

# Balikesir Üniversitesi İkinci Nesil İnsansı Robotu “RoboTürk2”nin Ayak Tasarımı

## Leg Design of a Balikesir University Second Generation Humanoid Robot “RoboTurk2”

Davut AKDAŞ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği  
Balikesir Üniversitesi  
akdas@balikesir.edu.tr

### Özet

Günümüzde genel olarak yürüten robotların ayak tasarımları, eklemlerin hareket kabiliyetlerini sınırlandıracak şekilde tasarlanmıştır. Bu çalışmada insansı robotun eklem hareketleri, tüm düzlemlerde iki yönde serbestçe dönme sağlamaktadır. Bu mekanik eklem tasarımı, eklem hareketlerinin kontrolünde oluşan kutup noktaları nedeniyle kontrol zorluğuna sebep olmakla birlikte, robotun hareket kabiliyetini arttırmaktadır. Bunun sonucu olarak geliştirmekte olunan insansı robot simetrik yapıya sahip olmuştur. Robotun mekanik hareket kabiliyeti açısından ön-arka ve sağ-sol yön kavramları yoktur. Bu tasarım sayesinde, robot diz eklemleri her iki yönde hareket edebildiğinden, robot öne veya arkaya yürürken aynı hareket algoritmalarını kullanabilecektir.

### Abstract

Nowadays most of humanoid robots' leg designs constrict their movement to a single region of a motion plane. In this study, all joints of the robot are designed to move freely in both regions of their motion planes. Though, the mechanical design of the joints cause singularities, the design enables robot extremities to have a wider range of motion. These lead to symmetric humanoid robot structure. In terms of joints' motions, front-back and left-right are the same. With this design, robot knees can move in both directions, therefore robot can walk forward or backwards using the same locomotion algorithms.

### 1. Giriş

Ayaklı robotlar ve özellikle insansı iki ayaklı robotların, bizlere gündelik hayatımızda hizmet etme ve bazı iş yükünü hafifletme potansiyeli vardır. Bu potansiyel günümüzde gerçekleşmemekle birlikte, insansı robotların geliştirilmesine yönelik ciddi çalışmalar vardır [1 – 5]. İnsansı robotlar, insanların anatomik yapılarından etkilenmiş olmalarına rağmen, insan anatomisinin bire bir kopyaları olmalarına gerek yoktur, ayrıca bu fiziksel olarak mümkün olmamakla birlikte, pratik de değildir. Ayak tasarımı bu tür robotların geliştirilmesinde ilk ve en önemli adımdır. Geliştirilen neredeyse tüm ayaklı robotlarda, diz eklemi sadece yan düzlemin tek bölgesinde hareket edebilecek şekilde

tasarlanmıştır. Bu durum insan diz eklemi bir benzeridir. İnsanlar ayakları üzerinde dik olarak yürüyebilirken, ASIMO ve PETMAN gibi birçok robot dizleri hiçbir zaman dik olmayacak şekilde yürüyebilmektedir. Bu robotların diz eklemlerinin hareketleri mekanik olarak sınırlandırılmıştır. Çünkü ayak eklemlerinin dikeyle tam dik olarak hizalı olduğu durumda, eklemlerin bu bölge etrafında kontrolünü zorlaştıran kutup noktaları (singularity) ortaya çıkmaktadır. Bu problemin etrafından dolanmak mümkündür. Bunun için robotun moment iz düşüm noktalarının belirlenmesi ve eklemlerin buna uygun sürülmesi gerekmektedir.

Balikesir Üniversitesi BAP birimince desteklenen “İnsansı robot için prototip ayak tasarımı ve imalatı” isimli araştırma projesi kapsamında yukarıda bahsi geçen ayak tasarımı prensibi açısından sonuncu yöntem tercih edilmiştir. Bu bakımdan dünyada geliştirilen insansı robotlardan farklı bir çizgiye araştırma ve geliştirme çalışması yapılmaktadır.

