

Haptik cihaz için iyileştirilmiş performansa sahip robot tasarımı

İbrahimcan Görgülü, Mehmet Görkem Karabulut, Veysel Sekendiz, Gökhan Kiper, Mehmet İsmet Can Dede
Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
İzmir, Türkiye
{ibrahimcangorgulu, mehmetkarabulut, mehmetsekendiz, gokhankiper, candede} @iyte.edu.tr

Öz — Bu bildiri daha önce tasarlanmış bir kinestetik haptik cihazın tasarımının iyileştirilmesi için yapılan çalışmayı içermektedir. Bahsi geçen iyileştirme cihazın empedans aralığının genişletilmesine yöneliktir. Bu başarımlı iyileştirme için yapılan mekanizma eniyileme, pasif dengeleme, konstrüksiyonel tasarımda iyileştirme ve eyleyici sistem tasarımı çalışmaları yürütülmüş ve bu bildiride sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler— Haptik cihaz, paralel mekanizma, empedans aralığı, saydamlık, mekanizma direngenliği

I. GİRİŞ

Bir teleoperasyon sistemi kullanıcı tarafında bulunan ana sistem, görev sahasında bulunan bağımlı sistem ve bu iki sistem arasında bilgileri ileten bir iletişim altyapısından oluşmaktadır. Genellikle ana sistem görev sahasından uzaktadır ve kullanıcı görevi ana sistemi kullanmak suretiyle bağımlı sistemi kontrol etmek için gönderdiği komutlarla tamamlar. Bu komutlar çoğunlukla hareket istekleridir ve ana sistem bu bahsi geçen istekleri kullanıcı üzerinden toplamakla yükümlüdür. Görevin gereksinimlerine göre, bu hareket istekleri kullanıcının bazen el bazen ayak bazen de göz gibi uzuvlarının hareketleri algılanarak toplanır.

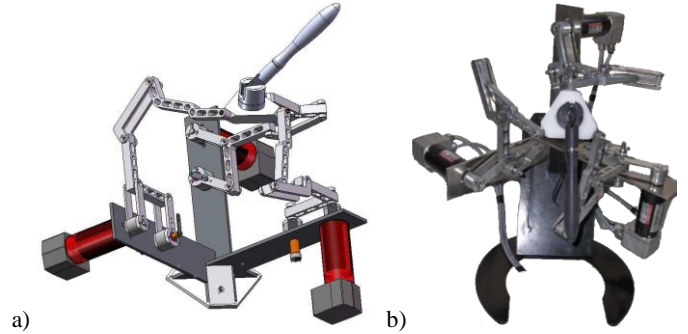
Bir teleoperasyon senaryosunda eğer bağımlı sistemin görev sahasında ortamdaki fiziksel objeler ile yaptığı fiziksel etkileşim bilgileri kullanıcıya iletilmesi gerekiyorsa, bu durumda ana sistem söz konusu bilgileri iletişim altyapısı sayesinde elde edip kullanıcıya iletmek ile yükümlüdür. Hem kullanıcının ilgili uzuvlarının hareketlerini algılayıp toplayan hem de kullanıcıya görev sahasında meydana gelen fiziksel etkileşim bilgilerini ileten cihazlara kinestetik haptik cihaz adı verilmektedir.

Bu bildiride sunulan çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen “Yeni Alt-Bileşenlerinin Geliştirilmesi ile İyileştirilmiş Performanslı Bir Haptik Sistem Tasarımı (HISS)” adlı projenin bir parçasıdır ve uluslararası konferanslarda yayımlanan üç adet bildirinin bir derlemesidir. HISS projesinde masaüstü kinestetik haptik cihaz teknolojisine katkıda bulunacak şekilde yeni alt-sistemler, mekanizma eniyilemesi ve denetim algoritmaları konularında çalışmalar yapılması hedeflenmiştir. Çalışmada geliştirilen manipülatör hassas operasyon gereken teleoperasyon çalışmalarında kullanılması için geliştirilmektedir. Manipülatör tasarımı için seçilen mekanizma üç serbestlik derecesine sahip hareketli platformu sadece doğrusal hareket eden R-CUBE [1] mekanizmasıdır.

