yönelmektedir. Genel bir tanımlama olmamasına karşın bir robot, insan gibi görünen ve çalışan makine olarak tanımlanabilir. Günümüz endüstrisinde kullanılan manipülatörler veya endüstriyel robotlar her ne kadar insana benzemese de yapılan çalışmalar robotların daha çok insana benzer bir hal alması ve daha insansı özellikler veya süper insan yetenekleri kazandırılması yönünde ilerlemektedir. Endüstriyel robotların insanlarla aynı ortamı paylaşarak görevlerin bazıları insan işbirliği veya yardımıyla gerçekleştirilmesine imkân veren işbirlikçi robotlar üretilmekte ve kullanılmaktadır. İşbirlikçi robotlar (Collaborative Robots) kısaca Cobot olarak adlandırılmakta ve çeşitli uygulamalarda insanlarla etkileşimde bulunarak, onların davranışlarına göre hareket etmektedirler [1]. Cobot konusunda ilk çalışma 1996 yılında Northwestern Üniversitesinde gerçekleştirilmiştir [2].

Cobot ile ilgili ilk patentler ise 1997 yılından itibaren alınmaya başlanmıştır.

Geleneksel endüstriyel robotlar, genellikle koruma çiti ile güvenliği sağlanmış çalışma alanlarındaki ağır işleri yerine getirirken, robotik alanındaki yeni gelişmeler ile birlikte yeni nesil robot teknolojilerinin kullanımı ile robotların ve insanların aynı çalışma alanlarında hibrit imalat yapması artık mümkün hale gelmiştir. Akademik çalışmalar son yıllarda insan ile robotun birlikte etkileşim içerisinde çalışabildiği hibrit sistemlerin tasarımı ve kontrolü konularına odaklanmıştır [3]-[7]. Endüstride İşbirlikçi Robot tanımlı kontrol ve otomasyon sistemlerinin esneklik, maliyet, geliştirilebilirlik ve güvenliğinin tanımlanmasına yardımcı olmuştur. İnsan robot etkileşiminin başarılı biçimde gerçekleştirilebilmesi için robotların ve denetlenecek sistemin özelliklerinin dikkate alınması gerekmektedir. Endüstriye işbirlikçi robotların gelişmiş örnekleri olarak yüz tanıma sistemine sahip olan insansı yapıdaki Baxter [8] ve Sawyer [9] verilebilir. CISOBOT olarak adlandırılan bir Cobotun ameliyat robotu olarak kullanımı [10] da sunulmuştur.

Bu çalışmada, insan-robot etkileşiminde kullanılmak üzere insan kol ve el hareketlerinin taklit edilmesiyle robotun kontrolünün sağlanacağı bir biyomimetik yaklaşım

amaçlanmıştır. Biyomimetik, doğadaki canlıları yapısal ve fonksiyonel olarak incelenmesi sonucunda yapılarının ve fonksiyonlarının taklit edilmesi ile elde edilen mekanizma ve sistemlerin tümünü ifade etmektedir.

İnsan kolu hareketlerinin algılanması konusundaki çalışmalar üç temel başlık altında toplanabilir. Bunlar, dış iskeletli sistemler, görüntü işleme temelli çalışmalar ve ataletsel ölçüm kullanılan çalışmalardır. Bunlardan ilkinde, dış iskelet kullanımını öngörülmektedir. Dış iskeletli sistemler insan vücuduna dışarıdan giydirilme suretiyle hareketlerin algılanmasını sağlayan mekanik sistemlerdir. Bu sistemlerde dış iskelet kişiye özeldir. Dış iskeletli sistemler doğru ve kesin ölçüm yapmasına karşılık yüksek maliyet içermektedir [11]. Görüntü algılama sistemlerinde beden ve uzvu konumları iki boyutlu kamera görüntülerinin işlenmesi sonucu elde edilir. Üç boyutlu uygulamalarda birden fazla kameraya ihtiyaç duyulur ya da kamera ile birlikte lazer tarama cihazları kullanılarak cismin kameraya mesafesi hesaplanarak algılama işlemleri yapılmaktadır [12]-[14].

Ataletsel ölçüm birimleri (AÖB) jiroskop, ivmeölçer ve manyetometre aracılığıyla cisimlerin üç boyutlu uzayda yönelimlerini belirleyen algılayıcı takımlardır [15]-[16]. AÖB'ler insan uzuvlarının yönelimlerinin belirlenmesinde ve konumlarının hesaplanmasında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaygın kullanımın en önemli nedeni görüntü işleme yani optik tabanlı yöntemlerde olduğu gibi vücut hareketlerini algılamada harici fiziksel referans sistemlerine ihtiyaç duyulmamasıdır. Literatürde, AÖB'lerde bulunan farklı algılayıcı kombinasyonlarının kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur [17]-[29]. Sadece ivmeölçerin kullanıldığı çalışmalar [17],[24],[28]'de, sadece jiroskop kullanılan bir çalışma [18]'de, jiroskop-manyetometre çifti kullanılan bir çalışma [19]'da, ivmeölçer-manyetometre çifti kullanılan çalışma örnekleri [20],[21]'de sunulmuştur. Bu çalışmaların çoğunluğunda, açısız verilerden insan uzuvlarının konumu belirlenmeye çalışılmıştır. İvmeölçer-jiroskop çifti kullanılarak Gültekin tarafından gerçekleştirilen çalışmada, insan kol açıları tasarlanan bir ölçüm birimi ile belirlenmiş ve bir endüstriyel robot kol ile eşleştirilmiştir [22]. Üç boyutlu hareketlerde insan kolu yörüngelerinin analizine dayalı biyomimetik robotların kontrolünü içeren güncel bir çalışma [23]'te sunulmuştur. Bu çalışmada insan kolu hareketinin taklit edilmesi için kinematik dönüşüm yöntemleri dikkate alınmıştır. İnsan elinin ve parmaklarının pozisyonları ile robot kontrolü konusunda da literatürde çalışmalar yer almaktadır [25]-[27]. Bu çalışmalarda, daha az sensör kullanarak alt kol pozisyonun algılanması [25], parmak üzerine giyilebilir esnek bir sensör ve ivmeölçer ile deneysel bir robotun kontrol edilmesi [26] ve AÖB birimleri kullanılarak el ve kol duruşunun algılanması üzerine çalışılmıştır [27]. Bu çalışmaların tümünde sadece insan kol hareketinin algılanması ile ilgilenilmiş olup robot tutucusunun çalıştırılması dikkate alınmamıştır. Çalışmaların çok azında gerçek zamanlı bir endüstriyel robot kontrolü dikkate alınmıştır. Shin ve diğ. [29] tarafından gerçekleştirilen güncel bir çalışmada EMG sensörü ve dinamik el hareketleri ile robotlar için insan-makine arayüzü oluşturulmuştur. Bu çalışmada tutucu kontrolü de dikkate alınmış olup arayüz için çeşitli performans parametreleri incelenmiştir. Tutucu kontrol dikkate alınmasına rağmen bu çalışmada kompleks parmak hareketlerinin kullanımı sistemin yavaş çalışmasına neden olmaktadır.

Sunulan çalışmada, insan koluna yerleştirilen algılayıcılar ile alınan uzuv açıları vasıtasıyla, avuç içinin referans orijine göre

konumu belirlenmektedir. İnsan kolunun hareket etmesi ile avuç içinin yeni konumu önceki konum ile karşılaştırılarak konum değişimi hesaplanmaktadır. Robotun ucuna takılı olan tutucunun, hesaplanan konum değişimi miktarı kadar hareket etmesi sağlanmaktadır. Robotun insan kol hareketi ile aynı doğrultuda hareket ettirilmesi için insan kolu; ön kol, pazı kısmı ve omuz olarak üç fiziksel kısma ayrılmıştır. Omuz ile bel hizası arasındaki omurga da sabit uzuv olarak belirlenmiştir. Böylece omurganın bel hizasındaki izdüşümü insanın orijin noktası olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak kol üç eksenli dört uzuvlu bir yapıya indirgenmiştir. Her uzvu global eksenle yaptıkları açıların bulunması için ataletsel ölçüm sensör kartları kullanılmıştır. AÖB'ler ile tasarlanan sistemlerin düşük maliyetli olması çalışma koşulunun ve ortamının algılayıcıları etkilememesi, tasarlanan sistemin kişiye özgü olmaması sunulan çalışma için ataletsel ölçüm sisteminin tercih sebepleri olmuştur. Seçilen AÖB üzerinde bulundurduğu ivmeölçer, jiroskop ve manyetometre ile sabitlendiği cismin yuvarlanma, yalpalama ve sapma açılarını algılayıp, gürültüden arındırılmış bir veri olarak dış ortama sunmaktadır. İvmeölçer, jiroskop ve manyetometrenin üçünün birlikte kullanılması ile yüksek doğruluğa sahip veriler elde edilebilmektedir. Bu açı bilgileri ve uzuv uzunlukları oluşturulan matematiksel modelde kullanılarak elin konum bilgisi hesaplanmaktadır. Hesaplamalarda rotasyon kinematiği ve hareket kinematiği matrisleri kullanılmıştır.