## 2. İnsansı Robot Ayak Tasarımı

### 2.1 Mekanik Özellikler

Geliştirilen ve imalatı yapılan robot ayağının toplam altı aktif serbestlik derecesi vardır. Ayak bileği iki, diz eklemi tek ve kalça eklemi üç yönde hareket edebilmektedir. Tüm eklemlerde Maxon DC motor, 156:1 dişli dönüşüm oranı ile eklemleri sürmektedir. Nominal olarak (sürekli olarak) eklemlere verilebilecek tork 4.1Nm iken zorlanma durumunda bu değer 30Nm'ye kadar kısa süreliğine çıkabilmektedir. Eklem açıları, eklem şaftlarına kaplin ile bağlı potansiyometreler ile okunmaktadır. Kaplinler potansiyometre şaftları ile eklem şaftları arasındaki herhangi bir geometrik sapmayı kendi üzerinde düzeltme yapması için kullanılmıştır. Dişli kutusunun çıkış şaftında diş profil özelliklerinden kaynaklı olarak 3–4 dereceye kadar boşluk olabilmektedir (backlash). Bu nedenle de eklem şaftı üzerinden doğrudan konum okuma gerçekleştirilmiştir. Bu dişli boşluğunun yürüme esnasında oluşturacağı olumsuzlukların, tasarlanacak uygun eklem yörüngeleri ile çözülmesi planlanmaktadır.

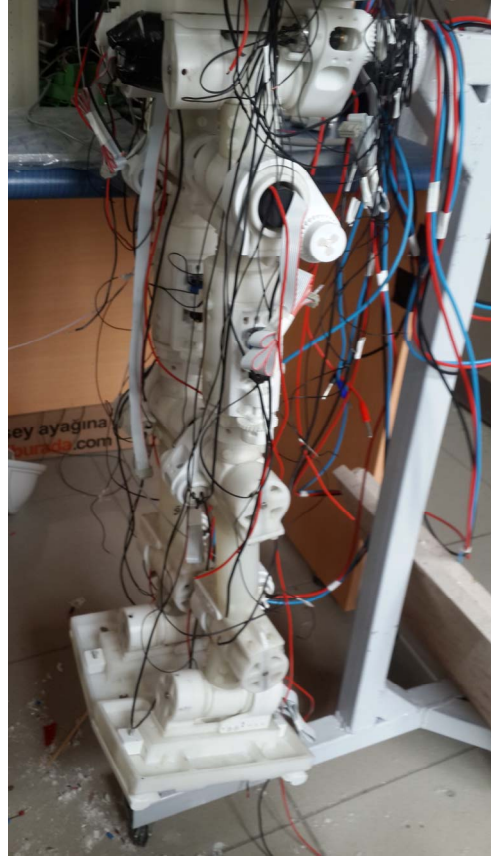
Robotun tasarımında Solidworks kullanılmıştır. Programın montajlama özelliği sayesinde, bireysel tasarım parçalarının iyileştirme işlemi kolaylıkla gerçekleştirilmiştir. Robotun