R-CUBE mekanizmasında hareketli platform yere üç adet seri kinematik zincirler bağlanmaktadır. Bu zincirlerin her biri

beş adet dönel mafsaldan oluşmaktadır. Zincirleri yere bağlayan dönel mafsallar mekanizmanın aktif mafsallarıdır ve dönme eksenlerinin hepsi birbirine diktir. Bu eksenler aynı zamanda hareketli platformun tek bir aktif mafsaldan hareket girdisi ile hareket edebileceği eksenleri ifade etmektedir. İlk dönel mafsaldan sonra gelen dönel mafsaldan dönme eksenini ilk mafsaldan ile aynı yöndedir. Orijinal tasarımda bu ilk iki mafsaldan hareketi bir paralelkenar devresi ile oluşturulmuştur. R-CUBE mekanizması kullanılarak geliştirilen HIPHAD v1.0 cihazında [2] bahsi geçen paralelkenar devresi kullanılmıştır. Her bir seri kinematik zincirdeki geriye kalan üç dönel mafsaldan dönme eksenleri birbirine paraleldir ancak ilk iki dönel mafsaldan dönme eksenine diktir.

HIPHAD v1.0 cihazında hareketli platformun üzerine bir pasif bilek mekanizması da eklenerek kullanıcının kontrol ettiği tutamağın hem konum hem de yönelim bilgilerinin elde edilmesi sağlanmıştır. Seri kinematik zincirlerin yere bağlandığı paralelkenar devresinin yer bağı iki mafsaldan birisi eyleyici sisteme diğeri ise algılayıcı sisteme bağlanmıştır. Bunun dışında uzuvlar Alüminyum alaşımdan üretilmiştir ve mafsallar çift rulmanlı yapıya sahiptir. Ayrıca kullanım senaryosuna göre ayakta kullanım veya oturarak kullanım için cihaz Şekil 1’de verildiği gibi farklı yerleşimlerde kullanılabilir.



Şekil 1: HIPHAD v1.0 a) Bilgisayar destekli tasarım programı görünüşü, b) üretilmiş cihaz [3]

Kinestetik haptik cihazların başarımları birkaç metrik ile belirlenebilir. Bu metrikler pasif (unpowered) sistem, aktif (powered) sistem ve denetlenen sistem (control system) özellikleri olarak kategorize edilmiştir [4]. Bununla beraber, toplam haptik sistem tasarımının başarımlı cihazın empedans ve saydamlık karakteristiklerine göre belirlenmektedir. Cihazın empedans karakteristiklerini belirlemek için kullanılan önemli metriklerden biri olan empedans aralığı [5] haptik cihaz

tarafından kullanıcıya iletilebilen minimum ve maksimum empedans değerlerinin aralığıdır. Minimum empedans kullanıcı haptik cihazı geriye sürerken hissettiği serbest harekete karşı uygulanan dirençtir. Bu başarım karakteristiği mafsallardaki sürtünmenin ve hareket eden kütle/ataletin artmasıyla olumsuz şekilde etkilenmektedir. Maksimum empedans kullanıcının hareketine karşı haptik cihaz ile oluşturulabilecek maksimum direncin ölçüsüdür. Bahsi geçen empedans aralığı kıstası temel alınarak HIPHAD v1.0'daki çözülmesi gereken ana sorunlar şu şekildedir:

(1) uzuvlar gereğinden fazla direngen şekilde yüksek kütleli/ataletli olarak üretilmiştir ve bu durum minimum empedans başarımını kötü yönde etkilemektedir.

(2) doğrudan-sürüş (İng: direct-drive) eyleyici sisteminin çıkışına tork yükseltici (hız redüktörü) ekli olmadığı için toplam atalet redüktörlü eyleyici sistemi ile aynı torkun daha küçük bir motorla üretmesine göre daha yüksektir. Bu durumda maksimum çıkış torku değeri arzu edilen minimum empedans değeri ile kısıtlanmaktadır. Dolayısı ile bu durumda maksimum empedans değeri kısıtlanmaktadır.

(3) mafsal yapıları düşük sürtünmeli rulmanlar kullanılarak oluşturulmuştur ve sistemdeki fiziksel sönümü azaltarak sistemin kararlılığını olumsuz şekilde etkilemekte [5] ve bunun sonucu olarak cihazın gösterebileceği maksimum empedans değeri azaltmaktadır.

