

TAŞINABİLİR VE EKONOMİK OLAN BİR KOORDİNAT ÖLÇME MAKİNASININ GELİŞTİRİLMESİ

Koray SİĞMAZ^{1, a)}, Mustafa Kaan GENÇER^{1, b)}, Mustafa Eren AYDIN^{1, c)}, Günce DUGAN^{1, d)} ve
Selçuk HİMMETOĞLU^{1, e)}

¹Hacettepe Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Beytepe 06800, ANKARA

^{a)}koraysigmaz@gmail.com, ^{b)}mustafakaangencer@gmail.com, ^{c)}mustafaeren28mea@gmail.com,
^{d)}guncedugan@gmail.com, ^{e)}s.himmetoglu@hacettepe.edu.tr

Bu çalışmada, Hacettepe Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Araç Çarpışma Güvenliği Laboratuvarı için geliştirilen taşınabilir koordinat ölçme makinasının tasarımı anlatılmıştır. 5 serbestlik dereceli bir Puma robotu baz alınarak geliştirilen bu ölçüm cihazının asıl amacı bir araç koltuğuna oturan insanlar üzerinde anatomik noktaların koordinatlarını bulmaktır. Böylelikle koltuk ve insan modeli tasarımlarında ihtiyaç duyulan geometrik parametrelerin değerleri pratik ve ucuz bir şekilde hesaplanabilmektedir. Bu cihazın öne çıkan özelliği sadece 250 USD maaliyetle yeterli doğruluğa ve hassasiyete sahip olarak üretilmiş olmasıdır. Bir robot kolu olan bu cihazın işlem aygıtı olan probunun koordinatları, uzuvlar arasındaki eklemlerde bulunan potansiyometre ölçümleri ve ileri kinematik denklemleri ile bulunabilmektedir. Cihazın mekatronik tasarımı, kullanıcı arayüzü, kalibrasyon, ölçüm ve filtreleme ile ilgili detaylar da bu bildiriye anlatılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kordinat ölçme makinası, taşınabilir, ileri kinematik, mekatronik

DEVELOPMENT OF A PORTABLE AND ECONOMICAL COORDINATE MEASURING MACHINE

ABSTRACT

In this study, the development of a portable coordinate measuring machine (PCMM) is described for the Vehicle Crash Safety Laboratory of Hacettepe University Mechanical Engineering Department. This PCMM is based on a 5 degree-of-freedom Puma robot. The aim of this machine is to record the anatomical landmarks of humans sitting on vehicle seats. Hence, this machine can calculate the values of the geometrical parameters required to design human-body and seat models in an economical and practical way. The speciality of this machine is that it costs only 250 USD while having the required accuracy and precision. This machine is basically a robot arm and the coordinates of its probe are calculated using forward kinematics formulation and by measuring the angles at the joints using potentiometers. In this paper, the mechatronics design of the machine including the user interface, calibration, measurement and filtering are also described in detail.

Keywords: Coordinate measuring machine, portable, forward kinematics, mechatronics

1. GİRİŞ

Koordinat ölçme makinaları (CMM'ler), tersine mühendislik, üretilen parçaların uygunluk kontrolü ve deformasyon ölçümü gibi yüksek hassasiyetli ölçüm uygulamalarında kullanılan önemli metroloji araçlarıdır. Geleneksel ortogonal CMM'ler basit yapıları ve yüksek doğruluklarıyla öne çıkmaktadır. CMM, bir parçanın yüzeyindeki

noktalara hassas bir prob aracılığıyla temas ederek bu noktaların 3 boyutlu koordinatlarını ölçen bir cihazdır. Üretimde kalite kontrol amacıyla kullanılan bu cihazlar, otomotiv, havacılık ve elektronik gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Klasik CMM'ler genellikle köprü tipi olup üç eksenle hareket edebilen bir gövde, bir prob sistemi ve veri toplama yazılımından oluşur. CMM'lerin

köprü tipi, gantry tipi, konsol tipi ve yatay kollu gibi farklı türleri vardır. Problar ise temaslı, temassız ve çok sensörlü olarak ayrılmaktadır. Seçim, ölçülecek parçanın boyutuna ve karmaşıklığına göre yapılır.

Endüstrideki karmaşık parçalar, büyük boyutlar ve yerinde denetim ihtiyaçları, taşınabilir CMM'lerin gelişimini tetiklemiştir. Taşınabilir CMM'ler, PCMM olarak adlandırılırlar. Geleneksel büyük CMM'ler, maliyetli ve taşınması zor olduğundan, PCMM'ler daha pratik bir çözüm sunar. PCMM'ler, büyük parçaları yerinde ölçülebilir, karmaşık yüzeyleri algılayabilir ve klasik CMM'lerle kıyaslanabilir doğruluklar sağlayabilir. Bu nedenle günümüzde en yaygın kullanılan CMM türlerinden biri haline gelmiştir.

Hacettepe Üniversitesi Araç Çarpışma Güvenliği Laboratuvarı'nda, yolcu vücut parçalarının koordinatları ve uzunlukları ölçülmek zorundadır. Bu işlem mevcut durumda pratik bir cihaz eksikliği nedeniyle yavaş ve verimsiz yürütülmektedir. Araştırmaların süresi uzamakta, verimlilik düşmektedir. Bu nedenle hızlı, kolay ölçüm yapabilen, ölçüm ihtiyaçlarını karşılamak üzere, geniş çalışma alanına ve yeterli ölçüm hassasiyetine sahip taşınabilir bir CMM geliştirme ihtiyacı doğmuştur.