imalatında Delrin ve ABS (Akrilonitril bütadien stiren) kullanılmıştır. Yük taşıyıcı parçalar delrinden ve talaşlı imalat yöntemi ile üretilmiştir. Devre tutucu ve sensör tutucu parçalar 3B (üç boyut) hızlı prototipleme yöntemi ile ABS den üretilmiştir. Mevcut 3B yazıcı amatör bir model olduğundan, ABS malzemenin özelliği ve parça geometrik karmaşıklığı sınırlıdır. Bir önceki insansı robot projemiz “RoboTürk”ün [6] imalatında alüminyum alaşımı kullanılmıştı. İlk robot yaklaşık 55kg iken, “RoboTürk2” yaklaşık 10kg’dır. Robotun ağırlığının azalmasının sebepleri arasında özgül ağırlığı daha düşük malzeme kullanılması ve tasarım(?) ayak tasarım önceliklerinin değiştirilmesidir. Ayak tasarımında, robot ayağının toplam çalışma süresi tahmin edilmiş ve bunu karşılayacak tasarım yapılmıştır. Tipik olarak bir deney 20 saniye civarında sürmektedir ve toplam deney sayısı 500 civarında olacağı tahmin edilmiştir. Bu durumda robot ayak eklemlerinde oluşabilecek aşınma veya yıpranmaların, robot pratik ömrü içerisinde olacağı tahmin edilmiştir. Ayrıca 156:1 dişli oranı ile bir eklemin azami hızı 200 derece/saniye civarında olacaktır. Bu düşük eklemler açılma hızları nedeniyle, eklemler parçalarının birbirleri üzerinde kaymalarında herhangi bir olumsuzluk oluşması beklenmemektedir. Tüm bu tasarım özellikleri, yaklaşık olarak aynı boyutlarda olan iki robot arasında beş kata kadar ağırlık farklılığına neden olmuştur. Şekil 1 ve 2 robot ayaklarının yandan ve önden göstermektedir. Robot ayaklarının mekanik imalatları tamamlanmış, elektrik motorları ile sensörlerin elektronik kartlara bağlanması devam etmektedir.

## 2.2 Kinematik Özellikler

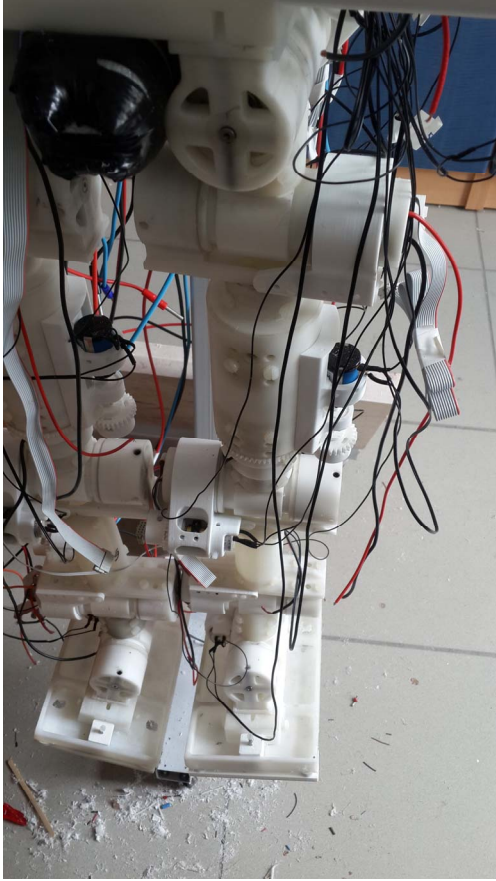
Geliştirilen robot ayağının diz eklemi yan düzlemde iki yöne hareket edebilecek şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Başka bir deyişle robot bir insan gibi veya bir kuş gibi, dizleri insanlara göre terse bükük şekilde yürüyebilecektir. Şekil 1 ve 2 de görüldüğü gibi robotun diz eklemi hareketini sınırlandıracak mekanik, diz kapağı gibi, bir engel yoktur. Bu tasarım robotun yürürken ön veya arka kavramlarının olmamasını sağlar. Teorik olarak robotun öne yürürken veya arkaya doğru yürürken (geri-geri), aynı yürüme algoritmalarını kullanabilmesini sağlar. Ayrıca özellikle tırmanış gibi faaliyetlerde, diz eklemi diğer yöne bükülebilmesi bir avantaj olabilir.

Robot ayak eklemlerinin sıralaması yapılırken aynı düzlemde hareket edecek olanların, birbiri ardı sıra gelmesine özen gösterilmiştir. Bu eklemler sıralaması, kinematik ve dinamik denklemlerin daha sade yapılarda ve anlaşılır olmasına yol açmaktadır. Eklemlerin açıları ister istemez mekanik bağlantılar nedeniyle sınırlanmaktadır. Tüm eklemler için dikey eksen sıfırlama çizgisi olarak alınmıştır. Buna göre tüm eklemlerde  $\pm 60$  derece civarında hareket kabiliyeti sağlanmıştır. Diz eklemi açısından bu değer, bir insanın aynı eklemindekinden daha büyük bir değerdir.