(4) toplam uzuv sayısı paralelkenarlar kullanılması sebebiyle gereğinden fazladır ve bu durum hareket eden toplam kütle/atalet değerine artırmak suretiyle minimum empedans başarımını olumsuz yönde etkilemektedir.

(5) Uzuv boyları cihazın direngenlik – toplam hareket eden kütle/atalet ilişkisi temel alınarak eniyilenmemiştir ve bu durum hem minimum hem de maksimum empedans değerlerini etkilemektedir.

(6) Mekanizmanın yerçekimi etkisine karşı pasif dengelemesi yapılmamıştır ve bu durum eyleyici sistemlerden alınacak başarımın bir kısmını sınırlandırmakta ve dolayısı ile maksimum empedans değerini olumsuz şekilde etkilemektedir.

HIPHAD v1.0'in empedans karakteristikleri [6]'da daha önce verilmiştir. Bu değerler temel alınarak yeni tasarımın ilk tasarımı elde edilen değerlerin üzerine çıkması ve Tablo 1'de verilen değerlere ulaşması hedeflenmiştir.

Tablo 1: Yeni haptik cihazın tasarım kıstasları

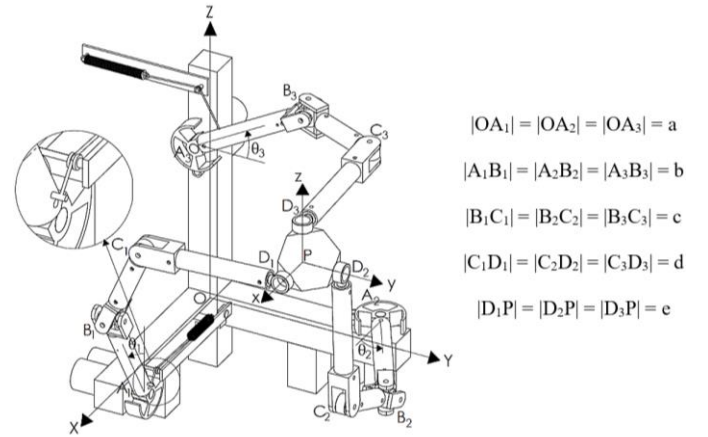
Serbestlik Derecesi (SD)	3+ (mobil platforma eklenecek bilek mekanizması ile 6 SD)
Fiziksel Etkileşim Tipi	Noktasal Temas (x, y, z eksenlerinde kuvvet iletimi)
Sürekli En Yüksek Direnç Kuvveti	> 5 N (x, y, z yönlerinde, çalışma uzayının her yerinde)
Nominal Konumlama Çözünürlüğü	< 0.1 mm (x, y, z yönlerinde, çalışma uzayının her yerinde)
Çalışma Uzayı	>100 mm X 100 mm X 100 mm

Bu bildiriye cihazın empedans aralığını iyileştirmek için mekanik ve eyleyici alt sistemlerinin tasarımı konusunda durulmuştur. Sonraki bölümlerde manipülâtörün mimarisinden bahsedilerek kinematik tasarımı açıklanmış ve eniyileme kıstasları tanıtılmış, yerçekimine karşı pasif dengeleme mekanizması tasarımından bahsedilmiş, konstrüktiyonel tasarımda alınan önlemlerden bahsedilmiş ve yarı-aktif eyleyici tasarımı için yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

II. MANİPÜLATÖR MİMARİSİ VE KİNEMATİK TASARIMI

Şekil 2'de R-CUBE mekanizmasının yeniden tasarlanmış sürümünün bileşenleri ve kinematik parametreleri gösterilmiştir. Paralelkenar devreleri 1. sürümde (Şekil 1) mevcutken, 2. sürümde mevcut değildir. Bu revizyon uzuv boyutlarının güncellenmesini gerektirmiştir. Bu güncellemeler ilerideki kısımlarda açıklanmıştır.