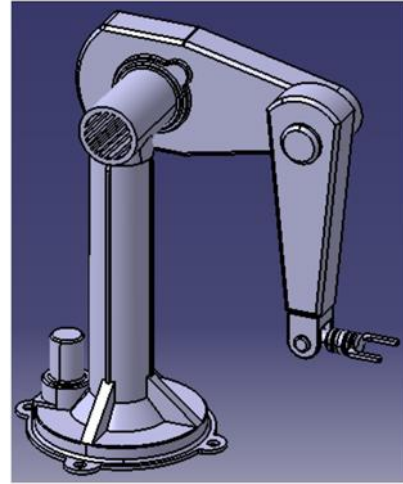
Bu çalışmadaki taşınabilir CMM, Puma robotu [1] temel alınarak tasarlanmıştır. Hacettepe Üniversitesi Makina Mühendisliği Lisans Tasarım Projesi (Bitirme Projesi) dersi kapsamında üretilen bu cihazın ekonomik olması hedeflenmiştir. Bu projede karşılaşılan başlıca zorluklar arasında, kartezyen olmayan çok serbestlik dereceli yapının daha karmaşık matematiksel modellemeye neden olması ve ölçüm hatalarına açık olması yer almaktadır. Ayrıca, yüksek hassasiyet gerekliliği, prob seçimi ve kalibrasyonu, sistem stabilitesi ve uygun enkoder veya potansiyometre seçimi gibi mühendislik sorunları da çözülmesi gereken önemli konular arasındadır.

Başarılı bir sistemin, sabit parçaların koordinatlarını doğru şekilde ölçülebilmesi, çalışma alanında makina uzuvlarının çakışmalarını önlemesi, taşınabilir ve hafif yapıda olup devrilmeye karşı sağlam olması, düşük maliyetle üretilebilmesi ve ölçüm

sonuçlarını güvenilir biçimde kaydedebilmesi gerekmektedir. Bu hedeflere ulaşıldığında proje başarıyla tamamlanmış olacaktır.

2. PCMM KİNEMATİĞİ

Bu çalışmada sunulan taşınabilir koordinat ölçme makinası (PCMM) Puma robotu temel alınarak tasarlanmıştır [1,2]. Puma robotu, 6 serbestlik dereceli, 6 tane hareketli uzvu ve 6 döner eklemlili motora sahip seri yapıda bir robottur. Şekil 1'de gösterilen Puma robotunun en uçtaki 6. uzvu robotun eli veya işlem aygıtıdır. Puma robotunun son iki uzvu olan 5. ve 6. uzuvlar arasındaki motor iptal edilerek 5. ve 6. uzuvlar tek bir parçaya dönüştürülmüştür. Böylelikle 5 serbestlik dereceli bir Puma robotu elde edilmiş ve bu projedeki PCMM yapısı oluşturulmuştur. 5 serbestlik dereceli PCMM'in son uzvuna prob takılmıştır. Probu kendi ekseni etrafındaki dönüşü koordinat ölçümlerini etkilemeyeceği için Puma robotunun en sonda bulunan motoru bu yüzden iptal edilmiştir. PCMM'in probu koordinatları ölçülmek istenen noktaya getirildiğinde eklemlerdeki enkoder veya potansiyometrelerin açı ölçümleri kullanılır ve ileri kinematik denklemleri kullanılarak koordinatlar bulunur.



Şekil 1. Puma robotu katı modeli [2]

2.1. Notasyon

Bu bölümde bildiride kullanılan notasyon [3] ve üstel dönme matrislerin kullanımı için gereken temel matematiksel ilişkiler verilmiştir. Çoklu cisim sistemlerinde her uzva bir eksen takımı atanır; bu çalışmada i numaralı uzva atanan eksen takımı \mathcal{F}_i olarak belirtilmiştir. \mathcal{F}_i eksen takımının x , y ve z

eksenleri doğrultusundaki temel birim vektörleri ise sırasıyla $\vec{u}_1^{(i)}$, $\vec{u}_2^{(i)}$ ve $\vec{u}_3^{(i)}$ olarak tanımlıdır. Bir \vec{r} vektörü \mathcal{F}_i eksen takımında Denklem 1'de gösterildiği şekilde çözüştürülür. Bir \vec{r} vektörünün \mathcal{F}_i eksen takımındaki bileşenleri dikeysıra matrisi şeklinde Denklem 2'deki gibi gösterilir. t sembolü, matris transpoz işlemini ifade etmektedir. \mathcal{F}_i eksen takımının k numaralı temel birim vektörünün \mathcal{F}_i eksen takımında dikeysıra matrisi şeklinde gösterimi Denklem 3'de verilmiştir; bu işlem sonucunda elde edilen temel dikeysıra matrisleri Denklem 4'de gösterilmiştir.