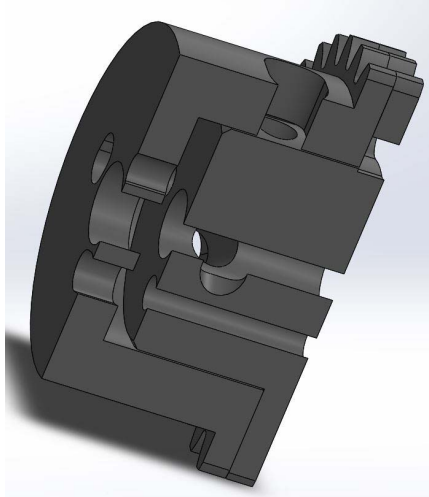


Şekil 1: Robot ayaklarının yandan görünüşü.

Robot eklemlerinin açılarını ölçmede Vishay Servo potansiyometreler kullanılmıştır. Bunlar yaklaşık 320 derece açı ölçebilmektedirler. Eklem açı ölçüm hassasiyetini arttırmak için 52/30 dişli dönüşümü kullanılmıştır. Burada kullanılan dişliler hızlı prototiple ile ABS den üretilmiştir. Diş modülleri 1’dir. Eklem açıları okurken ilave bir hatayı en aza indirmek için iç içe ikili düz dişli sistemi şekil 3 deki gibi tasarlanmış ve imal edilmiştir. Eksenel doğrultuda üç adet plastik M3 (Metrik 3) vida ile iki dişli arasındaki açısal fark ayarlanmaktadır. Potansiyometrenin dönmesi için çok az bir tork gerektiğinden, burada ABS dişli kullanımı uygun olmaktadır. Eklem açılarının ölçüm kalibrasyonu esnasında, potansiyometrelerin besleme uçlarına seri olarak bir ucuna 1kΩ sabit direnç, diğer ucuna 10 turlu trimpot bağlanmıştır. Robot ayakları dikey olarak hizalandıktan sonra, önce Potansiyometrenin gövdesi döndürülerek kaba sıfırlama yapılmakta, daha sonra trimpot bir tornavida ile döndürülerek ince sıfırlama işlemi yapılmaktadır. Tüm bu potansiyometre bağlantısı  $\pm 20$  Volt ile beslenecektir.



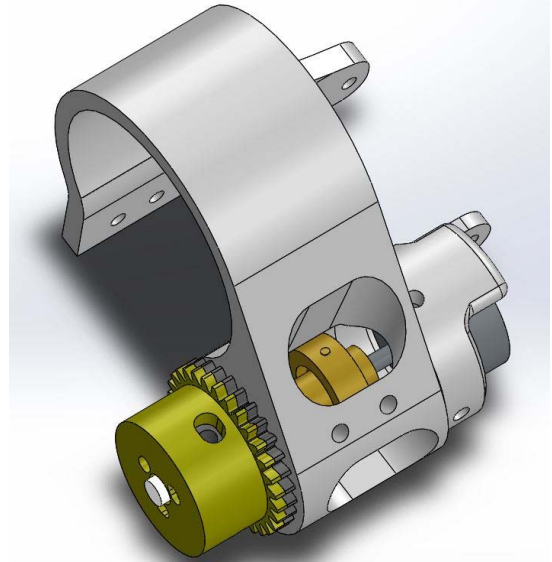
Şekil 2: Robot ayaklarının önden görünüşü.



Şekil 3: Potansiyometreye bağlı ikili dişli sistemi.