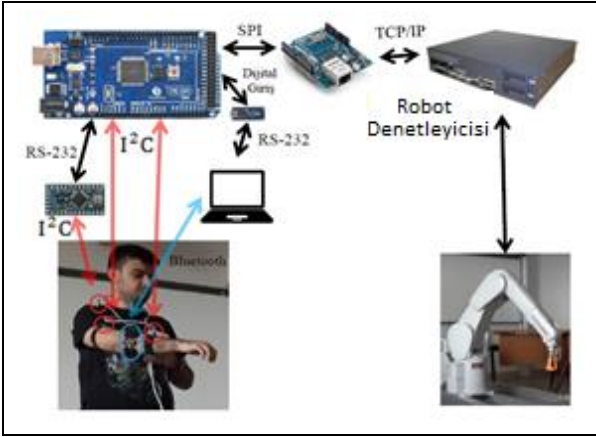
Bu çalışmada, insan kol hareketlerinin bir endüstriyel robota taklit ettirilmesinin yanı sıra, aynı zamanda el açma ve kapama hareketinin de robot tutucusu tarafından taklit edilmesi sağlanmıştır. İnsan elinin açma ve kapanmasını algılamak üzere bünyesinde EMG sensörleri bulunduran bir kol bandı kullanılmıştır. Bu kol bandı üzerindeki EMG sensörleri ile kol kaslarından parmak hareketleri algılanmış ve bu hareketler doğrultusunda robota bağlı olan pnömatik tutucunun aç-kapa görevi yerine getirilmiştir. Makalenin ikinci bölümünde, önerilen yaklaşım ve kullanılan elektronik donanımların bağlantısı açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, rotasyon ve hareket kinematiği ile konum hesaplamaya ait denklem ve açıklamalar sunulmuştur. El ve Parmak hareketleri ile tutucunun kontrolü dördüncü bölümde, yazılım tasarımı ise beşinci bölümde belirtilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma ile literatürdeki benzer çalışmaların kıyaslanmasına tartışma bölümünde yer verilmiştir. Çalışmanın sonucu ve planlanan ileriki çalışmalara ise sonuç bölümünde sunulmuştur.

2 Sistemin genel yapısı

Önerilen biyomimetik yaklaşımda robotun hem hareketinin hem de tutucu kontrolünün insan hareketleri ile sağlanması hedeflenmektedir. Bu uygulamalar, endüstride kullanılan Mitsubishi robot kolu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Robot kolu altı eksene ve bir adet pnömatik tutucuya sahiptir. Maksimum 7 kg yük taşıma kapasitesi ve 907,7 mm yarıçapında bir erişim mesafesi vardır ve TCP/IP haberleşme protokolünü desteklemektedir. Robotun ana hareketleri, sürücü sistemlerinin çalıştırılması gibi fonksiyonlar robot denetleyicisi aracılığıyla sağlanmaktadır. Robot kolunu, insan kolu ve eli vasıtasıyla kontrol edecek biyomimetik yaklaşıma ait sistemin genel yapısı ve kullanılan donanımlar Şekil 1'de görülmektedir.

Şekilden görüleceği üzere, insan kolu üzerine sabitlenen ve bünyesinde jiroskop, ivmeölçer ve manyetometre verileri bulunan BNO055 kartları yardımıyla bu uzuvların açıları ölçülmektedir. AÖB olarak kullanılan BNO055 kartları üzerindeki ARM Cortex-M0 tabanlı işlemci ile bu üç sensörden

elde edilen verileri kullanarak mutlak oryantasyon, açısal hız vektörü, ivme vektörü, manyetik alan şiddeti vektörü vb. değerleri hesaplamakta ve I²C protokolü ile dış ortama sunmaktadır [30].



Şekil 1: Sistemin genel yapısı.

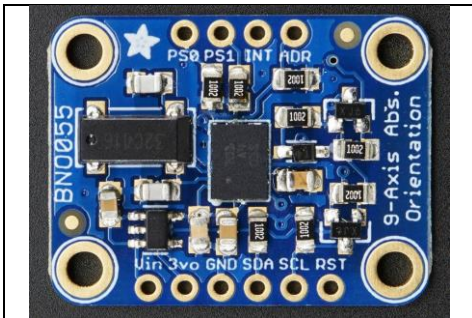
Bu açı verileri I²C protokolü ile ana denetleyici olarak kullanılan *Arduino Mega* kartına aktarılır. *Arduino mega* kartı üzerinde 8 bitlik Atmega2560 entegresi ve 16 MHz kristal osilatör bulunur ve kendine ait *Arduino IDE* ile programlanabilir. İnsan koluna sabitlenen üç adet BNO055 kartından I²C haberleşmesi ile gelen ön kol, pazı ve omuza ait yuvarlanma, yalpalama ve sapma açıları ve bu uzuvlara ait uzunluklar kullanılarak rotasyon kinematiği hesaplamaları ile elin orijine olan konumu hesaplanır. Bu hesaplamalar ileriki bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

Tutucu kontrolü için MYO kol bandı kullanılmıştır. MYO kol bandı, üzerinde bulunan EMG sensörü ile kol kaslarından parmak hareketlerini elektriksel sinyal olarak algılayabilmektedir ve üzerinde bulunan Arm cortex M4 işlemcisi ile sinyali çeşitli filtrelerden geçirip hatalarını gidererek Bluetooth üzerinden aktarabilir [31].

Son olarak BNO055 sensör kartlarından gelen açılarla hesaplanan X, Y, Z konum bilgileri ve MYO kol bandından gelen parmak hareketleri ile hesaplanan tutucu bilgileri *Arduino Mega* ya takılan Ethernet Shield (wiznet 5100 entegreli) ile TCP/IP protokolü kullanılarak robotun kontrolcüsüne aktarılır.

2.1 Ataletsel ölçüm biriminin kullanımı

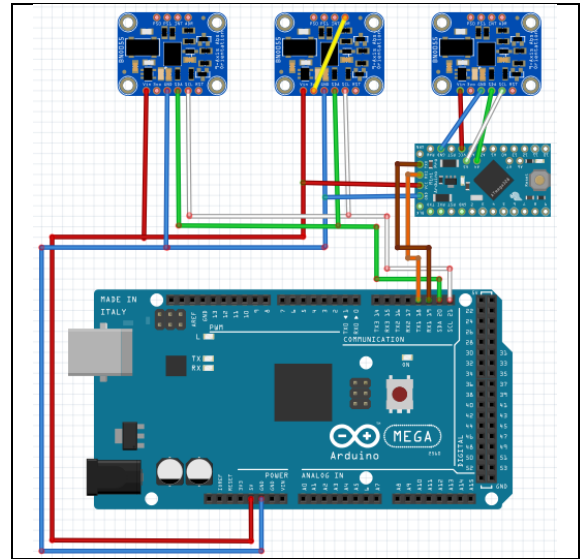
Ataletsel ölçüm birimi olarak BNO055 sensör kartı kullanılmaktadır. BNO055 kartı, üzerinde manyetometre, jiroskop, ivmeölçer bulunan ve filtre hesaplamalarının yapılması ve haberleşmenin sağlanması için üzerinde Arm Cortex M0 işlemcisi bulunduran tümleşik bir karttır. Bu kart Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2: BNO055 tümleşik kartı.