Bu manipülâtör birbirine dik eksenlerde hareketli platforma bağlanmış 3 adet birbirine eş bacaklardan oluşmaktadır. A_i, C_i, D_i mafsalları döner, B_i mafsalı ise universal mafsaldır. Altsimge i mafsalların ait oldukları bacakları göstermektedir, $i = 1, 2, 3$. Şekil 2'de uzuvların uzunluklarını belirten değişkenler verilmiştir. $O(X, Y, Z)$ kaideye sabitlenmiş referans koordinat eksenlerini, $P(x, y, z)$ hareketli platform referans koordinat eksenlerini belirtmektedir. $P(x, y, z)$ ve $O(X, Y, Z)$ referans koordinat eksenleri birbirine paraleldir. Kinematik yapıdan dolayı, x-, y- ve z- eksenleri sırasıyla $B_1C_1D_1, B_2C_2D_2$ ve $B_3C_3D_3$ düzlemlerinin normaleri yönlerindedir ve bu düzlemler hareketli platform ile beraber ilerlemektedir. Bu düzlemlerin $O(X, Y, Z)$ referans koordinat eksenlerine göre konumu A_iB_i uzuvlarıyla belirlenir. Bundan dolayı, 1. bacak ($A_1B_1C_1D_1$) hareketli platformun x- eksenini boyunca hareketinden sorumludur. Benzer şekilde 2. ve 3. bacaklar y- ve z- eksen hareketlerini belirlerler. Çalışma yapısından dolayı, hareketli platform eksen takımının orijini, P, kübik bir çalışma uzayı içinde hareket yeteneğine sahiptir.



Şekil 2: HISS Kinematik Değişkenleri

R-CUBE mekanizmasının düz ve ters kinematik denklemleri oldukça basittir ve katı cisim kinematığı için çok az sayıda uzuv boyutlarının belirlenmesi yeterlidir. Diğer uzuvların boyutları ise katı cisim varsayımıyla belli oranda keyfi alınabilir. A_1B_1, A_2B_2 ve A_3B_3 uzuvları sırasıyla X-, Y- ve Z- eksenlerine dik olduğunda, hareketli platform eksen takımı (P) çalışma uzayının tam ortasında bulunmaktadır. Bu konum manipülâtörün merkez konumudur. Eyleyicilerin açısal konum açısı, θ_i, A_iB_i uzuvlarının merkez konuma göre yaptıkları açı ile ölçülür. P noktasının çalışma uzayının ortasında olması için, $|A_iB_i| = b = a - e$ eşitliği sağlanmalıdır. Bu durumda, düz kinematik denklemleri aşağıda verildiği şekilde elde edilmiştir.

$$P_x = b(1 + \sin\theta_1) \quad (1)$$

$$P_y = b(1 + \sin\theta_2) \quad (2)$$

$$P_z = b(1 + \sin\theta_3) \quad (3)$$

Düz kinematik denklemleri kullanılarak ters kinematik denklemleri ile eyleyicilerin açılmal konumları şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{P_x}{b} - 1 \right) \quad (4)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{P_y}{b} - 1 \right) \quad (5)$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{P_z}{b} - 1 \right). \quad (6)$$

Düz kinematik denklemler temel alınarak, Jakobi matrisi \hat{f} aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\hat{f} = \begin{bmatrix} b \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & b \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & b \cos \theta_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

HISS, haptik bir cihaz olarak kullanılmak üzere tasarlandığı için, R-CUBE mekanizmasının boyutsal sentezi haptik başarıml ölçütlerine kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bir haptik manipülatörün başarımlı, kullanıcıya yansıtılan kuvvet/tork kalitesini belirlediği için manipülatörün mekanik empedans özellikleri haptik cihaz başarımlında önemli bir yere sahiptir. Maksimum ve minimum empedans değerleri arasındaki fark, cihaz ile harekete karşı oluşturulabilecek direnç kuvvet/tork aralığını ve bu değerlerin sıklık bandındaki değişimi kullanıcı tarafından hissedilebilen kuvvet/tork bilgisi çeşitliliğini belirlemektedir. Bu nedenle iletilen bilginin çeşitliliğinin dolayısı ile gerçekliğinin artırılması için hem oluşturulabilen empedans hem de oluşturulan empedansın frekans bandında yüksek bir aralık gerekir.