Robot eklemlerinin sürülmesi ve eklem açılarının okunması rijit mekanik elemanlar tarafından gerçekleştirildiğinden, bu

mekanik elemanlar eklem açıların hareket kabiliyetlerini sınırlandırmaktadırlar. Hızlı prototipleme ile bu sorun bir ölçüde azaltılabilmektedir. Özellikle vida ve benzeri bağlantı elemanlarının sensör bağlantısı gerçekleştirilmesinde büyük hassasiyet ve bağlantı rijitlik kaybına neden olmaktadır. Bu problemi aşmak için şekil 4 de CAD (Computer Aided Design) tasarımı gösterilen dizayn kullanılmıştır. Bu tasarımda, eklem şaftını saran ABS parça kendi üzerinde, hareket aktarımı için iki düz dişli, bir kaplin ve Vishay Servo potansiyometreyi barındırmaktadır. Bu montajlama elemanı şekil 1 ve 2 de daha açık beyaz tonda görünmektedir.



Şekil 4: Potansiyometre bağlantı montajı.

Robot ayak tasarımında ağırlık ve atalet momentlerinin mümkün olduğunca asgari değerlerde tutulması, eklem hızları ve konumlama doğruluğu açısından önemlidir. Üniversitelerde deneysel çalışmaların imalat yetersizlikleri ile kısıtlı olmasından dolayı, tasarımlar eldeki imalat imkânlarına uygun hale getirilmek zorundadır. Bu çalışma da benzer kısıtlamalar içindedir. Fakat malzeme ömrü, eklem hızlarının azami değerleri dikkate alınarak, gerekli toleranslar çerçevesinde tasarım yapılmıştır. Bu amaca hizmet etmesi için malzemelerin birbirleri ile sürtünmeli hareket etmelerine izin verilmiş ve bu sayede kütle ve atalet momentlerinde bir önceki insansı robotumuza göre azalma sağlanmıştır.

Eklemleri sürmek için oldukça yüksek tork üretebilen ve yüksek hareket hassasiyetine sahip Maxon marka DC motorlar kullanılmıştır. Tüm motorlarda olduğu gibi bu motorlar da dışarıdan gelebilecek tüm darbelere karşı hassastırlar. Motor ve dişli sistemini dış etmenlerden korumak için iç içe olan silindirik yapılar tasarlanmıştır. Şekil 1 ve 2 de ayak eklemleri arasında yatay silindirik parça olarak görülmektedir. Motorlar 24Volt ve 20Watt seçilmiştir [7]. Kullanılan 156:1 dişli olanı, teorik olarak bir adımın 0.55 saniyede atılmasına imkân sağlamaktadır. Eklemlerin rijitliği, motor dişli kutusunun boşlukları ve diğer eklem hareketini etkileyecek bozucular, bu teorik eklem hızı değerine ulaşılmasına engel olacağı düşünülmektedir.

Robotun ayakaltına basınç algılayıcı FSR (Force Sensitive Resistor) sensörleri yerleştirilmiştir. Ayağın altında dört

köşeye yerleştirilmişlerdir. FSR'lerin direnç değerleri, algılama yüzeylerine gelen toplam basınçla doğrusal olmayan bir şekilde değişmektedir [8]. Bu sensörlerin yerleştirilmesinde sadece yüzeylerine dik olacak yönde kuvvet gelmesine özen gösterilmiştir. Bu sayede yanlış okuma ve sensörün hasar almasının önüne geçilmiştir. Her bir FSR 10kg yük ölçebilecektir. Yürüme esnasında sadece ayak topuğu veya ayak ucunun yüzeye temas etmesi durumunda bile yeterli kuvvet ölçümü yapılabilecektir. FSR için tavsiye edilen uygun elektronik devre ara yüzü, FSR datasheetinde sunulmuştur. Bu devre laboratuvarımızda kurulmuş ve test edilmiştir. Tavsiye edilen devre değerleri ile belirli sonuçlar elde edilmesine karşın, robot ayağına uygun devre elemanı değerleri deneysel olarak bulunmuştur.