Bu çalışmada kullanılan *Arduino Mega* kontrolcüsüne ait *Arduino IDE*, BNO055 sensör kartına ait kod kütüphanesini içermektedir. Hem kütüphanenin desteklemesi hem de daha az bağlantı piniyle haberleşme kurulabileceği için I²C haberleşme protokolü tercih edilmiştir. I²C haberleşme protokolü master-slave yapısında bir seri haberleşme metodudur. Bu protokolde tek bir hat üzerinden birden çok cihaz haberleşebilir. Cihazlar, ana cihaz (master) veya uydu cihaz (slave) olarak kullanılabilirler. Her ana cihaz, okuma ve yazma işlemi yapabilirken, uydu cihazlar sadece yazma işlemi yapabilir. Ana cihazlar hangi cihazın yazmacından (register) veri çekeceğini adresleme yaparak belirtir. Bunun için her cihazın farklı adreslere sahip olması gerekir. Tasarlanan sistemde *Arduino Mega* ana cihaz, AÖB sensör kartları ise uydu cihaz olacak şekilde ayarlama yapılmıştır. *Arduino Mega* adresi kod aracılığı ile değiştirilebilir ancak BNO055 sensör kartları üreticisi tarafından sadece iki adet adres seçeneği ile satılmaktadır ve işlemcisi kapalı bir sistem olduğu için bu adresler değiştirilememektedir.

Tasarlanan sistemde üç adet BNO055 kullanılması gerekmektedir. Buna karşın BNO055 kartları sadece 2 adet adres seçeneği sunmaktadır. Bu nedenle kullanılan üç adet kartın tek I²C hattı üzerinden haberleşmesi mümkün değildir. Bu nedenle ön kola ve pazıya takılan BNO055 kartları, *Arduino Mega* ile direkt I²C protokolü üzerinden haberleştirilmiştir. Omza takılan üçüncü BNO055 kartı ise küçük bir denetleyici olan *Arduino Pro Mini* ile I²C protokolü üzerinden haberleştirilip, alınan veri *Arduino Mega* ya RS-232 seri haberleşmesi ile aktarılmıştır. Bağlantı şeması Şekil 3'te görülebilir.



Şekil 3: BNO055 kartları haberleşme yapısı.

2.2 MYO kol bandı

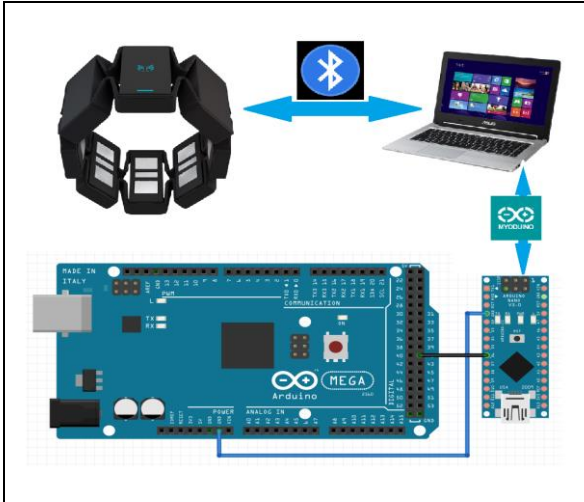
Myo kol bandı, hem son kullanıcılar hem de geliştiriciler için Thalmic Labs. Şirketi tarafından geliştirilen hareket kontrolünü algılayan bir cihazdır [31]. Myo kol bandı Şekil 4'te görülmektedir.

Myo kol bandı içerisinde EMG sensörleri, jiroskop, ivmeölçer ve manyetometre bulundurur. İşlemci olarak ARM Cortex M4 barındırır. Myo kol bandı cihazlar ile sadece Bluetooth üzerinden haberleşir. Üretici şirket Myo için bazı geliştirme ortamları için açık kaynak kütüphaneler ve bilgiler yayınlamıştır [6]. Bu ortamlardan biri de *Arduino IDE*'dir.



Şekil 4: Myo kol bandı.

Myo kol bandı, Arduino ile doğrudan bağlantı sağlayamamaktadır. Sadece Myo kol bandının kendi uygulama marketinde bulunan, *MyoDuino* seri haberleşme arayüzü ile haberleşebilmektedir. Çalışmada kullanılan *Arduino Mega*, BNO055 sensör kartlarının kalibrasyonu için bir haberleşme arayüzü ile bağlantı kurmaktadır. Bu nedenle, MYO kol bandından gelen veriyi aktarmak için bir köprü vazifesi yapacak olan Arduino Nano kartı aracı olarak kullanılmıştır. Sistem şöyle çalışmaktadır: Myo, bluetooth protokolü ile yolladığı veriyi *MyoDuino* arayüzü aracılığıyla seri porttan Arduino Nanoya aktarır. Burada gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra tutucunun durum bilgisi dijital çıkış olarak Arduino Megaya aktarılmıştır. Şekil 5'de haberleşme şeması görülmektedir.



Şekil 5: Myo haberleşme şeması.

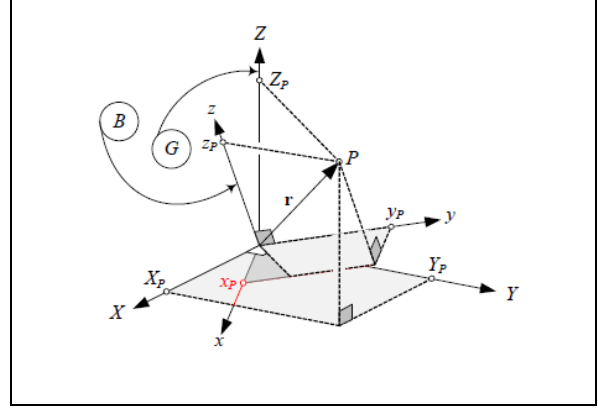
3 Kinematik hesaplamalar

Bu bölümde öncelikle rotasyon kinematiği ve hareket kinematiğinin temelleri açıklanmıştır. Bölümün ilerleyen kısımlarında ise rotasyon kinematiğinin ve hareket kinematiğinin çalışmada kullanımı detaylandırılmaktadır. Rotasyon kinematiği ve hareket kinematiği konusunda daha detaylı bilgi için [32]'de sunulan kaynaktan yararlanılabilir.

3.1 Rotasyon kinematiği

Bir noktası sabit bir rijit cisim düşünelim ve cismin sadece bu noktaya bağlı olarak dönebildiğini farz edelim. Rijit cismi,

cisme bağlı B koordinat takımı ile gösterilmektedir. Genel eksen takımını da G ile gösterilir. Şekil 6'dan görüleceği üzere B koordinat takımı G koordinat takımı üzerinde dönebilmektedir. Amaç, B koordinat takımının G koordinat takımına göre oryantasyonunu tarif edilmesidir. Bu nedenle kullanılacak rotasyon dönüşüm matrisleri oluşturulmalıdır. Bu matrisleri kullanarak B koordinat takımındaki bir P noktasının konumu G koordinat takımına göre yazılabilir.

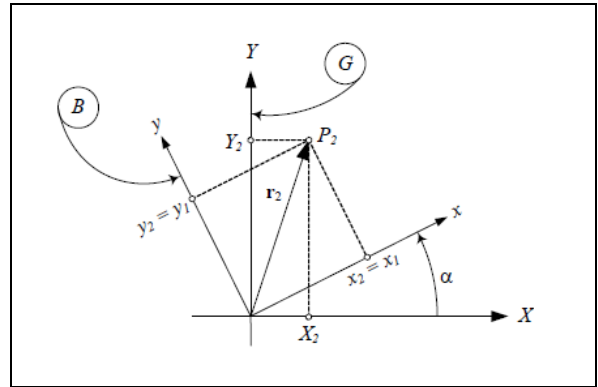


Şekil 6: G ve B koordinat takımları [32].

3.2 Temel küresel rotasyon matrisleri

B koordinat takımı Şekil 7'deki gibi G koordinat takımının Z ekseninde α derece kadar dönmektedir. B takımı üzerindeki P noktasının G takımı üzerindeki yeni konumu (1) deki eşitlik kullanarak bulunmuştur.

$$G_r = Q_{z,\alpha} B_r \quad (1)$$



Şekil 7: B takımının G takımının Z ekseninde α derece dönüşü [32].

