

Servis Amaçlı Robotlarda Modüler ve Esnek Boyun Mekanizması Tasarımı ve Kontrolü

Neşe Topuz¹, Hüseyin Burak Kurt¹, Pınar Boyraz¹, Cihat Bora Yiğit¹

¹Makina Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi

İnönü Cd. No:65, Gümüşsuyu, İstanbul

{pboyraz , topuzne, kurthus , yigitci}@itu.edu.tr

Özetçe

Günümüzde özellikle servis amaçlı robotikte, tasarımlarda görsel olarak insansı özellikler taşımanın yanı sıra fonksiyonel olarak da insan davranışları/hareketleri kadar esnek olabilen, serbestlik dereceleri yüksek, hareket kabiliyeti gelişmiş mekanizmalara ihtiyaç vardır. Bu çalışmada ele alınan tasarımdaki amaç, bir servis robotunda kullanılmak üzere, hem görsel hem de fonksiyonel yönden yeterli olabilecek bir robotik kafa tasarımı yapmaktır. Robotun iletişimde olduğu insanları görebilmesi, tanıyabilmesi ve hareketlerini takip edebilmesi bazı öne çıkan fonksiyonlarıdır. Hem bunu gerçekleştirebilmek hem de doğal iletişimi desteklemek için boyun yapısının ve hareket kabiliyetinin olabildiğince insana benzemesine, görme sisteminin üç serbestlik derecesine sahip olmasına çalışılmıştır. Ayrıca son zamanlarda ihtiyaç duyulan, robotlara esneklik kazandıran, bileşenlerin kolaylıkla eklenip çıkartılabilmesi esasına dayanan modülerlik özelliği de tasarımda dikkate alınmıştır. Tasarımın son aşamasında ise ROS platformu kullanılarak boyun yapısı için elde edilmiş kinematik modeller aracılığıyla boyun mekanizmasının kontrolü de gerçekleştirilmiştir.

1. Giriş

Son yıllarda otizm vakalarında görülen artış

Bu çalışmada 4 serbestlik dereceli boyun mekanizmasının tasarımı, boyunun esneklik kabiliyetinin sağlanması ve ilerleyen aşamalarda farklı prototiplere olanak sağlamak amacıyla boyunun kendi içerisinde modülerliğinin sağlanması gibi faktörler göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiş, oluşan yapının kontrolü yapılmıştır.

İkinci bölümde tasarımı sınırlayan problemler belirlenmiş, tanımları yapıp sınırları belirlendikten sonra var olan boyun mekanizmaları da göz önünde bulundurularak en uygun çözüm uygulanmaya konulmuştur. Üçüncü bölümde boyunun katı cisim modeli tanıtılmış, UMAC'ın boyun yapısının davranışına daha uygun olan ileri ve ters kinematik modeli oluşturulmuştur. Ayrıca boyun yapısına esneklik kazandıran yayın özellikleri belirlenmiş ve analizi yapılmıştır. Dördüncü bölümde öncesinde boyun mekanizması için elde edilmiş kinematik modeller ve bunların ROS platformunda

kullanılmasıyla motorların dönmeleri sağlanmış ve kontrolleri yapılmıştır.

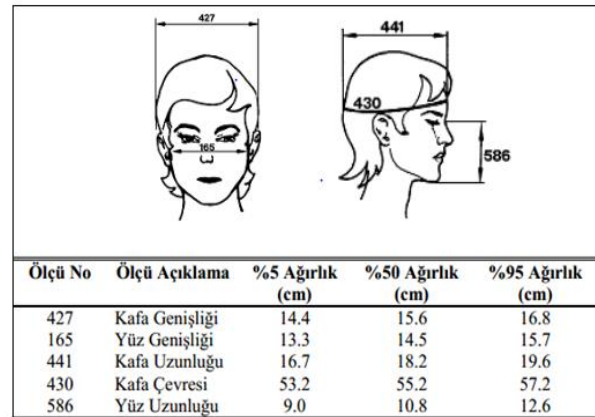
2. Tasarım Problemi Tanımı ve Sınırları

Servis amaçlı robotlarda tasarımın insan-makine etkileşimine olanak verecek şekilde gerçekleşmesi istenir. Bu doğrultuda insanların ve robotların aynı ortamda güvenilir bir şekilde yaşamaları, insanların karmaşık duygu yapılarına cevap verebilmeleri, robotların görsel ve işitsel algılama yeteneklerinin birbirleriyle iletişim kurmalarında yeterli olabilmeleri gibi unsurlar dikkate alınır.

2.1. Tasarım Probleminin Sınırları

Tasarım başlangıcında dikkat edilen iki önemli husus kafa ve boyun yapısının insana benzer yapıda olması ve hareket kabiliyetinin olabildiğince insan davranış ve hareketlerine benzer şekilde olmasını sağlamaktır. Kafa ve boyun boyutlandırılması esnasında insani özelliklere sahip olabilmesi için gerçek insan ölçülerinden yararlanılmıştır

2.1.1. Geometrik sınırlamalar



Şekil 1: Standart insan kafası geometrik ölçüleri.