$$\vec{r} = r_1 \vec{u}_1^{(i)} + r_2 \vec{u}_2^{(i)} + r_3 \vec{u}_3^{(i)} \quad (1)$$

$$\vec{r}^{(i)} = [r_1 \quad r_2 \quad r_3]^t \quad (2)$$

$$\vec{u}_k^{(i/i)} = \vec{u}_k \quad (3)$$

$$\vec{u}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \vec{u}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \vec{u}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Bir \vec{p} vektörü, \vec{n} birim vektörü etrafında θ açısı kadar döndürüldüğünde \vec{r} vektörü elde edilir. Bu işlem sonucunda \vec{p} ve \vec{r} vektörleri arasındaki ilişki Denklem 5'deki Rodrigues formülü ile ifade edilir [3]. Denklem 5'deki vektörlerin hepsi seçilen herhangi bir \mathcal{F} eksen takımında ifade edildiğinde Denklem 6'daki matris denklemini elde edilir. Denklem 6 düzenlendiğinde, \vec{p} vektörünü \vec{r} vektörüne dönüştüren dönme matrisi \hat{R} , Denklem 7'deki gibi elde edilir. \hat{I} üçe üç birim matrisini ifade etmektedir. \hat{R} matrisi, üstel dönme matrisi şeklinde de ifade edilebilir (bkz. Denklem 8) [3,4]. Denklem 8'deki \sim tilde isimli simge, \vec{n} vektöründen türetilmiş \tilde{n} matrisini ifade etmektedir; \tilde{n} matrisi \vec{n} vektörünün \mathcal{F} eksen takımındaki bileşenlerinden oluşturulmuş çapraz çarpım matrisi olarak adlandırılır (bkz. Denklem 9). Bu bildiride denklemlerde sinüs fonksiyonu s harfi ile, kosinüs fonksiyonu ise c harfi ile gösterilmiştir.

$$\vec{r} = \vec{p}c\theta + (\vec{n} \times \vec{p})s\theta + (\vec{p} \cdot \vec{n})\vec{n}(1 - c\theta) \quad (5)$$

$$\vec{r} = \hat{R}\vec{p} \quad (6)$$

$$\hat{R} = \hat{I}c\theta + \tilde{n}s\theta + \vec{n}\vec{n}^t(1 - c\theta) \quad (7)$$

$$\hat{R} = e^{\tilde{n}\theta} = \hat{I} + \tilde{n}s\theta + \tilde{n}^2(1 - c\theta) \quad (8)$$

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix}, \quad \tilde{n} = \begin{bmatrix} 0 & -n_3 & n_2 \\ n_3 & 0 & -n_1 \\ -n_2 & n_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

\mathcal{F}_a eksen takımı \mathcal{F}_b eksen takımına döndürüldüğünde aslında \mathcal{F}_a 'nın temel birim vektörleri \mathcal{F}_b 'nin temel birim vektörlerine dönmüş olur. Herhangi bir \vec{s} vektörünün \mathcal{F}_a ve \mathcal{F}_b eksen takımlarındaki bileşenleri arasındaki ilişki $\hat{C}^{(a,b)}$ matrisi ile sağlanır (Denklem 10). $\hat{C}^{(a,b)}$, dönüşüm matrisi olarak adlandırılır. $\hat{C}^{(a,b)}$ matrisinin, \mathcal{F}_a eksen takımının \mathcal{F}_b eksen takımına dönüşünü ifade eden \hat{R}_{ab} matrisi ile eşdeğer olduğu gösterilebilir [3,4]. Denklem 11'de \mathcal{F}_b eksen takımının k numaralı temel birim vektörünün \mathcal{F}_a eksen takımında ifade edilmesi gösterilmiştir. Denklem 12'de ise \mathcal{F}_a eksen takımının k numaralı temel birim vektörünün \mathcal{F}_b eksen takımının k numaralı temel birim vektörüne dönüşü gösterilmiştir ve bu matris denklemini \mathcal{F}_a eksen takımında ifade edilmiştir. Böylelikle dönüşüm ve dönme matrisleri arasındaki ilişki ortaya konulmuştur. \hat{R}_{ab} dönme matrisi ister \mathcal{F}_a , ister \mathcal{F}_b eksen takımında ifade edilsin, gene $\hat{C}^{(a,b)}$, dönüşüm matrisine eşittir [10] (bkz. Denklem 13). Herhangi bir \mathcal{F}_a eksen takımının kendi k numaralı temel birim vektörü etrafında θ kadar döndürülmesi ile elde edilen dönme matrisi gene \mathcal{F}_a 'da ifade edilirse çok bilinen temel üstel dönme matrisleri $e^{\tilde{u}_1\theta}$, $e^{\tilde{u}_2\theta}$, $e^{\tilde{u}_3\theta}$ elde edilir (bkz. Denklem 14-16).