(1) eşitliğindeki B_r , P noktasının B koordinat takımındaki konumunu gösteren matris olup (2)'de sunulmuştur. $Q_{z,\alpha}$, Z eksenindeki dönüşü temsil eden rotasyon matrisi olup eşitlik (3)'te, G_r ise P noktasının G koordinat takımındaki konumunu gösteren matris olup (4)'te verilmiştir.

$$B_r = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$G_r = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Q_{z,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

B koordinat takımının, G koordinat takımının diğer eksenlerindeki dönüşlerinde konum hesaplamalarında kullanılan matrislerde (5) ve (6)'da verilen matrislerdir.

$$Q_{y,\beta} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Q_{x,\gamma} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (6)$$

G koordinat takımındaki konumu bilinen bir P noktasının G koordinat takımında dönüş açıları bilinen B koordinat takımındaki konumunu veren eşitlik (7)'de sunulmaktadır.

$$B_r = Q_{z,\alpha}^{-1} G_r \quad (7)$$

3.3 Küresel-Kartezyen eksenler etrafında ardışık dönüş

B koordinat takımının G koordinat takımında sırasıyla yaptığı $Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_n$ n adet dönüş hareketi sonrasında yer vektörü (8) eşitliği ile bulunur.

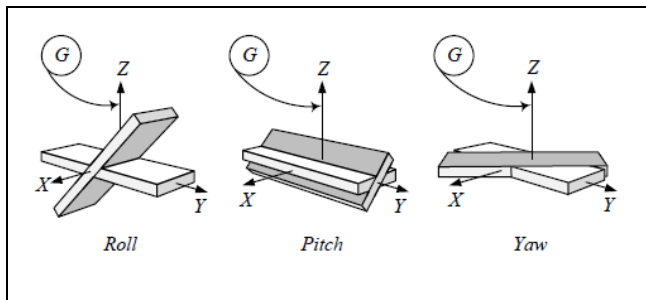
$$G_r = {}^G Q_B B_r \quad (8)$$

$${}^G Q_B = Q_n \dots Q_3 Q_2 Q_1 \quad (9)$$

${}^G Q_B$ Matrisine küresel rotasyon matrisi denir. Bu matrisi hesaplamak için çarpım işleminin dönüş sırasına göre (9)'daki gibi yapılması gerekir.

3.4 Küresel yuvarlanma-yalpalama-sapma açıları

Küresel koordinat takımının temel eksenlerinde yapılan dönüş hareketlerine Yuvarlanma-Yalpalama-Sapma denir. X ekseninde yapılan dönüşü yuvarlanma, Y ekseninde yapılan dönüşü yalpalama, Z ekseninde yapılan dönüşü sapma hareketi denir. Bu açılar Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8: Yuvarlanma-Yalpalama-Sapma hareketleri [32].

Bu üç açı ile (4), (5) ve (6)'daki matrisleri (10)'da gösterildiği gibi çarpılarak bir ${}^G Q_B$ küresel rotasyon matrisi elde edilebilir.

$${}^G Q_B = Q_{z,\alpha} Q_{y,\beta} Q_{x,\gamma} \quad (10)$$

$${}^G T_B =$$

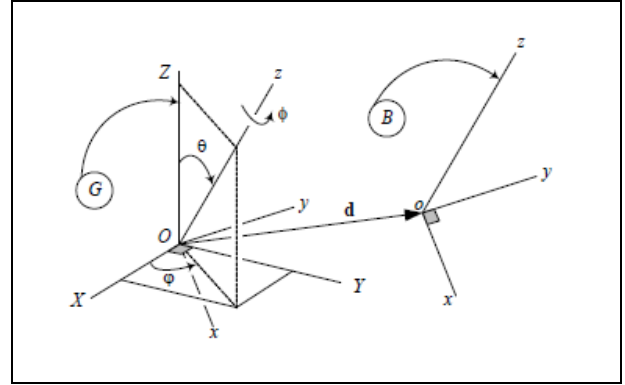
$$\begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & X_o \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & Y_o \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma & Z_o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Bu işlemin sonucunda elde edilen matris (11)'de görülmektedir.

$${}^G Q_B = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (11)$$

3.5 Hareket kinematığı

B koordinat takımı, G koordinat takımı üzerinde dönüş hareketi yapabiliyorken aynı zamanda, B koordinat takımının orijin noktası, G koordinat takımına göre Şekil 9'da görüldüğü gibi d kadar ötelenebilir. Bu durumda B koordinat takımındaki bir P noktasının G koordinat takımına göre konum vektörü (12)'deki eşitlik kullanılarak hesaplanabilmektedir.



Şekil 9: Orijin noktasının ötelenmesi [32].

$${}^G r_p = {}^G Q_B {}^B r_p + {}^G d \quad (12)$$

Bu eşitlikte ${}^G d$, B koordinat takımının orijin noktasının G koordinat takımındaki konumu veren vektördür. ${}^B r_p$, P noktasının B koordinat takımında konumunu veren vektördür. ${}^G Q_B$ küresel rotasyon matrisi, ${}^G r_p$ 'de P noktasının G koordinat takımındaki konumunu veren vektörler olup aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$${}^B r_p = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} \quad (13)$$

$${}^G r_p = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} \quad (14)$$

$${}^G d = \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} \quad (15)$$

3.6 Homojen dönüşüm matrisi

Öteleme ile birlikte P noktasının G koordinat takımındaki yer vektörünü hesaplamak için diğer bir yolu homojen dönüşüm matrisidir. Bu dönüşüm ${}^G Q_B$ küresel rotasyon matrisini ve ${}^G d$ öteleme matrisini tek bir matrisle birleştirerek işlem kolaylığı sağlar. Ortaya çıkan yeni matris homojen dönüşüm matrisi denir. Bu matris (16)'da sunulmuştur.

${}^G T_B$ Matrisi (17)'deki eşitlik kullanılarak P noktasının G koordinat takımındaki konum vektörü hesaplanabilir.

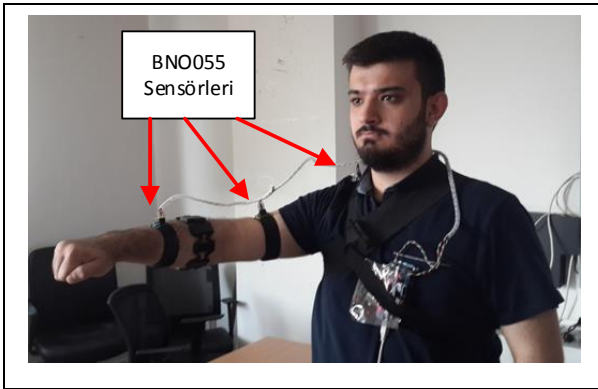
$${}^G r = {}^G T_B B_r \quad (17)$$

$$B_r = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

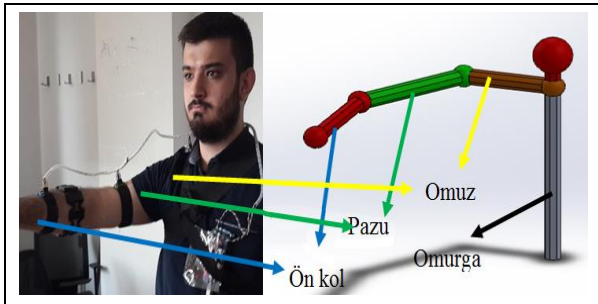
$${}^G r = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

3.7 Uzuvların belirlenmesi ve koordinat takımlarının yerleştirilmesi

Kol için biyomimetik kontrolör tasarlarırken, kolun birkaç uzva ayrılıp, ayrı ayrı incelenmesi gerekir. Ayrıca hesaplamaların sonucunda çıkan konumların robot için eş konumlara gelecek şekilde bir orijin noktası belirlenmelidir. Bu çalışmada kol, üç ayrı uzuv olarak ele alınmıştır. Bunlar; ön kol, pağı kısmı ve omuzdur. Ayrıca, orijin noktası olarak bel hizasında omurganın izdüşümünü belirlenmiştir. Bundan dolayı omurga da sabit uzuv olarak kabul edilmektedir. Omurga; orijine merkezli Z ekseninde uzanan bir uzuv olarak, omuz; omurgaya küresel eklemlerle bağlı bir uzuv olarak, pağı kısmı; omuza küresel eklemlerle bağlı bir uzuv olarak, ön kol ise; pağı kısmına küresel eklemlerle bağlı bir uzuv olarak kabul edilmiştir. Hesaplamalar için bu uzuvların küresel eksenlerde yaptıkları açıları BNO055 sensörleri ile algılanmaktadır. BNO055 sensör kartlarının insan koluna sabitlendikleri noktalar Şekil 10'da uzuvların model ile eşleştirilmesi ise Şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 10: Sensörlerin sabitlendiği noktalar.