Kafa yapısının insana benzer yapıda olmasını sağlamak için NASA tarafından test sonuçlarıyla elde edilen ve kadın profiline uygun olan standart ölçüler kullanılmıştır [1]. Bu

ölçülerin kullanılmasıyla birlikte kafanın fiziki yapısını oluşturan iskeletimsi plakalar tasarlanmıştır.

2.1.2. Çalışma Alanı

Kafa ve boynun hareket kabiliyetinin insana benzer nitelikte olmasını sağlamak amacıyla da kafanın yapacağı yunuslama, yalpalama ve dönme hareketleri için ölçülmüş performans değerlerinden yararlanılmıştır [2]. Böylece insanın kafa ve boyun hareket aralıklarında, robot kafa ve boyun hareketlerini gerçekleştirmektedir.

	Hareket Tarifi	Değerler
Kafa	Üst Yunuslama (Upper Tilt)	-71° / +100°
	Alt Yunuslama (Lower Tilt)	-30° / +100°
	Çevirme (Pan)	± 100°
	Yuvarlanma (Roll)	± 63,5°
	Maksimum hız	352° /s
Gözler	Maksimum ivme	3300° /s ²
	Yunuslama (Tilt)	± 40°
	Çevirme (Pan)	± 45°
	Maksimum hız	850° /s
	Maksimum ivme	82000° /s
	Yatay görüş açısı	175°
	Dikey görüş açısı	160°

Şekil 2: İnsan boynu ölçülmüş performans değerleri.

2.1.3. Modülerlik

Tasarımın oluşturulması aşamasında etkili olan bir diğer parametre yapının modülerliğinin sağlanmasıdır. İlerleyen zamanlarda farklı prototiplerin üretilmesi esnasında farklı boyun yapıları denenebilir veya boyun kısmında bulunan yayın farklı özelliklerde olması istenebilir. Bu nedenle boyun tasarımında yer alan paralel plakalar arasındaki yaylı yapının çıkarılıp yerine farklı bir mekanizmanın yerleştirilebilmesi göz önünde tutularak tasarım gerçekleştirilmiştir. Ayrıca farklı yay tipleri kullanılmak üzere kullanılan yayın değiştirilmesine olanak sağlayacak şekilde de tasarım yapılmıştır.

2.2. Literatür ve Önceki Çalışmaların Kritik Analizi

Robot tasarımında dikkat edilen robot hareketlerinin ve görsel olarak robotun insana benzerliği konularında tasarımcılar serbestlik derecesi, modülerlik, üretim kolaylığı, montaj kabiliyeti, yük taşıma kapasitesi ve hesaplanabilirlik gibi farklı parametreler doğrultusunda farklı yönlerden birbirlerine göre daha üstün robot boyun tasarımları ortaya çıkarmışlardır.

Twente Üniversitesi tarafından yapılan ve 4 serbestlik derecesine sahip boyun yapısında mekanik olarak diferansiyel tahrik mekanizması kullanılmıştır. Boynun hareketleri alt yunuslama, üst yunuslama, yalpalama ve dönme şeklindedir. Yunuslama hareketleriyle insan boyun yapısına oldukça yakın ve bu hareketi yaptığı aralık oldukça geniştir. Şekil 2' e göre insan kafasının gerçekte yaptığı yunuslama aralığı -71°- 103° tür ve bu boyun mekanizmasının hareketleri bu değerlere oldukça yakındır. Mekanizma seri mekanizmalara göre hız ve tork açısından avantajlı olmasına rağmen, mekanizmada bulunan konik dişlilerin üretimi zor ve maliyeti yüksektir [3].

Boyun mekanizmalarında tercih edilen bir diğer çözüm seri mekanizmalardır. İCub'ın boyun yapısını da 3 motoru içinde barındıran seri bir mekanizma oluşturmaktadır. İCub'ın insanlarla olan etkileşimleri göz önüne alındığında çevresinden darbe alması, devrilmesi ve kafa-boyun kısmının zarar görme olasılığı yüksektir. Seri boyun mekanizmasının sağlamlığı, kontrolünün kolay oluşu ve performansının yüksek oluşu robotun çevreden zarar görmesini engelleyerek robota avantaj sağlamaktadır. Fakat mekanizmada yer alan motorlar üst üste konulmaları sonucu hem birbirlerinin hem de kafanın yükünü taşıdıklarından diğer mekanizmalara göre daha fazla enerji harcamaktadırlar [4].