$$\vec{s}^{(a)} = \hat{C}^{(a,b)}\vec{s}^{(b)} \quad (10)$$

$$\vec{u}_k^{(b/a)} = \hat{C}^{(a,b)}\vec{u}_k^{(b/b)} = \hat{C}^{(a,b)}\vec{u}_k \quad (11)$$

$$\vec{u}_k^{(b/a)} = \hat{C}^{(a,b)}\vec{u}_k = \hat{C}^{(a,b)}\vec{u}_k^{(a/a)} \quad (12)$$

$$\hat{C}^{(a,b)} = \hat{R}_{ab}^{(a)} = \hat{R}_{ab}^{(b)} \quad (13)$$

$$e^{\tilde{u}_1\theta} = e^{\tilde{u}_1^{(a/a)}\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta & -s\theta \\ 0 & s\theta & c\theta \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$e^{\tilde{u}_2\theta} = e^{\tilde{u}_2^{(a/a)}\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$e^{\tilde{u}_3\theta} = e^{\tilde{u}_3^{(a/a)}\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Dönüşüm ve dönme matrisleri ortonormal matrislerdir, yani tersi transpozuna eşittir; bu özellik Denklem 17'de gösterilmiştir. Denklem 18 ve 19'da ise temel üstel dönme matrisleri ile ilgili çok kullanılan matematiksel ilişkiler verilmiştir.

$$(e^{\tilde{n}\theta})^{-1} = (e^{\tilde{n}\theta})^t = e^{-\tilde{n}\theta} \quad (17)$$

$$e^{\tilde{u}_i\theta}\tilde{u}_j = \tilde{u}_j c\theta + (\tilde{u}_i\tilde{u}_j)s\theta, \quad i \neq j \quad (18)$$

$$e^{\tilde{u}_i\theta}\tilde{u}_i = \tilde{u}_i \quad (19)$$

2.2. İleri Kinematik

5 serbestlik dereceli PCMM'in kinematik denklemlerini yazabilmek için Denavit - Hartenberg (D-H) [3] tablosu oluşturulmuştur. Tablo 1'de verilen D-H parameterlerinde eşdeğer uzunluk (EU), bükülme (twist) açısı (BA), ofset uzunluğu (OU) ve eklem açısı (EA) verilmiştir. Şekil 2'de PCMM'in tanımlanmasında kullanılan O, S, E, R ve P noktaları ile uzuvların numaraları gösterilmiştir. O noktası yere (0) bağlanan eksen takımının ve (1) numaralı uzvun eksen takımının ortak merkezidir. S, omuz noktasını; |SE|, üst kolun (2) uzunluğunu; |OS|, omuz ofsetini; |ER|, ön kolun (3) uzunluğunu; R, bilek noktasını; |RP| = d_6 , probun uç noktası P ile bilek noktası arasındaki uzunluğu ifade eder. Uzuvlar arasındaki dönme matrisleri Denklem 20-23'de verilmiştir.

Tablo 1. PCMM'in D-H tablosu

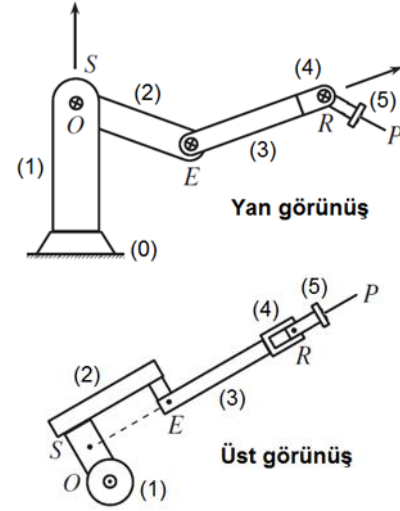
EU	BA	OU	EA
$a_1 = 0$	$\alpha_1 = -90^\circ$	$d_1 = 0$	θ_1
SE = a_2	$\alpha_2 = 0$	OS = d_2	θ_2
$a_3 = 0$	$\alpha_3 = 90^\circ$	$d_3 = 0$	θ_3
$a_4 = 0$	$\alpha_4 = -90^\circ$	ER = d_4	θ_4
$a_5 = 0$	$\alpha_5 = 90^\circ$	$d_5 = 0$	θ_5

$$\hat{C}^{(0,1)} = e^{\tilde{u}_3\theta_1}e^{-\tilde{u}_1\pi/2}, \quad \hat{C}^{(1,2)} = e^{\tilde{u}_3\theta_2} \quad (20)$$

$$\hat{C}^{(2,3)} = e^{\tilde{u}_3\theta_3}e^{\tilde{u}_1\pi/2} \quad (21)$$

$$\hat{C}^{(3,4)} = e^{\tilde{u}_3\theta_4}e^{-\tilde{u}_1\pi/2} \quad (22)$$

$$\hat{C}^{(4,5)} = e^{\tilde{u}_3\theta_5}e^{\tilde{u}_1\pi/2} \quad (23)$$



Şekil 2. PCMM şematik çizimi ([3]'den türetilmiştir)

Probu ucunun (P) yerdeki eksen takımının merkezi O'ya göre konumu \vec{p} vektörü, bilek noktasının O'ya göre konumu ise \vec{r} vektörü ile gösterilmiştir. Denklem 24-29'da, probun P noktasının yerdeki eksen takımına göre koordinatlarının ($\vec{p}^{(0)}$) elde edilmesi gösterilmiştir.