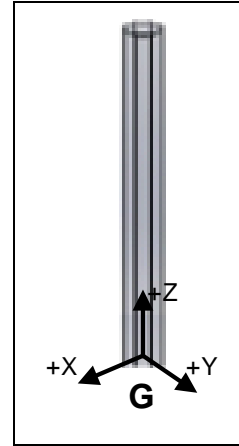


Şekil 11: uzuvlar ile modelin eşleştirilmesi.

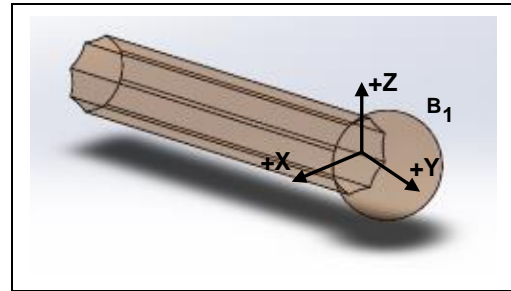
Bu çalışmada, insan kolunun; omuz kısmının açıları $\gamma_0, \beta_0, \alpha_0$ pağı kısmının açıları $\gamma_p, \beta_p, \alpha_p$ ve ön kol kısmının açıları için $\gamma_k, \beta_k, \alpha_k$ sembolleri kullanılacaktır. Omurganın uzunluğu ℓ_s ,

omuzun uzunluğu ℓ_o , pağı kısmının uzunluğu ℓ_p , ön kolun uzunluğu ℓ_k ile gösterilmektedir.

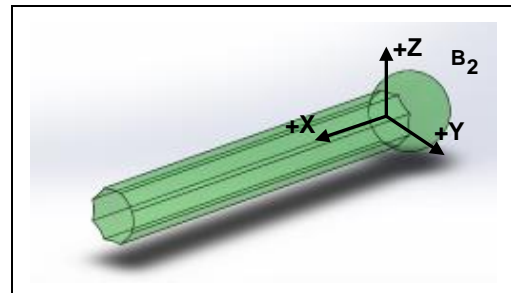
Her bir uzva, hesaplamalarda kullanmak için birer adet sanal koordinat takımı yerleştirilmektedir. Bunlar B_0, B_1, B_2, B_3 koordinat takımlarıdır. B_0 burada, G küresel koordinat takımına denk gelmektedir ($B_0 = G$). Omurga G koordinat takımına, B_1 koordinat takımı omuza, B_2 koordinat takımı pağı kısmına, B_3 koordinat takımı ön kola Şekil 12, 13, 14 ve 15'te belirtildiği gibi sabitlenmiştir.



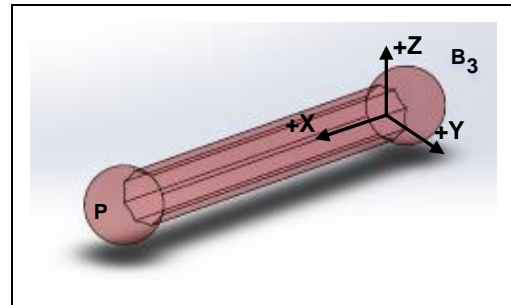
Şekil 12: G koordinat takımına omurganın sabitlenmesi.



Şekil 13: B1 koordinat takımının omuza sabitlenmesi.



Şekil 14: B2 koordinat takımının pağıya sabitlenmesi.



Şekil 15: B3 koordinat takımının ön kola sabitlenmesi.

3.8 Homojen dönüşüm matrislerinin çıkarılması

Homojen dönüşüm matrisleri, G küresel koordinat takımına göre ötelenme miktarı bilinen bir B koordinat takımında bulunan bir P noktasının, B koordinat takımının G koordinat takımına göre yaptığı dönüş hareket açıları hesaba katılarak P noktasının G koordinat takımındaki konumunun hesaplamasını sağlayan matrislerdir.

B_1 Koordinat takımının G koordinat takımına göre ötelenme miktarını veren matris ${}^G\mathbf{d}_{B_1}$ ile gösterilir. Bu matris (20)'de gösterilmiştir. Matrisin elde edilmesinde, Şekil 12 dikkate alınmıştır. Bu nedenle X ekseninde 0, Y ekseninde 0, Z ekseninde omurganın boyu (ℓ_s) kadar ötelenmiştir.

$${}^G\mathbf{d}_{B_1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ell_s \end{bmatrix} \quad (20)$$

B_2 Koordinat takımının G koordinat takımına göre ötelenme miktarını veren matris ${}^G\mathbf{d}_{B_2}$ ile gösterilir. Bu matrisin hesaplanması için önce B_2 nin B_1 e göre öteleme hesaplanması gerekir. Bunu veren matris ${}^{B_1}r_{B_2}$ (21) ile

$$\begin{bmatrix} X_{B_2} \\ Y_{B_2} \\ Z_{B_2} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_o \cos\beta_o & \cos\alpha_o \sin\beta_o \sin\gamma_o - \sin\alpha_o \cos\gamma_o & \cos\alpha_o \sin\beta_o \cos\gamma_o + \sin\alpha_o \sin\gamma_o & 0 \\ \sin\alpha_o \cos\beta_o & \sin\alpha_o \sin\beta_o \sin\gamma_o + \cos\alpha_o \cos\gamma_o & \sin\alpha_o \sin\beta_o \cos\gamma_o - \cos\alpha_o \sin\gamma_o & 0 \\ -\sin\beta_o & \cos\beta_o \sin\gamma_o & \cos\beta_o \cos\gamma_o & \ell_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\ell_o \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$${}^G\mathbf{d}_{B_2} = \begin{bmatrix} X_{B_2} \\ Y_{B_2} \\ Z_{B_2} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

B_3 Koordinat takımının G koordinat takımına göre ötelenme miktarını veren matris ${}^G\mathbf{d}_{B_3}$ ile gösterilir. Bu matrisin hesaplanması için önce B_3 ün B_2 ye göre öteleme hesaplanması gerekir. Bunu veren matris ${}^{B_2}r_{B_3}$ (26)'da gösterildiği gibidir. Matris yazılırken Şekil 14'e göre yazılmıştır. Buna göre X de paçı kısmının boyu kadar (ℓ_p), Y de 0, ve Z de 0 ötelenmiştir.

B_3 Koordinat takımının G koordinat takımına göre ötelenme miktarını bulmak için ${}^G\mathbf{T}_{B_3}$ homojen matrisine ihtiyaç duyulur.

$$\begin{bmatrix} X_{B_3} \\ Y_{B_3} \\ Z_{B_3} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_p \cos\beta_p & \cos\alpha_p \sin\beta_p \sin\gamma_p - \sin\alpha_p \cos\gamma_p & \cos\alpha_p \sin\beta_p \cos\gamma_p + \sin\alpha_p \sin\gamma_p & X_{B_2} \\ \sin\alpha_p \cos\beta_p & \sin\alpha_p \sin\beta_p \sin\gamma_p + \cos\alpha_p \cos\gamma_p & \sin\alpha_p \sin\beta_p \cos\gamma_p - \cos\alpha_p \sin\gamma_p & Y_{B_2} \\ -\sin\beta_p & \cos\beta_p \sin\gamma_p & \cos\beta_p \cos\gamma_p & Z_{B_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ell_p \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$${}^G\mathbf{d}_{B_3} = \begin{bmatrix} X_{B_3} \\ Y_{B_3} \\ Z_{B_3} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

gösterilir. Matris yazılırken Şekil 13 dikkate alınmış olup, X ekseninde 0, Y'de -y yönünde omuzun boyu (ℓ_o) kadar, ve Z'de 0 ötelenmiştir.

$${}^{B_1}r_{B_2} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\ell_o \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

B_2 Koordinat takımının G koordinat takımına göre ötelenme miktarını bulmak için ${}^G\mathbf{T}_{B_2}$ homojen matrisine ihtiyaç duyulur. Bu matris (22)'de gösterildiği gibidir. Burada, rotasyon kısmında omuzun küresel eksene göre yaptığı açılar kullanılmaktadır.