Paralel mekanizmaların kullanıldığı boyun tasarımlarında ise yüksek doğruluk, dayanıklılık ve yük taşıma kapasitesi gibi avantajlar mevcuttur. Paralel mekanizmalarda genelde sabit bir platform üzerine yerleştirilmiş birbirine paralel ayaklar bulunmaktadır. Boyun yapısının geometrisi düşünüldüğünde zaten küçük olan yapının sahip olduğu ayaklar nedeniyle çalışma alanı iyice daralmaktadır. Fakat yapılan tasarımlar sonucunda paralel yapıların ağır yük altında doğruluklarının seri mekanizmalara göre daha iyi olduğu, kinematik hesaplanabilirliğin daha kolay olduğu görülmüştür. Yapısı gereği seri mekanizmalarda uç noktaya artarak giden hatanın yerine paralel mekanizmalarda yüksek son nokta doğruluğu vardır [5].

Paralel mekanizmalardaki çalışma alanı darlığı kablolu ve yaylı mekanizmalarda ayakların yerine kabloların bulunması ve esnekliğin yay tarafından sağlanmasıyla giderilmeye çalışılmıştır. Genova Üniversitesi'nin insansı robotu James kablolu ve yaylı mekanizmalara güzel bir örnektir. James'in boyun yapısında ortada bir yay ve yayın etrafında 120° aralıklarla yerleştirilmiş üç kablo bulunmaktadır. Kafanın yunuslama ve yalpalama hareketleri bu kabloların motorlar tarafından çekilmesi ve geri bırakılmasıyla sağlanmaktadır. Yayın tepesinde bulunan motor ise dönme hareketini gerçekleştirmektedir. Kablolu ve yaylı mekanizmalar insan boyun yapısına en yakın mekanizma tipidir. Ayrıca üretimi kolay, malzeme temin edilebilirliği yüksek ve maliyeti de düşüktür. Üç kablo da eş zamanlı olarak çalışabilirse kontrolü oldukça kolaydır. Bu yapının dezavantajları kabloların sabitliğinin her zaman tutturulmasının zor olması ve yayın nerden büküleceğinin belli olmaması sebebiyle kinematik denklemlerin hesaplanmasında karşılaşılan güçlülük [6].

3. UMay Boyun Mekanizması

3.1. Katı Cisim Tasarımı ve Kinematik Model

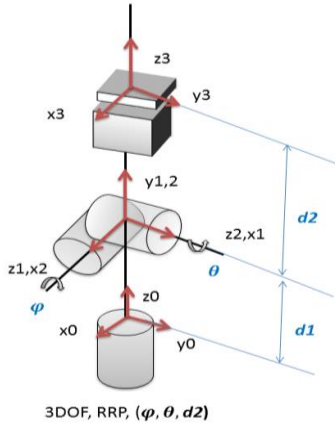
UMay'ın boyun mekanizmasının katı cisim modeli 1 adet yay, 3 adet 120° açılarla yayın etrafına yerleştirilmiş kablo ve 1 adet yayın içinden geçen kardan mafsallından meydana gelmektedir. Bu modeli James'in modelinden ayıran en büyük fark; kafanın dönme hareketini, kafaya, yayın içinden geçen kardan mafsallının aktarmasıdır. Kablolar ve kardan mafsallı 4 adet motorla döndürülmektedir. Kafanın yunuslama ve yalpalama hareketleri, bu üç adet kablonun uzunluklarının değişmesi ve yayda meydana gelen deformasyon ile gerçekleşmektedir. Kafanın dönme hareketi ise direkt olarak kardan mafsallının hareketi ile elde edilmiştir.

UMay projesinin asıl amaçlarından biri modüler bir robot geliştirmektir. Bu doğrultuda üretilen robotun kafa, boyun, gövde, kol kısımları ayrı ayrı birer modül olarak düşünüldü.

tasarım aşamasına geçilmiştir. Boyun mekanizması tasarlanırken yine modülerlik göz önünde bulundurularak tasarım yapılmıştır. Bu doğrultuda yay, kablolar, kardan mafsalı, yayı ve kabloları tutan alt ve üst plakalar çok kolay bir şekilde birbirlerinden ayrılıp tekrar bir araya getirilebilmekte ve bu işlem kısa bir süre içinde yapılabilmektedir.

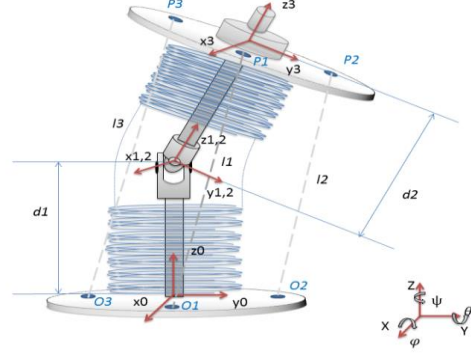
Kablolu ve yaylı mekanizmaların kinematik modeli için James'te önerilen model tasarımında bulunan yay sebebiyle her zaman doğru sonuç vermemektedir. James'in boyun mekanizmasında bulunan yay tamamen sıkıştırılmış bir yaydır ve kafanın eğilmesi durumunda yayın nereden burkulacağı tam olarak bilinmemektedir. Bu nedenle James'in kinematik modeli her zaman doğru sonuçlar vermemektedir. Bu problemi aşmak için Umay'ın boyun yapısına kardan mafsalı eklenmiştir. Bu sayede yayın nereden eğileceği her zaman bilinmekte ve kinematik modeller kolaylıkla elde edilmektedir. Ayrıca Umay'ın boyun yapısında kullanılan yay deformasyona izin veren bir bası yayıdır. James'teki gibi tamamen sıkıştırılmış bir yay değildir. Sonuç olarak James' in kinematik modeli yeterli olmadığından dolayı Umay projesinde kardan mafsalı ve bası yayı etkisi göz önüne alınarak kinematik model elde edilmiştir.