Robot ayak tasarımı gerçekleştirilirken en önemli tasarım parametresi bireysel mekanik parçaların nasıl montajlanacağı, hasar alan parçaların nasıl değiştirileceği ve bu parçaların mümkün olan en küçük hacimde nasıl üretilebileceğidir. FSR'ler ve sensör dişilerinin burada en kolay hasar alabilecek parçalar olduğu gözlemlenmiştir, çünkü dış ortamdan gelebilecek olumsuzluklara en açık elemanlar bunlardır. Bu sebeple bu parçaların kolay değiştirilmesi gerekmektedir. FSR sensörleri için bu işlem oldukça kolaydır. Şekil 1 ve 2 de ayak plakasının üzerinde yaya basıldığında FSR yuvasından çıkarılmakta ve sonrasında konektörlerin sökülmesiyle elektrik bağlantısı sonlandırılmaktadır.

### 3. Sonuçlar

Robot ayak tasarımı gerçekleştirilmiş ve imalatı yapılmıştır. Özellikle tasarım CAD ortamında montaj ilişkileri yardımı ile bireysel parçaların tasarımları iyileştirilmiş ve hızlı protipleme ile bilgisayar ortamında fark edilemeyen hatalar giderilmiştir. Hafif malzeme kullanımı, tasarım ömrü ve eklem hızları dikkate alınarak robotun toplam ağırlığı bir önceki robota göre beş kat azaltılmıştır. Bu ağırlık azaltılmasının, projenin ilerleyen aşamalarında önemli hareket avantajları sağlaması beklenmektedir. Hızlı protipleme özellikle eklem açılarının okunmasını sağlayacak olan potansiyometrelerin oldukça dar alana, robot eklemlerinin azami açı değerlerini fazla kısıtlamadan yerleştirilmesine imkân sağlamıştır. Kullanılan 3B yazının sarf malzemesi ABS'dir. Fakat bu cihaz profesyonel bir 3B yazıcı olmadığından, üretilen mekanik parçaların dayanımları düşüktür. Bu nedenle robot bacaklarında sadece sensör bağlantı parçalarının imalatında 3B yazıcı ile yapılmıştır.

Projenin ilerleyen aşamalarında, robotun tüm elektronik donanım ve kontrol bilgisayarı ile uyumlu çalışması sağlanacaktır. Geliştirilecek olan eklem yörüngeleri ve motor sürücü kontrol algoritmaları ile robotun temel hareketleri gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Bu çalışma Balıkesir Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Proje Birimi tarafından desteklemiştir.

Proje No:2015-29

Proje Adı: İnsansı robot için prototip ayak tasarımı ve imalatı.

### 4. Kaynaklar

[1] Kaneko, K., Kanehiro, F., Kajita, S., Yokoyama, K., Akachi, K., Kawasaki, T., Ota, S. ve Isozumi, T.,

"Design of prototype humanoid robotics platform for HRP", Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference on (Volume:3 ), 2431 – 2436, 2002.

- [2] Sakagami, Y., Watanabe, R., Aoyama, C., Matsunaga, S., Higaki, N. ve Fujimura, K., "The intelligent ASIMO: system overview and integration", Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference, 2478 - 2483 vol.3, 2002.
- [3] Raibert, M., "Dynamic legged robots for rough terrain", 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, sayfa 1, 6-8 Dec. 2010.
- [4] Sandini, G. M. ve Vernon, D., "The *iCub* Cognitive Humanoid Robot: An Open-System Research Platform for Enactive Cognition", 50 Years of Artificial Intelligence, 358-369, 2007.
- [5] Akdas, D. "An Effective Mechanical Design and Realization of a Humanoid Robot BUrobot" Acta Polytechnica Hungarica, 11(10), 115-134., 2014.
- [6] Akdas, D. ve Bicakci, S. "Türkiye'nin İlk Çok Serbestlik Dereceli Prototip İnsansı Robotunun Tanıtımı", Çukurova Üniversitesi, 30.Yıl Sempozyumu, 206-211, 2008.
- [7] <https://www.maxonmotor.com/>, Erişim Tarihi: 20/10/2016
- [8] <https://www.tekscan.com/>, Erişim Tarihi: 20/10/2016