$${}^G\mathbf{T}_{B_2} = \begin{bmatrix} {}^G R_{B_2} & {}^G\mathbf{d}_{B_1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

${}^G\mathbf{d}_{B_2}$ Matrisi, (23) eşitliği ile hesaplanır.

$${}^G\mathbf{d}_{B_2} = {}^G\mathbf{T}_{B_2} {}^{B_1}r_{B_2} \quad (23)$$

Bu matris (27)'de gösterildiği gibidir. Burada rotasyon kısmında paçı kısmının küresel eksene göre yaptığı açılar kullanılmaktadır.

$${}^{B_2}r_{B_3} = \begin{bmatrix} \ell_p \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$${}^G\mathbf{T}_{B_3} = \begin{bmatrix} {}^G R_{B_3} & {}^G\mathbf{d}_{B_2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

${}^G\mathbf{d}_{B_3}$ Matrisi (28) eşitliği ile hesaplanır.

$${}^G\mathbf{d}_{B_3} = {}^G\mathbf{T}_{B_3} {}^{B_2}r_{B_3} \quad (28)$$

P Noktasının G koordinat takımına göre ötelenme miktarını veren matris ${}^G\mathbf{d}_p$ ile gösterilir. Bu matrisin hesaplanması için önce P noktasının B_3 'e göre öteleme hesaplanması gerekir. Bu hesaplama (31)'de verilen ${}^{B_3}r_p$ matrisi ile yapılabilir. Matris yazılırken Şekil 14 dikkate alınmıştır. Buna

göre X de ön kolun boyu kadar (ℓ_k), Y'de 0, ve Z de 0 ötelenmiştir.

$${}^{B3}r_p = \begin{bmatrix} \ell_k \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

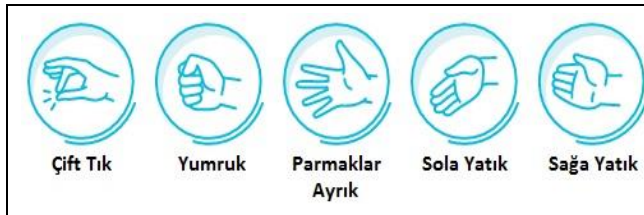
P Noktasının G koordinat takımına göre ötelenme miktarını bulmak için ${}^G T_p$ homojen matrisine ihtiyaç duyulur. Bu matris

$${}^G d_p = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_k \cos\beta_k & \cos\alpha_k \sin\beta_k \sin\gamma_k - \sin\alpha_k \cos\gamma_k & \cos\alpha_k \sin\beta_k \cos\gamma_k + \sin\alpha_k \sin\gamma_k & X_{B3} \\ \sin\alpha_k \cos\beta_k & \sin\alpha_k \sin\beta_k \sin\gamma_k + \cos\alpha_k \cos\gamma_k & \sin\alpha_k \sin\beta_k \cos\gamma_k - \cos\alpha_k \sin\gamma_k & Y_{B3} \\ -\sin\beta_k & \cos\beta_k \sin\gamma_k & \cos\beta_k \cos\gamma_k & Z_{B3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ell_k \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$${}^G d_p = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

4 Tutucu kontrolü

Tutucunun parmak hareketleri ile kontrol edilebilmesi için, parmak hareketlerinin algılanması MYO kol bandı ile sağlanmıştır. MYO kol bandı üstünde bulunan EMG sensörleri, kol kaslarındaki elektriksel değişimleri algılayan sensörlerdir. Kasların kasılma miktarına ve kasılma şekillerine göre farklı elektrik yükleri oluşur. Elin yaptığı her hareketin farklı bir elektriksel işareti vardır. MYO kol bandı bu elektrik işaretlerini algılayarak anlamlandırmaktadır. MYO kol bandına Arduino IDEsi için üreticisi tarafından bir kütüphane yazılmıştır. Bu kütüphane MyoDuino seri haberleşme arayüzü ile ortaklaşa çalışmaktadır. Bu kütüphanede elin bazı duruşları tanımlıdır, bunlar; çift tık, yumruk, parmaklar ayırık, sola yatık ve sağa yatık duruşlarıdır. Kütüphaneye tanımlı el hareketleri Şekil 16'da görülmektedir.



Şekil 16: Kütüphaneye tanımlı el hareketleri [31].

Robot ucuna takılı üç parçalı tutucu, Festo HGD-16-A model pnömatik tutucudur. Açık ve kapalı olmak üzere iki adet konumu vardır. Tutucu pozisyonları Şekil17'de görülmektedir. Robottan gelen dijital bilgi ile elektro pnömatik valf kontrol edilerek ilgili konumuna getirilir. Dijital çıkış "1" ise kapalı, "0" ise açık konumunu almaktadır.

Tutucunun kontrol edilebilmesi için elin konumuna göre dijital çıkış bilgisinin oluşturulması yeterli olacaktır. Bundan dolayı sadece kütüphanede tanımlı el hareketleri kullanılmıştır. Buna göre sadece yumruk pozisyonunda dijital çıkış "1", diğer pozisyonlarda "0" bilgisi verecek şekilde program hazırlanmıştır.

(32)'de gösterildiği gibidir. Burada rotasyon kısmında ön kolun küresel eksene göre yaptığı açılar kullanılmaktadır.

$${}^G T_p = \begin{bmatrix} {}^G R_p & {}^G d_{B3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

${}^G d_p$ Matrisi (33) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

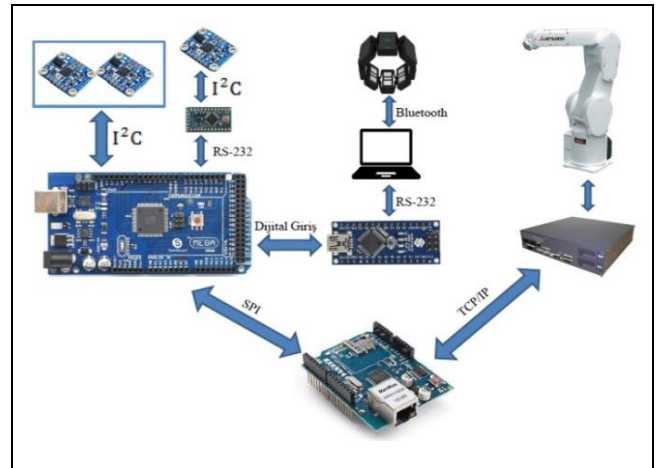
$${}^G d_p = {}^G T_p {}^{B3}r_p \quad (33)$$



Şekil 17: Tutucu pozisyonları (Açık-Kapalı).

5 Yazılım tasarımı

Sistemde ana denetleyici olarak Arduino Mega kartı kullanılmış olup, çevre birimlerin bu kart ile ve robot ile haberleşmesini gösteren haberleşme şeması Şekil 18'de sunulmuştur.



Şekil 18: Haberleşme şeması.

Arduino Mega kartı ethernet haberleşmesi destekli bir kart değildir. Ancak Arduino kartları için geliştirilen Wiznet 5100 entegreli ethernet kartı ile ethernet haberleşmesi kurabilir. Bu ethernet kartı, Arduino ile SPI protokolü ile haberleşerek ethernetten gelen veriyi kontrolcüye aktarır ya da kontrolcüye göndermek istediği veriyi SPI ile önce ethernet kartına, ethernet kartıda, ethernet ile hedef cihaza aktarır.

Ethernet kartı, kontrolcüye sensörlerden gelen veriler ile hesaplanan X, Y, Z koordinatlarını, TCP/IP protokolü ile robot kolunun denetleyicisine aktarır. Tasarlanan sistemde kontrolcü sadece veri yollar ve robottan bir veri almaz. Bu sistem için en uygun yöntem kontrolcünün kullanıcı (client) yapısında, robotun ise sunucu (server) yapısında kurulmasıdır.

Haberleşme sırasında veri kaybı olmaması için, tampon sahalarını (buffer) doldurup trafığe yol açmamak için ve güvenlik için, robot belirtilen konuma gitmedikçe yeni verinin gönderilmemesi sağlanmıştır.