Kinematik model elde edilirken boynun alt ve üst plakalarının arasında kardan mafsallının olması ve boynun eğilme hareketini kardan mafsallının bulunduğu yerden yapması nedeniyle boyun seri bir manipülatör gibi düşünülmüştür. Boyun, yunuslama, yalpalama açıları ve yayın kardan mafsallına kadar olan kısalmasıyla birlikte seri mekanizma, RRP mekanizması olmaktadır. Mekanizma şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: Boyun mekanizmasının RRP yapısına indirgenmiş kinematik modeli.

Hareketli olan üst plaka, sabit olan alttaki plakaya göre (θ , φ , d_2) değerleri kullanılarak tanımlanabilmektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi alt plaka referans olarak alınmış ve (x_0 , y_0 , z_0) eksen takımı üzerine eklenmiştir. (x_3 , y_3 , z_3) eksenleri ise üst plaka üzerine eklenmiştir. Alt plaka ile kardan mafsalı arası uzaklık d_1 olarak tanımlanmıştır ve değeri sabittir. Kardan mafsalı ve üst plaka arasındaki mesafe d_2 olarak tanımlanmıştır ve eğilme durumunda kısalmaktadır. Kabloların plakalara bağlı olduğu yerler Şekil 4'te gösterildiği gibi alt plaka için (O_1 , O_2 , O_3), üst plaka için (P_1 , P_2 , P_3) olarak tanımlanmıştır. Boynun kinematik yapısı ise Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 4: Boyun mekanizması görünümü ve ona ait değişkenler.

İleri kinematik modelde alt taraftaki motorlara verilen açılarla kafanın yunuslama, yalpalama ve dönme açıları elde edilirken, ters kinematik modelde ise kafanın istenen bir konumu için motorların ne kadar dönmesi gerektiği hesaplanmaktadır. Bunu gerçekleştirebilmek için de alt ve üst plaka arasında bir bağlantı oluşturmak gerekmektedir. Kabloların plakalarla bağlantı noktaları olan (P_1 , P_2 , P_3) ve (O_1 , O_2 , O_3) sırasıyla üst ve alt düzlemleri tanımlamaktadır. Üst plakanın pozisyonunu alt plakaya göre tanımlamak için O_i ve P_i noktaları arasında bir öteleme matrisi oluşturulur. Dönüşüm matrisi oluşturulurken de d_1 (alt plaka ile kardan mafsalı arasındaki sabit uzaklık) sabit uzunluğu, yunuslama ve yalpalama hareketine sebep olan açıları ve d_2 (kardan mafsalı ile üst plaka arasındaki değişken uzaklık) değişken uzunluğu dikkate alınır [7].

Alt eksen takımı ile kardan mafsalı arasındaki öteleme matrisi (1) ile ifade edilir. (alt plaka ile kardan mafsalı arasındaki sabit uzaklık d_1 ile ifade edilmiştir.)

$$T_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Kardan mafsallının üzerine sabitlenmiş eksen takımı ile alt plaka arasındaki dönme hareketini ifade eden rotasyon matrisi (2) ile ifade edilir.

$$Rot_1 = \begin{pmatrix} c\theta & s\theta s\varphi & s\theta c\varphi & 0 \\ 0 & c\varphi & -s\varphi & 0 \\ -s\theta & c\theta s\varphi & c\theta c\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Kardan mafsalı ile üst plaka arasındaki öteleme matrisi (3) ile ifade edilir. (Kardan mafsalı ile üst plaka arasındaki değişken uzaklık d_2 ile ifade edilmiştir.)

$$T_{03} = T_1 \times Rot_1 \times T_2$$

$$T_{03} = \begin{pmatrix} c\theta & s\theta s\varphi & s\theta c\varphi & s\theta c\varphi d_2 \\ 0 & c\varphi & -s\varphi & -s\varphi d_2 \\ -s\theta & c\theta s\varphi & c\theta c\varphi & c\theta c\varphi d_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$P_i = [P_{i,x}, P_{i,y}, P_{i,z}]$ ve $O_i = [O_{i,x}, O_{i,y}, O_{i,z}]$ arasında aşağıda verilen (4) numaralı denklem aracılığıyla öteleme bağıntısı oluşturulmaktadır.