$$\vec{p} = \vec{r} + \overline{RP} \quad (24)$$

$$\vec{r} = \overline{OS} + \overline{SE} + \overline{ER} \quad (25)$$

$$\vec{p}^{(0)} = \vec{r}^{(0)} + d_6 \hat{C}^{(0,5)} \tilde{u}_3 = \vec{r}^{(0)} + \vec{d}^{(0)} \quad (26)$$

$$\vec{r}^{(0)} = d_2 \hat{C}^{(0,1)} \tilde{u}_3 + a_2 \hat{C}^{(0,2)} \tilde{u}_1 + d_4 \hat{C}^{(0,3)} \tilde{u}_3 \quad (27)$$

$$\vec{d}^{(0)} = d_6 \hat{C}^{(0,5)} \tilde{u}_3 \quad (28)$$

$$\hat{C}^{(0,5)} = \hat{C}^{(0,1)} \hat{C}^{(1,2)} \hat{C}^{(2,3)} \hat{C}^{(3,4)} \hat{C}^{(4,5)} \quad (29)$$

3. PCMM BİLEŞENLERİ VE ÜRETİM

Üretim aşamasında öncelikle tüm parçaların malzeme seçimleri yapılmış, gerekli parçalar tedarik edilmiştir. Üretimde sac şekillendirme ve CNC talaşlı imalat metotları kullanılmıştır. İşçilik ihtiyaçları, entegrasyon süreci ve atölye düzenlemeleri Hacettepe Üniversitesi İmalat Atölyeleri ve CTG Makine'de yürütülecek şekilde planlanmıştır.

Ürünün üst kısımlarının hafif olması, alt parçalar üzerindeki gerilmeyi azaltmanın yanı sıra bağlantı kolları açıldığında devrilmenin önlenmesi açısından da önemlidir. Bu nedenle

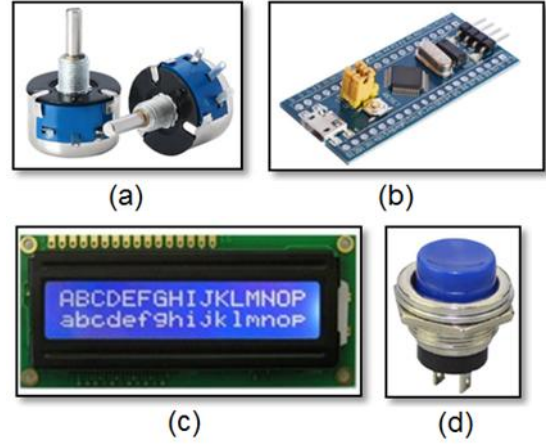
bağlantı elemanlarında Alu S6 alüminyum borular, taban parçalarında ise Alu C6 alüminyum plakalar tercih edilmiştir. Sistemin yükünü taşıyan tabanın altındaki konik parça ise yüksek mukavemetinden dolayı ST37 çeliğinden üretilmiştir. Üretilen parçalar Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Üretilen parçalar

Tasarlanan taşınabilir koordinat ölçme makinasının (PCMM) amacı yalnızca çalışma alanındaki parçaların koordinatlarını ölçmek olduğundan, cihazın prob kısmı herhangi bir yüke maruz kalmadan çalışmaktadır. Bu sebeple probda yüksek mukavemetli ve ağır malzemelerin kullanılmasına gerek duyulmamış; düşük maliyetli, hafif ve şekillendirmesi kolay olan PLA+ filament kullanılarak 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiştir.

Projede kullanılan rulmanlar ve elektronik bileşenlerin yanı sıra alüminyum ve çelik hammaddeleri Ankara'daki sanayi bölgeleri tedarikçilerinden sağlanmıştır. Kullanılan elektronik bileşenler arasında WX14-20 470 ohm potansiyometre, döner açı sensörlerinden gelen sinyalleri işlemek üzere kullanılan STM32 mikrodenetleyici, yataklı rulmanlar olarak UCP 205, UCF 205, KFL000 serisi ve 51106 eksenel rulman yer almaktadır. Bu elektronik parçalar ve rulmanlar Şekil 4-5'de sırasıyla görülebilir.



Şekil 4. (a) WX14-20 Potansiyometre , (b) STM32, (c) LCD Ekran, (d) Menü kontrol pin butonu

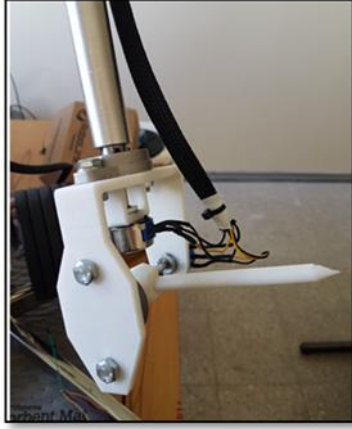


Şekil 5. Rulman (a) UCP 205 – (b) KFL000 – (c) 51106 – (d) UCF 205

Parçaların üretimi CTG Makina tarafından gerçekleştirilmiş olup, üretim sonrası parçaların montajı, üretimden kaynaklanan hataların giderilmesi ve gerekli görülen yeni parçaların üretimi için Hacettepe Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Atölyesi kullanılmıştır. Montaj ve parça işleme işlemleri, bölüm tarafından görevlendirilen bir teknisyen ve proje grubu üyelerinin katılımıyla tamamlanmıştır. Estetik görünüm, düşük maliyet ve ağırlık avantajlarından dolayı projenin sonraki aşamalarında eklemeli üretim yöntemlerine başvurulmuştur. 3 boyutlu yazıcı olarak kullanılan Ender 3 V2 cihazı için belirlenen tolerans değeri 0.274 mm'dir ve maksimum baskı uzunluğu 170 mm'dir.