Gerçekleştirilen yazılım tasarımı iki ana başlıkta incelenebilir. İlki, Robot denetleyicisi için oluşturulan yazılımdır. Bu program başlar başlamaz robot kolu mevcut pozisyonundan düşük hızda hareket ederek daha önce öğretilmiş olan başlangıç pozisyonuna (home pozisyonu) gelir. Ethernet haberleşmesi kurulana kadar bu pozisyonda bekler. Ethernet haberleşmesi kurulduktan sonra robot öğretilmiş bir referans pozisyona hareket eder. Daha sonra Ethernet üzerinden kontrolcüye son konum bilgisi yollanır. Ethernet tamponu kontrol edilir ve yeni konum bilgisi gelene kadar beklenir. Yeni konum bilgisi gelince yeni pozisyona gidilir. Bu işlem döngüsel olarak sürekli tekrarlanır.

Gerçekleştirilen ikinci yazılım tasarımı ise sistemdeki ana denetleyici olan Arduino Mega kartı içindir. Programın başlangıcında, robot denetleyicisi ile haberleşmenin kurulmasına çalışılır. Haberleşme kurulursa; program kaldığı yerden çalışmaya devam eder, eğer kurulamazsa; program zorunlu olarak bitirilir. Ethernet bağlantısı kurulduktan sonra sensörler ile SPI üzerinden bağlantı kurulmaya çalışılır. Tüm sensörlerden bağlantının kurulduğu teyit edilerek program işletilmeye devam eder. Sensörlerle bağlantı kurulamaması durumunda program sonlandırılır. Daha sonra sensörlerin kalibre edilme aşamasına geçilir sensörlerden gelen değerler bilgisayar ekranına gösterilir ve kullanıcıdan sensörleri hareket ettirmesi istenir değerler makul seviyeye gelip gelmediği kullanıcı onayına bakılır kullanıcı onay verene kadar sensör kalibrasyon işlemi devam eder. Kalibrasyon işleminin tamamlanmasının ardından ana program döngüsü işletilir. Bu ana döngüde önce robotun güncel konum bilgisinin gönderilmesi beklenir. Robot programında, robot istenen noktaya varduktan sonra konum bilgisi gönderir. Böylelikle robotun pozisyona ulaşmasından sonra yeni konum gönderilerek tampon sahalarında (buffer) dolmanın önüne geçilir.

Ana döngü içerisinde; omuz, pazu kısmı ve koldaki sensörlerden senkron bir haberleşme protokolü olan SPI (Serial Peripheral Interface) protokolü ile açılış değerleri okunur. Bu açılış değerleri ile daha önceden programa girilen sabit uzuv uzunluk değerleri ve (24), (29) ve (34)'te sunulan homojen dönüşüm matrisleri ile avuç içinin konumu hesaplanır. MYO kol bandından gelen dijital girişe bakılarak avucun açık veya kapalı olduğu bilgisi elde edilir. Robotun hesaplanan konuma yönlendirilmeden önce güvenlik amaçlı olarak hesaplanan pozisyonun tanımlanan güvenli hareket bölgesi içerisinde kalıp kalmadığı

test edilir. Avuç içinin konumu ve MYO bilgisi birleştirilerek "x, y, z, el bilgisi (0 ya da 1)" Ethernet üzerinden robot denetleyicisine aktarılır. Bu işlem döngü içerisinde sürekli tekrarlanarak insan kol ve el hareketiyle robotun kontrolü sağlanmış olur.

Elde edilen kodlar ilgili denetleyicilere yüklenerek sistemin çalışması incelenmiştir. Yapılan denemeler sonucunda, robot kolunun ve tutucunun insan kolu ve eliyle robotun ve tutucunun tasarlandığı gibi hareket ettiği gözlemlenmiştir. İlgili hareketlere ait görseller Şekil 19 ve 20'de sunulmuştur.



Şekil 19: Kol ile Robot hareket göstergesi.



Şekil 20: El ile tutucunun kontrolü.

Örnek bir kol hareketi için, sensörlerden alınan açılış bilgileri kullanılarak hesaplanan konum ile robotun ulaştığı gerçek konum incelenmiştir. Alınan konum verilerinin zaman göre

değişimi x, y ve z eksenleri için sırasıyla Şekil 21, Şekil 22 ve Şekil 23'te sunulmuştur.

Şekillerden görülebileceği üzere robot, insan kolu ile aynı karakterde hareket etmektedir. Sensör verilerin işlenmesi ve konum hesaplanmasının ardından robota gideceği konum bilgisi gönderilmektedir. Bu nedenle grafiklerdeki hesaplanan konum ile gerçek konum değerleri arasında zaman gecikmesi mevcuttur. Başlangıç noktası olan t=0 sn. anına dikkat edilecek olursa hesaplanan konumlara robot yaklaşık olarak 0.2 sn. sonra gidebilmektedir. Güvenlik önlemi olarak robotun zeminde bulunan platforma çarpmaması için Z ekseninde 400 mm altına erişimi kısıtlanmıştır. Şekil 23'te bu durum görülmektedir.

6 Tartışma

Sunulan çalışmada AÖB birimleri ve EMG sensörü içeren kol bandı ile insan kol ve el hareketlerinin endüstriyel bir robota taklit ettirilmesi sağlanmıştır. Literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında, farklı kombinasyonlarda, farklı model ve yapılarla sensörler kullanılarak insan kolunun yönelimi ve pozisyonu belirlenmeye çalışılmıştır. Önerilen çalışmanın literatüre en önemli katkısı; kol yönelimi ve el hareketinin birlikte dikkate alınması ile insana özgü davranışın daha gerçekçi algılanarak endüstriyel robot kontrolünün sağlanmasıdır. Sunulan çalışmaya konu itibarı ile benzer çalışmalar [22],[28] ve [29] No'lu kaynaklarda verilen çalışmalar olup, makale kapsamında önerilen çalışmadan farkları Tablo 1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sunulan çalışmada sistemin zaman gecikmesinin kısıtlılığı literatürdeki çalışmalara kıyasla ön plana çıkmaktadır.

7 Sonuçlar

Bu çalışmada, insan-robot etkileşimini sağlamak üzere, endüstriyel robotların hareketinin, insan kol ve el hareketlerinin taklit edilmesiyle sağlandığı bir biyomimetik yaklaşım önerilmiş ve gerçekleştirilmiştir. Çalışmada robotun

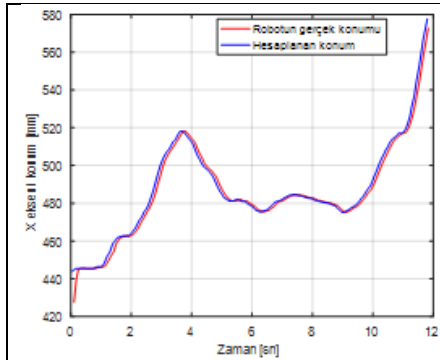
konum kontrolü ve tutucu kontrolünün her ikisi de dikkate alınmıştır. Konum kontrolü için içinde ivmeölçer, jiroskop ve manyetometre bulunduran tümeleşik sensör kartları, tutucu kontrolü için ise bünyesinde EMG sensörleri bulunduran Myo kol bandı kullanılmıştır. İnsan el konumunun, omurga üzerinde belirlenen orijin noktasına olan konum değişimi modellenmiştir. İnsan koluna giydirilen ataletsel ölçüm birimi içeren sensörler yardımıyla bu uzuvların küresel sistemde yaptıkları yuvarlanma, yalpalama ve sapma açıları ile uzun uzunlukları kullanılarak konum hesabı yapılmıştır. Tutucu kontrolü için ise EMG sensörü içeren kol bandı kullanılmıştır. Oluşturulan sistem, gerçek bir endüstriyel robotun insan kol ve el hareketleriyle kontrolünde başarılı biçimde kullanılmıştır. Bu sistem ile insan-robot etkileşimi sağlanmış olup, insan için zararlı ortamlarda uzaktan kontrol için, hassas ve ulaşılması zor robotik boya uygulamalarında ve robot programlamada güncel bir konu olan uygulayarak programlama (programming by demonstration) çalışmaları için kullanılabilir niteliktedir.