$$P_i = T_{03} O_i \quad (4)$$

(φ, θ, d_2) parametrelerine bağlı olan üst plakanın pozisyonu ile kablo uzunlukları arasındaki ilişki, Öklid bağıntısı ile O_i ve P_i noktaları arasındaki uzaklığın bulunması ile belirlenir. Herhangi bir kablo için bulunabilen bu uzaklık denklem (5)'teki ifade ile verilmiştir.

$$l_i = \sqrt{(P_{i,x} - O_{i,x})^2 + (P_{i,y} - O_{i,y})^2 + (P_{i,z} - O_{i,z})^2} \quad (5)$$

Kinematik çözümlerden O_i pozisyonları kullanılarak elde edilen P_i koordinatlarının doğruluğu

$$f = l_i - \sqrt{(P_{i,x} - O_{i,x})^2 + (P_{i,y} - O_{i,y})^2 + (P_{i,z} - O_{i,z})^2} = 0 \quad (6)$$

olması halinde sağlanır.

3.1.1. İleri Kinematik Model

İleri kinematik modelde motorlara verilen döndürme açılarıyla elde edilen kablo uzunluklarının bilinmesiyle kafanın yunuslama, yalpalama açıları ve yayın ne kadar sıkışacağı bulunur. Burada 3 kablunun uzunluklarının bilinmemesi nedeniyle denklem (6) üç kere yazılır ve Newton-Raphson algoritması kullanılarak bilinmeyen bu durumlar için ilk değer belirlenerek yaklaşıklıkla sonuca ulaşılır (7).

$$x_k = x_{k-1} - J^{-1} F \quad (7)$$

Burada J Jacobian matrisini temsil eder. x_k ise çözümün φ, θ, d_2 değişken değerlere sahip vektörün k. iterasyonunu gösterir [7].

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \theta} & \frac{\partial F_1}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_1}{\partial d_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \theta} & \frac{\partial F_2}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_2}{\partial d_2} \\ \frac{\partial F_3}{\partial \theta} & \frac{\partial F_3}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_3}{\partial d_2} \end{pmatrix} \quad (8)$$

3.1.2. Ters Kinematik Model

İstenilen yunuslama ve yalpalama açıları ve yay uzunlukları için kablo uzunluklarının hesaplanması ters kinematik modeli oluşturmaktadır. Kafanın istenilen hareketine göre bir kablunun boyu sabit tutulur ve kalan iki kablo aracılığıyla istenen yunuslama ve yalpalama hareketi gerçekleştirilir. Uzunluğu sabit kabul edilen kablo verilen açılara göre hareket etmeyecek taraftaki motora bağlı olan kablo seçilir ve üç durum için de ayrı ayrı algoritmalar yazılır. Tüm bu algoritmalar derlenerek tek bir ters kinematik algoritma elde

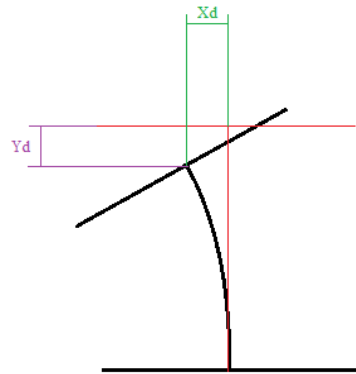
edilir. Bu algoritma verilen açı değerlerini uygun olan algoritmaya göndererek tüm kablo uzunluklarının bulunmasını sağlar ve motorlar bu kablo uzunluklarına uygun olarak dönerler. İleri kinematiğe göre fark Jacobian matrisinden kaynaklanmaktadır. L_1 uzunluğu sabit tutulduğunda hesaplamada kullanılacak Jacobian matrisi (9)'daki gibidir [7].

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \theta} & \frac{\partial F_1}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_1}{\partial d_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \theta} & \frac{\partial F_2}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_2}{\partial d_2} \\ \frac{\partial F_3}{\partial \theta} & \frac{\partial F_3}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_3}{\partial d_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{\partial F_1}{\partial d_2} \\ 1 & 0 & \frac{\partial F_2}{\partial d_2} \\ 0 & 1 & \frac{\partial F_3}{\partial d_2} \end{pmatrix} \quad (9)$$

3.2. Yay Analizi ve Mekanizmaya Katkıları

Yay analizinde amaçlanan boyun yapısında yer alan yayın x ve y eksenlerinde meydana gelen yer değiştirmelerine karşılık bu eksenlerde oluşan kuvvetlerin eksenlere ayrı ayrı etkideği düşünülerek bu kuvvetleri bulmaktır. Böylelikle yayın uzama miktarı ile uygulanması gereken kuvvet arasındaki ilişki hesaplanmıştır ve yayın yapısı gereği basmaya karşı gösterdiği davranış ile yayın eğilme durumundaki davranış incelenmiştir. Yayın eğilme durumunda x ve y eksenlerinde meydana gelen yer değiştirmeler Şekil 5' te gösterilmektedir. İki plaka arasındaki θ açısının 30° olduğu maksimum eğilme durumda x ve y ekseninde meydana gelen yer değiştirmeler sırasıyla 18.15 mm ve 32.28 mm olarak şekil üzerinden hesaplanmıştır. Buradaki amaç yaya gelen kuvvetlerin bu durumda maksimum olacağı bilindiğinden bu uzama miktarları için gerekli maksimum kuvvetlerin hesaplanması ve motorların bu kuvvetleri karşılayıp karşılayamayacağıdır.