Kullanılan PLA+ malzemenin üretici tarafından bildirilen çekme dayanımı yaklaşık 67 MPa'dır. 3 boyutlu baskı ile üretilen parçaların temel amacı mukavemet yerine hafifliği artırmak olduğundan, yüksek

dayanıklılık gerektirmeyen alanlarda daha düşük doluluk oranı ve kalın katman ayarları tercih edilmiştir. Parça detayına göre kullanılan katman kalınlığı 0.12 mm ile 0.28 mm arasında ayarlanmıştır. Detay içermeyen bağlantı parçalarında %80 doluluk oranı ve 0.24 mm katman yüksekliği kullanılırken, vida, delik ve sivri uçlar gibi detaylı alanları bulunan parçalar için daha ince katman ayarları seçilmiştir. Vida bağlantılarında ortaya çıkabilecek uyumsuzlukları gidermek için tasarım aşamasında yüzey ofsetleri ve kenar yarıçapları kullanılmıştır. Bu uygulama kapsamında, yazıcının toleransına bağlı olarak her iki tarafta 0.137 mm'lik bir ofset uygulanmıştır. Eklemeli imalat ile üretilen prob Şekil 6'da görülebilir.



Şekil 6. Eklemeli imalat ile üretilen prob

Montaj süreci, üretim planlamasında olduğu gibi detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak tüm parçaların ve rulmanların montaj işlemleri yapılmıştır. Daha sonra prob bileşenleri birleştirilmiş ve cihaz üzerindeki yerlerine sabitlenmiştir. Son aşamada ise elektronik bileşenlerin yerleşimi tamamlanmış, fiziksel sınırlar ve hareket limitleri belirlenmiştir. Prototip üretildikten sonra sistem, test edilerek iyileştirilmiş ve tekrar test edilerek son tasarım haline getirilmiştir. Bu iteratif süreç optimum bir tasarım elde edilene kadar devam ettirilmiştir. Kullanıma hazır haldeki prototip Şekil 7'de gösterilmiştir. Ürünün son hale gelene kadar ki tüm maliyet analizi Tablo 2'de listelenmiştir.



Şekil 7. PCMM prototipi

Tablo 2. Kalem bazlı ve toplam maliyet

Parça	Fiyat [USD]
Bağlayıcılar	4
Çelik Hammaddeler	11
Rulmanlar	16
Üretim Masrafları	38
Süspansiyon Ağırlıkları	40
Alüminyum Hammaddeler	61
Elektronik Parçalar	80
Toplam	250

4. ELEKTRONİK PARÇALAR VE YAZILIM

Elektronik parçalar 1 adet STM32F103 mikrodenetleyici, 2 adet 16 karakter LCD kullanıcı arayüzü, 2 adet anahtar buton (ölçüm ve veri okuma modu için ekran geçişleri) ve 5 adet potansiyometre (WX14-20 470 ohm)'den oluşmaktadır.

4.1. Kalibrasyon Prosedürü

Potansiyometreler, PCMM entegrasyonu öncesinde kendi içlerinde gerçekleştirilen bir kalibrasyon prosedürüne tabi tutulmuştur. Bu aşamada, her bir potansiyometrenin voltaj-açı karakteristiğindeki doğrusal olmayan davranışları düzeltmek amacıyla bir ölçek (kazanç) çarpanı ve bir ofset (kaydırma) değeri hesaplanarak gömülü test yazılımına

kaydedilmiştir. Böylece, potansiyometrelerin doğal yapılarından kaynaklanan, yapının eklemelerine göre optimize edilmiş olan sıfır/limit noktaları arasındaki eğrilik ve çalışacakları eklem serbestlik limit noktalarındaki sapmalar minimize edilmiştir.

Benzer bir kalibrasyon prosedürü, entegrasyon sonrasında da teorik D-H parametreleri ile potansiyometreden okunan verileri örtüştürmek ve hassas ayar yapmak için kullanılmıştır. Bunun için doğrudan PCMM yapısının fonksiyonelliği test edilmiş, master olarak işletilen ve ölçü/toleransları bilinen bir yapı üzerinde, mekanizma çalışma alanını kapsayacak şekilde konum değiştirilerek mesafe ölçümleri alınmıştır. Sıralı ölçümler arasında örneklem hata oranı %0.5'in altına inene kadar kalibrasyon süreçleri devam etmiştir. Hata oranı hesaplamaları için benzer bir seri kinematik yapıya sahip, üzerinde D-H parametre kalibrasyonu yapılan ve doğrulanan diğer bir çalışma referans alınmıştır [5].