8 Teşekkür

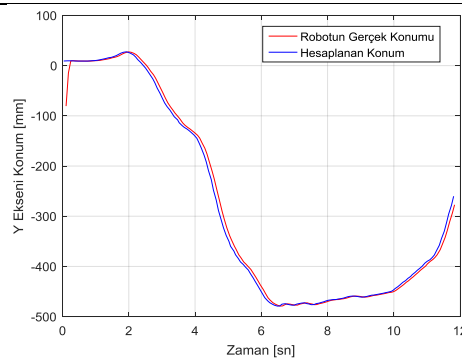
Bu çalışma "Endüstriyel Manipulatörler için Biyomimetik Kontrolör Tasarımı" adlı TÜBİTAK 2209-A projesi kapsamında desteklenmiştir. Çalışmada Mitsubishi Electric tarafından hibe edilen endüstriyel robot kullanılmıştır.

9 Kaynaklar

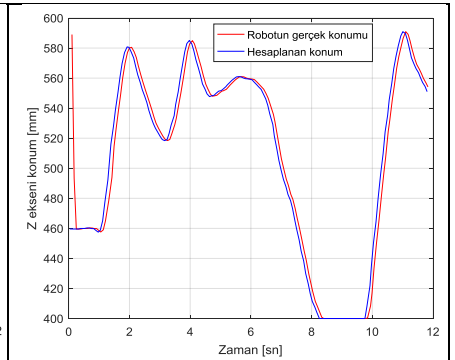
- [1] Peshkin MA, Colgate JA, Wannasuphprasit W, Moore C, Gillespie RB, Santos-Munne J, Lorenz A, Akella P. "Cobot architecture". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17, 377-390, 2001.
- [2] Colgate JA, Peshkin MA, Wannasuphprasit W. "Nonholonomic haptic display". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia, PA, 23-27 April, 1996.



Şekil 21: X eksenini için hesaplanan konum ve Robotun gerçek konumu.



Şekil 22: Y eksenini için hesaplanan konum ve Robotun gerçek konumu.



Şekil 23: Z eksenini için hesaplanan konum ve Robotun gerçek konumu.

Tablo 1: Literatür ve performans karşılaştırması.

	Gültekin Y. [22]	Shin ve diğ. [28]	Neto ve ark [29]	Sunulan Çalışma
Kullanılan Sensörler	İvmeölçer ve Jiroskop	EMG Sensörü	İvmeölçer	jiroskop ve manyetometre
Tutucu Kontrolü	YOK	VAR. (EMG sensör)	YOK	EMG Sensörü (Myo kol bandı)
Zaman gecikmesi	0.5 s	6 s	0.16 s	0.2 s
Yöntem	Kinematik Hesap Kalman Filtresi	Sürekli ve ayrık sistem (durum makinesi) modeli	Yapay Sinir Ağı (Başarım oranı %92)	Kinematik Hesap ve Pozisyon arttırma
Kullanılan Robot	Stäubli Rx160	Kinova MICO	Motoman HP6	Mitsubishi RV7FL

- [3] Green SA, Billingham M, Chen X, Chase G. "Human-Robot collaboration: A literature review and augmented reality approach in design". *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 5(1), 1-18, 2008.
- [4] Steinfeld A, Fong T, Kaber D, Lewis M, Scholtz J, Schultz A, Goodrich M. "Common metrics for human-robot interaction". First ACM SIGCHI/SIGART Conference on Human-robot interaction. Salt Lake City, Utah, USA, March 02 - 03 2006.
- [5] Groom V, Nass C. "Can robots be teammates?: Benchmarks in human-robot teams". *Interaction Studies*, 8(3), 483-500, 2007.
- [6] Michalos G, Makris S, Papakostas N, Mourtzis D, Chryssolouris G. "Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2(2), 81-91, 2010.
- [7] Krger J, Lien T, Verl A. "Cooperation of human and machines in assembly lines". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 58(2), 628-646, 2009.
- [8] Baxter Robot, "How rethink robotics built its new baxter robot worker". <https://spectrum.ieee.org/robotics/industrial-robots/rethink-robotics-baxter-robot-factory-worker> (15.04.2019).
- [9] Sawyer Robot, "Sawyer: Rethink robotics unveils new robot". <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/sawyer-rethink-robotics-new-robot> (15.04.2019).
- [10] Bauzano E, Estebanez B, Garcia-Morales I. "Collaborative human-robot system for HALS suture procedures". *IEEE Systems Journal*, 10(3), 957-966, 2014.
- [11] Ying C, Jia-fan Z, Can-Jun Y, Bin N. "Design and hybrid control of the pneumatic force-feedback systems for Arm-Exoskeleton by using on/off valve". *Mechatronics*, 17, 325-335, 2007.
- [12] Tafazzoli F, Safabakhsh R. "Model-based human gait recognition using leg and arm movements". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 23(8), 1237-1246, 2010.
- [13] Poppe R. "Vision-based human motion analysis: An overview". *Computer Vision and Image Understanding*, 108(2), 4-18, 2007.
- [14] Jun S, Park J, Park C, Jung IK, Kim YO. "Morphological approach of stereo camera based human motion capture system". International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul Korea, October 17-20 2009.
- [15] Takeda R, Tadano S, Natorigawa A, Todoh M, Yoshinari S. "Gait posture estimation using wearable acceleration and gyro sensors". *Journal of Biomechanics*. 42(15), 86-94, 2009.
- [16] Zhou, H, Stone T, Hu H, Harris N. "Use of multiple wearable inertial sensors in upper limb motion tracking". *Medical Engineering & Physics*. 30(1), 23-33, 2008.
- [17] Bernmark, E, Wiktorin C. "A triaxial accelerometer for measuring arm movement". *Applied Ergonomics*, 33(6), 541-547, 2002.
- [18] Favre J, Luthi F, Jolles B, Siegrist O, Najafi B, Aminian K. "A new ambulatory system for comparative evaluation of the three-dimensional knee kinematics, applied to anterior cruciate ligament injuries". *Knee Surg sports Traumatol Arthrosc*, 14(7), 592-604, 2006.
- [19] Haid M, Breitenbach J. "Low cost inertial orientation tracking with Kalman filter". *Applied Mathematics and Computation*. 153(2), 567-575, 2004.
- [20] Kao C, Chen T. "Design and analysis of an orientation estimation system using coplanar gyro-free inertial measurement unit and magnetic sensors". *Sensors and Actuators A: Physical*, 144(2), 251-262, 2008.
- [21] Fourati H, Manamanni N, Afilal L, Handrich Y. "Posture and body acceleration tracking by inertial and magnetic sensing: Application in behavioral analysis of free-ranging animals". *Biomedical Signal Processing and Control*, 6(1), 94-104, 2011.
- [22] Gültekin Y. Bir Endüstriyel Robotun İnsan Kolu Hareketlerinin Ataletsel Ölçümü ile Uzaktan Kontrolü Yüksek Lisans Tezi. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.
- [23] Kashima T, Hori K. "Control of biomimetic robots based on analysis of human arm trajectories in 3D movements". *Artificial Life Robotics*, 21, 24-30, 2016.
- [24] Ahammed AP, Prabhu KE. "Robotic Arm Control through Human Arm Movement Using Accelerometer". *International Journal of Engineering Science and Computing*, 6(5), 5639-5641, 2016.
- [25] Meulen FB, Beijnum BJF, Buurke JH, Peter H. Veltink PH. "Assessment of Lower Arm Movements Using One Inertial Sensor". *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, London, UK, 17-20 July, 2017.
- [26] Syed A, Agasbal ZT, Melligeri T, Gudur B. "Flex Sensor Based Robotic Arm Controller Using Micro Controller". *Journal of Software Engineering and Applications*, 5, 364-366, 2012.
- [27] Lopes J, Simão M, Mendes N, Safeea M, Alfonso J, Neto "Hand/arm gesture segmentation by motion using IMU and EMG sensing". *Procedia Manufacturing*, 11, 107-113, 2017.
- [28] Neto P, Pires N, Moreira AP. "Accelerometer-Based Control of an Industrial Robotic Arm" *18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Toyama, Japan, 27 September-2 October, 2009.
- [29] Shin S, Tafreshi R, Langari R, "Real-time EMG-Based human machine interface using dynamic hand gestures". *2017 American Control Conference*, Seattle, USA, 24-26 May, 2017.
- [30] Bosch Sesortech. "BNO055 Smarthubs ASSNs Datasheet". <https://www.bosch-sensortec.com>, (24.08.2017).
- [31] Thalmic Labs. "MYO Arm Band". <https://www.myo.com/techspecs>, (24.08.2017).
- [32] Jazar RN. *Theory of Applied Robotics*. 2nd ed. London, Springer, 2010.