Ayrıca uygulanan kuvvet ve uzama arasındaki ilişki olan yayın karakteristiği (k) ayrı eksenlerde her bir birim uzama için uygulanması gereken kuvvetlerin hesaplanmasıyla belirlenmiştir.



Şekil 5: Yayın eğilme durumunda meydana gelen yer değiştirmeler.

Yayın sarım sayısının hesaplanmasında maksimum eğilme durumunda yay tel çaplarının eğilen tarafta arada boşluk kalmayacak şekilde birbirine değdiği ve dış tarafta kalan telin maksimum olduğu 95 mm uzunluktaki durum göz önüne alınmıştır.

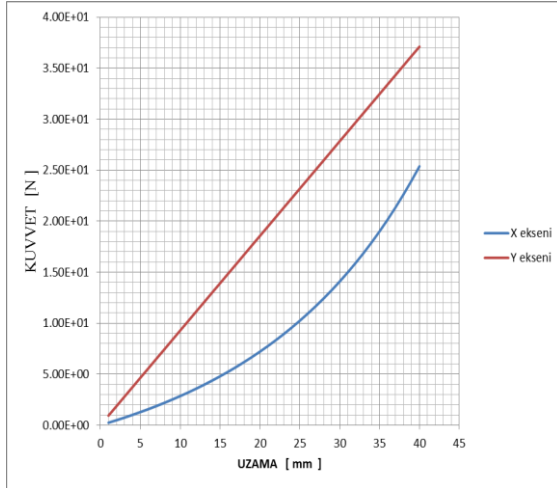
Y ekseninde meydana gelen kuvvetlerin hesaplanmasında helisel bası yayına ait formüller kullanılmıştır. Y ekseninde meydana gelebilecek her bir birim uzama deformasyon denkleminde yerine yazıldığında özellikleri belli olan yay için o uzama miktarında gerekli olan kuvvet değerleri bulunur.

X ekseninde meydana gelen kuvvetleri bulmak için yayın konsol kiriş gibi davrandığı kabul edilip, yayın eğilmesi ve yayın kesilmesiyle oluşan yerdeğiştirmelerin toplamı hesaplanır ve bu yerdeğiştirmeye karşılık uygulanması gereken kuvvetler bulunur.

Aşağıda (10) numaralı denklemle yayın x eksenindeki toplam yerdeğiştirmesi veriliyor.

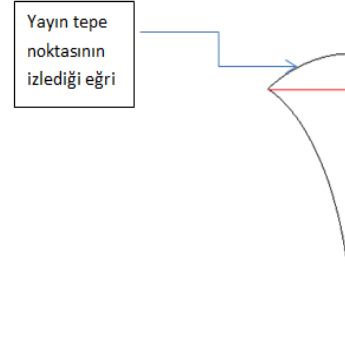
$$\gamma_r = \left(\frac{\pi \times i \times F_s \times L^2 \times \frac{d}{2}}{3 \times E \times I} \right) \times \left(1 + \frac{E}{2 \times G} + \frac{3 \times \left(\frac{d}{2} \right)^3}{L^2} \right) \quad (10)$$

Burada x ekseninde meydana gelen toplam deformasyon yerine koyularak x ekseninde uygulanması gereken kuvvet hesaplanır [8]. X eksenindeki kuvvet hesaplanırken yayın ilk boyu hesaba katılmaktadır. Ancak yayın ilk boyu eğilme esnasında sadece x doğrultusunda kısalmayıp y eksenini boyunca da kısalmaktadır. Bu nedenle hesaplama yapılırken yayın ilk boyunun sürekli değişimi de göz önünde bulundurulmalıdır. Hesaplar bu doğrultuda yapıldığında yayın lineer olmayan bir yay gibi davrandığı ve elde edilen hesapların gerçeğe daha yakın olduğu ortaya çıkmıştır. Hesaplar her bir milimetredeki kısalma için yayın ilk boyu tekrar hesaplanarak işlemler yapılmıştır.



Şekil 6:Yayın X ve Y eksenlerindeki uzama ve kuvvet grafiği.

Şekil 6'da görüldüğü üzere yayın y ekseninde hesaplar yapılırken helisel bası yayına ait formüller kullanıldığından yayın davranışı lineer olmaktadır. X ekseninde hesaplar yapılırken de yayın ilk boyu herbir birim uzama için hesaplanıp formüle konulduğunda yayın nonlineer davranış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 7:Yayın ilk uzunluğunun zamanla değişimi.