4.2. Ölçüm ve Filtreleme

Ölçülen verileri gürültülerden arındırmak ve kullanıcıya bağlı ölçüm hata oranını düşürmek amacıyla ürün üzerinde çalışacak olan gömülü yazılıma Hampel filtresi [6] ve hareketli ortalama filtresi entegre edilmiştir. Merkez formunda kullanılan hareketli ortalama metodu, basit bir doğrusal filtredir ve birçok kaynaktan bulunabilecek standart bir uygulamadır. Amaç yüksek frekanslı rastgele gürültüyü yumuşatarak sinyalin genel eğilimini korumaktır. Hampel filtresi ise, her nokta için bir örneklem penceresi içerisinde ortanca değer elde etmek ve ortanca mutlak değerleri kullanarak sapmış olan uç değerleri tespit edip ortanca değere indirgemek için kullanılmıştır. Hampel filtresinin hareketli ortalama filtresi önüne yerleştirilmesi ile beraber ölçüm hassasiyetinin artırılması hedeflenmiştir. Burada hem operatör ve yapıdan kaynaklı titreşimler hem de elektrik ve potansiyometre hareketinden kaynaklanan gürültü bastırılmaya çalışılmıştır.

İlgili filtreleme metodları, ana döngü algoritmasını hafifletmek, ölçüm durumu haricinde çalışırken gecikmeleri azaltıp dinamik durumda eklem pozisyonlarını gecikmesiz kullanıcıya iletebilmek amacıyla farklı döngüler içerisinde farklı filtre

parametreleri ile kullanılmıştır. Hampel filtresi yalnızca doğrudan ölçüm butonuna basıldığında devreye girecek ve hareketli ortalama filtresi öncesinde ani sapmaları kesecek şekilde, hareketli ortalama metodu ise ölçüm esnasında örneklem sayısını arttıracak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede donanım çeşitliliğinden kaynaklanacak olan maliyetler minimize edilmiş, çözümler yazılım odaklı olacak şekilde ilerletilmiş, kullanıcı deneyimini kötü etkilemeden ölçüm güvenilirliğinin artırılması hedeflenmiştir. PCMM'in yazılımının çalışma prensibi Ek. A'da verilen akış şemasında özetlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Geliştirilen taşınabilir koordinat ölçme makinasının (PCMM) nihai hali 5 serbestlik derecesine sahiptir ve teorik olarak 2 mm hassasiyete kadar ölçüm yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Cihazın matematiksel optimizasyonlar yapılmadan elde edilen pratik ölçüm hatası maksimum %1.5 olarak belirlenmiştir. Tasarımın teorik olarak öngörülen hassasiyet seviyesine ulaştığı görülmüştür.

Buna ek olarak cihaz 272 cm çapında yarı küresel bir ölçüm hacmini kapsamaktadır. Kompakt yapısı ve 12 kg'lık ağırlığı sayesinde kullanıcılar, düzgün dengelenmiş karşı ağırlık sistemi (bkz. Şekil 8 - siyah diskler) ile prob ucunu rahatlıkla hareket ettirebilmektedir. Ayrıca taşıma kolaylığı sağlamak amacıyla karşı ağırlıklar sökülebilir şekilde tasarlanmıştır. Bu özellikleriyle cihaz, proje kapsamında belirlenen tasarım gerekliliklerini karşılamaktadır.

Hacim açısından bazı ticari sistemlere kıyasla avantaj sağlarken, ölçüm hassasiyeti açısından çoğu profesyonel cihaza göre daha düşük bir performans göstermektedir. Ancak tüm sistemin yalnızca 250 USD maliyetle üretilebilmiş olması, fiyat-performans açısından oldukça güçlü bir konum sağlamaktadır.

Bu bağlamda, sistemin ölçüm hassasiyeti ve kapsadığı hacim, kullanıcı ihtiyaçlarına bağlı olarak yeterli görülebilir. Özellikle yüksek hassasiyet gerektirmeyen, temel düzeyde üç boyutlu konum tespiti ihtiyaçları için cihaz son derece uygun maliyetli bir çözüm sunmaktadır.

Bu nedenle bütçe kısıtlamaları olan üniversite laboratuvarlarında, eğitim amaçlı uygulamalarda veya küçük ölçekli girişim firmalarında pratik ve ekonomik bir ölçüm aracı olarak rahatlıkla tercih edilebilir. Tasarlanan ölçüm cihazının (PCMM) asıl amacı bir araç koltuğuna oturan insanlar üzerinde anatomik noktaların koordinatlarını bulmaktır ve böylelikle koltuk, insan modeli tasarımlarında ihtiyaç duyulan geometrik parametreler pratik bir şekilde hesaplanabilmektedir. Bu tür ölçümleri alırken insanın nefes alıp vermesi bile koordinatlarda 2-3 mm'lik oynamaya neden olabilmektedir. Bu haliyle tasarlanan PCMM amaca uygundur.



Şekil 8. PCMM prototipi - dengeleme ağırlıkları

Gelecekteki çalışmalarda, ölçüm hassasiyetini daha da artırmak amacıyla alçak geçiren ve yüksek geçiren donanımsal filtrelerin eklenmesi planlanmaktadır. Ayrıca, donanımda olası değişiklikler yapılması

halinde cihazın hassasiyetinin korunması için doğru kalibrasyon süreçleri ve ek bir veri depolama sisteminin geliştirilmesi de önem arz etmektedir. Mevcut mekanik yapıya entegre edilebilecek bir lazer tarama modülü ile cihazın yalnızca noktasal koordinat ölçümünün ötesine geçerek yüzey tarama kabiliyeti kazanması hedeflenmektedir. Bu sayede cihazın uygulama alanı genişletilebilir ve daha karmaşık geometriler üzerinde veri toplanabilir hale gelebilir.

6. KAYNAKLAR

[1] Fu, K.S., Gonzalez, R.C., Lee, C.S.G. (1987). *Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence*, McGraw-Hill International Edition, Singapur.

[2] Yaran, U. (2024). *Kinematics and Solid Modelling of Robotic Systems*, MMÜ499 Lisans Araştırma Projesi Raporu, Hacettepe Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara.

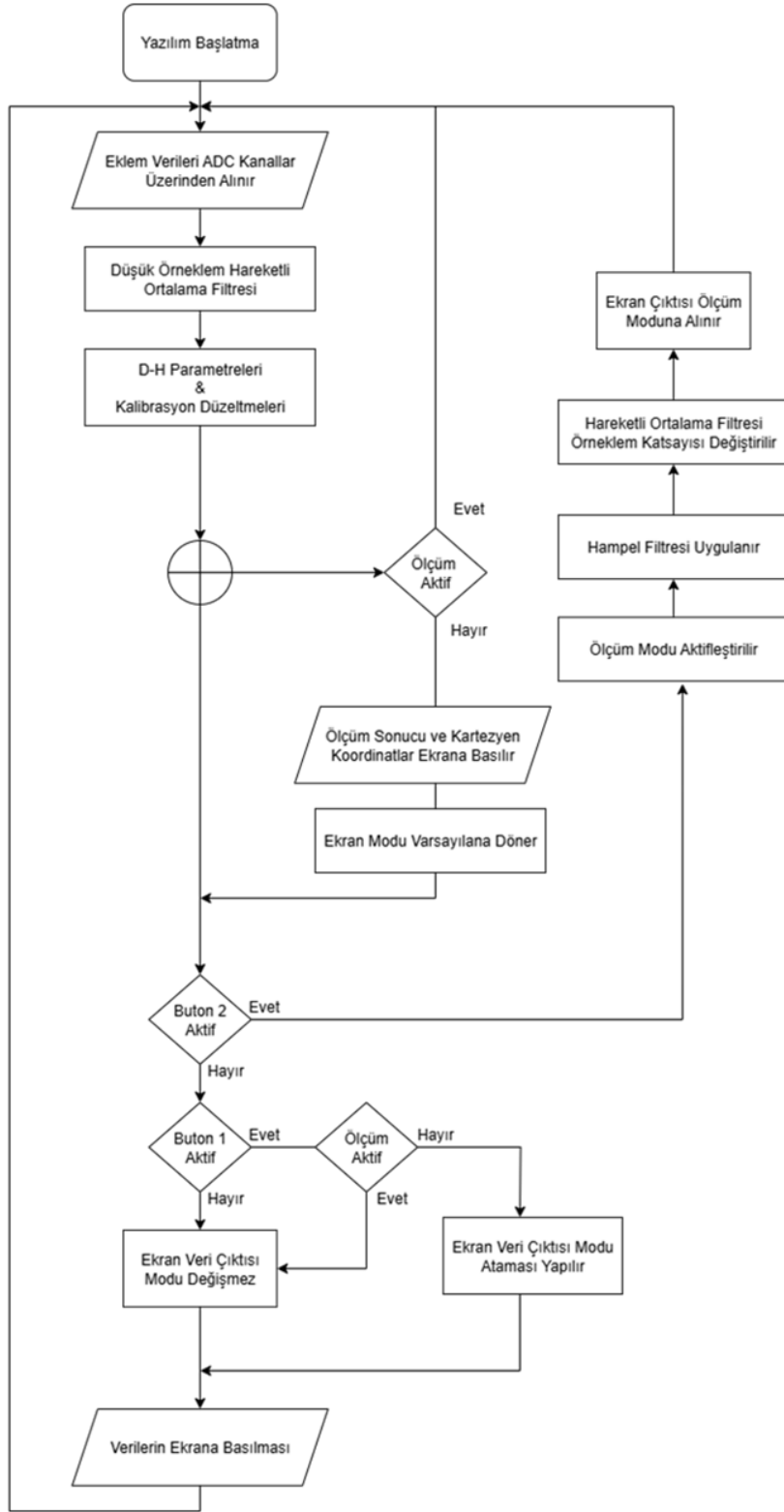
[3] Ozgoren, M.K. (2020). *Kinematics of General Spatial Mechanical Systems*, John Wiley & Sons Ltd, Croydon, İngiltere.

[4] Ozgoren, M.K. (2015). *Seri ve Paralel Manipulatörlerin Analitik ve Yarı-Analitik Yöntemlerle Konum ve Hız Analizleri*, Makina Teorisi Derneği Yayınları Ders Notları Serisi No:1, Gaziantep.

[5] Williams, R.L. (1991). *Kinematics of the Six-degree-of-freedom Force-reflecting Kraft Master*, Teknik Rapor, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, Amerika Birleşik Devletleri.

[6] Hampel, F.R. (1974). The Influence Curve and its Role in Robust Estimation. *Journal of the American Statistical Association*, 69, 383-393.

EK A.



Şekil A1. PCMM yazılımı akış şeması