Yay x ekseninde kırmızı çizgi boyunca ilerleyip eğilmeye başladığında bir yandan da y eksenini boyunca kısalacak ve yayın tepe noktası siyah eğri boyunca hareket edecektir (Şekil 7). Bu durum x ekseninde meydana gelen kuvveti hesaplamak için konsol kiriş kabulü yapılan yayın y ekseninde de meydana gelen deformasyonu karşılayabilmek için daha fazla kuvvet uygulaması gerektiğini göstermektedir.

4. Mekanizma Kontrolü ve Uygulamalı Sonuçlar

Robotun boyun mekanizmasının yunuslama ve yalpalama serbestlikleri, bir adet bası yayı, 3 adet 120° açıyla yerleştirilmiş kablo ve bu kablolarla bağlı 3 adet motor ile sağlanmaktadır. Boyun mekanizmasının dönme hareketi direkt kafaya bağlı olan 1 adet motor ile sağlanmaktadır. UMay'ın boyun mekanizmasının kontrolü, yaylı ve kablolu mekanizması için elde edilen ileri ve ters kinematik modeller kullanılarak ROS (Robotic Operating System) platformu üzerinde gerçekleştirilmiştir.

ROS Willow Garage tarafından geliştirilmiş ve robotik uygulamalarda kullanılan bir yazılım sistemidir. ROS platformu ana hatlarıyla düğüm, düğümler arası iletişimi sağlayan mesaj ve servis olarak adlandırılan bileşenlerden oluşmaktadır. ROS platformunu tercih etmemizin temel nedeni farklı geliştiricilerin kodlarını ortak bir çatıda kolayca toplayabilmesi, parçalı bir mimari oluşturması ve prosesler arasında iletişim kurabilmesidir.

ROS platformu linux işletim sistemi yüklü bir bilgisayara kurulmuş, bilgisayar ve motorlar arasındaki iletişim, kontrol edilecek olan motorlarla bir adaptör vasıtası ile bilgisayara bağlanarak sağlanmıştır.

Boyun mekanizmasının kontrol algoritmasında, kafanın istenen konumuna tekabül eden yunuslama, yalpalama ve dönme açıları kullanıcıdan alınmaktadır. Alınan açıları boyun ters kinematik modelinden gerekli kablo uzunlukları elde edilmektedir.

Ters kinematik model için gerekli olan girdiler yunuslama, yalpalama açıları ve sabit tel uzunluğudur. Bu girdilere karşı ters kinematik modelden kablo uzunlukları elde edilir. Bu kablo uzunlukları için hangi motorun ne kadar dönmesi gerektiği hesaplanır. Boyun yunuslama, yalpalama ve dönme hareketleri için elde edilen motor açıları Dynamixel motorlara gönderilir. Motor kontrolünde Dynamixel motorların içinde

bulunan PID kontrolcüler kullanılmış ve motorlar kontrol edilmiştir. Kontrol şeması şekil 9’da verilmiştir.

Boyun mekanizmasının kontrol algoritmasının ROS platformunda düğüm, mesaj ve servisle ifadesi Şekil 8’de verilmiştir. Şekilde görülen “head_control_pub, head_control_sub, dynamixel_manager” ROS’ta düğüm bileşenlerini ifade etmekte, “UMAY_neck_command, motor_states, head_control_multi” mesaj bileşenlerini ve “inverse_kinematic” ise servis bileşenini ifade etmektedir.

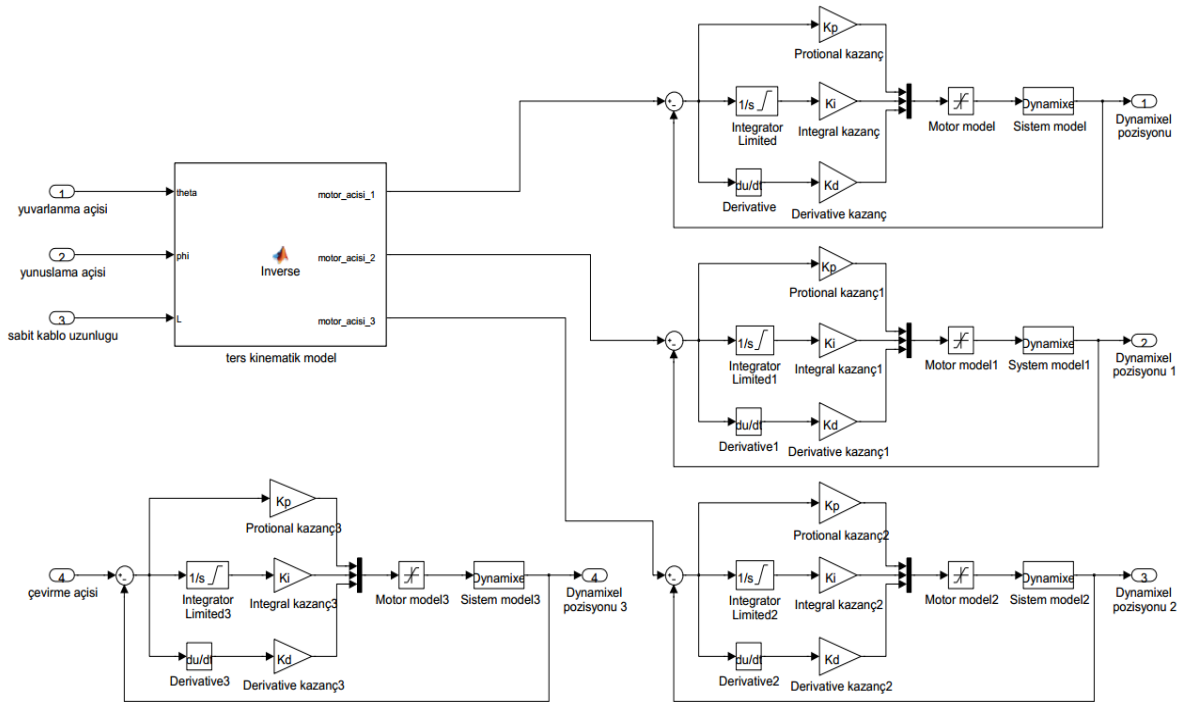
ROS’ta “head_control_pub” çalıştığında kullanıcıdan kafanın yalpalama, yunuslama ve dönme açıları alınmakta daha sonra bu açılar “UMAY_neck_command” mesajı altında yayınlanmaktadır. Yayınlanan açılar “head_control_sub” düğümü alarak bu açılar “inverse_kinematic” servis bileşenine göndermekte ve bu bileşenden girilen açılar için

gerekli kablo uzunlukları elde edilip tekrar “head_control_sub” düğüm bileşenine gelmektedir. Burada gerekli kablo uzunlukları için motorların dönmesi gereken açılar hesaplanıp “dynamixel_manager” düğümüne gönderilir. Motorlar “dynamixel_manager” düğümünden aldıkları açılar sayesinde gerekli açılarda dönerler.

Boyun mekanizmasının ROS platformu ile kontrolü ve motorların kendi içlerinde bulunan PID kontrolcüler ile kontrolü başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Boyun mekanizmasının tasarım ve kontrolü [9] numaralı referansta bulunabilir.



Şekil 8: ROS’ta düğümlerin birbirleri ile iletişim ağı.



Şekil 9: Motor kontrol şeması.

Teşekkür

UMAY projesi İTÜ-BAP tarafından Genç Araştırmacıları Destekleme Projeleri kapsamında 2011-2013 yılları arasında desteklenmiştir. Boyun tasarımının kontrol aşamasında bize bıraktığı teknik bilgi ve verilerle yol gösteren Pelin Burçak İÇER'e, bize her türlü yardımı sağlayan Umay projesinde görev alan takım arkadaşlarımıza, birçok konuda bize yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen Ertuğrul BAYRAKTAR'a, teknik personel Alev KESKİN'E ve İTÜ Mekatronik Eğitim ve Araştırma Merkezinin tüm çalışanlarına teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] NASA, Man-Systems Integration Standards, Anthropometry and Biomechanics Volume 1 - Section 3, <http://msis.jsc.nasa.gov/sections/section03.htm>.
- [2] L.C. Visser, R. Carloni, ve S. Stramigioli, "Vision Based Motion Control for a Humanoid Head," The IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems October 11-15, 2009 St. Louis, USA.
- [3] R. Reilink, L.C. Visser, J. Bennick, R. Carloni, and et al., (2009) "The Twente Humanoid Head," *IEEE Int. Conf. On Robotics and* May 17-19 2009. Kobe, Japan.
- [4] R. Beira, and et al., "Design of the Robot-Cup (iCub) Head," The 2006 IEEE the International Conference on Robotics and Automation May, 2006Vol. Orlando, USA.
- [5] J. P. Merlet, (2006). "Introduction. In *Parallel Robots*," (2nd ed.) (1-17).moving Netherlands: Springer.
- [6] F. Nori, L. Jamone, G. Metta, and G. Sandini, (2007). "Accurate control of human-like tendon –driven neck," *IEEE-RAS Int. Conf. On Humanoid Robots*, Nov.29-Dec1, pp.371-378.
- [7] P. Boyraz, C. B. Yiğit, H. O. Biçer, "UMAY: A Moduler humanoid platform for education and rehabilitation of children with autism spectrum disorders," İstanbul, Turkey.
- [8] S. Timoshenko,(1956). Torsion. "In *Strength of Materials*," (3rd ed.) (292-293).New Jersey: Princetion.
- [9] <http://www.youtube.com/watch?v=mrUHchXMqlk>