Haptik cihazın pasif (unpowered) sistem özellikleri kapsamında, empedans ve frekans aralığı mekanizmanın kinematik, dirençlik ve dinamik özelliklerinin başarımlına bağlıdır. Ancak bu özellikler birbirleri ile zıt bir ilişki içindedir. Daha yüksek empedans değerleri elde etmek için mekanizmanın daha yüksek dirençliğe sahip olması gerekir. Mekanizmanın dirençlik başarıml ölçütünün iyileştirilmesi, manipülatörün tekil konumlara sürülmesi ve/veya uzuvların et kalınlıklarının artırılmasıyla sağlanabilir. Her iki durumda da tekil konumlarda kinematik başarıml manipüle edilebilirlik açısından azalır, buna ek olarak hareket eden ataletin artmasıyla cihazın dinamik başarıml seviyesi düşer ve dolayısı ile minimum empedans seviyesi artar.

Yukarıda verilen birbiri ile çelişen başarıml kısıtlarına göre tasarım yapabilmek için uzuv boyutlarının kinematik, dirençlik ve dinamik başarıml ölçütleri gözetilerek eniyilenmesi gerekir. Bu ölçütler arasındaki ilişki doğrusal olmadığından evrimsel/yapay zekâ temelli eniyileme algoritmalarına ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, çok amaçlı genetik algoritma eniyileme yöntemi benimsenmiştir. Kinematik, dirençlik ve dinamik modeller kullanılarak amaç fonksiyonu elde edilmiştir. Kinematik başarıml değerlendirilmesinde genel amaçlı robot mekanizmaları için tanımlanmış manipüle edilebilirlik [7] ve koşul numarası (İng: condition number) [8] kısıtları kullanılmıştır. Manipüle edilebilirlik, çalışma uzayında tekil konumlardan kaçınma ve koşul numarası, izotropik hareket çözünürlüğü dağılımını elde etmek için eniyileme çalışmasına eklenmiştir.

Yukarıda bahsi geçen kısıtlara ek olarak dirençlik ile ilgili kısıtı oluşturmak için dirençlik modeli sanal mafsall yöntemi [9] kullanılarak elde edilmiştir. Dirençlik matrisi Kartezyen uzayında $\hat{K}_C = (\hat{f}_\theta \hat{K}_\theta^{-1} \hat{f}_\theta^T)^{-1}$ ile belirtilir. \hat{f}_θ sanal mafsalları içeren Jakobi matrisidir. \hat{K}_θ uzuvların sadece

geometrisi ve mekanik özelliklerine göre belirlenen mafsall uzayındaki dirençlik matrisidir. Konuma bağlı olarak değişen dirençlik matrisinin determinanı, sayısal bir değer olarak dirençlik başarımlı ölçütü olarak kullanılır [10]. Son olarak, R-CUBE mekanizmasının atalet matrisinin determinanı, konum değişikliklerine göre kütle dağılımını elde etmek amacıyla hesaplanır. Eniyileme algoritması için belirlenen amaç, atalet ve koşul sayısını azaltırken manipüle edilebilirliği ve dirençliği arttırmaktır. Minimize edilecek olan fonksiyonlar aşağıda verilmiştir.

$$O_1 = |J|^{-1} \quad (8)$$

$$O_2 = \|\hat{f}\| \|\hat{f}^{-1}\| \quad (9)$$

$$O_3 = |\hat{M}_C| \quad (10)$$

$$O_4 = |\hat{K}_C|^{-1} \quad (11)$$

Burada $| \cdot |$ determinant operatörü ve $\| \cdot \|$ ise 2-normu operatördür. \hat{M}_C atalet matrisidir. O_1 , O_2 , O_3 , ve O_4 sırasıyla manipüle edilebilirliğin tersi, koşul numarası, atalet matrisinin determinanı ve dirençlik matrisinin determinantının tersidir.

Uzuvlar 10 mm dış ve 6 mm iç çapa sahip karbon fiber borulardan imal edileceğinden, bu malzemeye ait dirençlik ve atalet bilgileri yukarıdaki amaç fonksiyonlarında göz önüne alınmıştır. Tekil konumlardan kaçınmak için eniyileme algoritmasına kısıtlayıcı denklemler eklenmiştir. Bu denklemler, $A_i B_i$ uzuvlarına ait θ_i açısının $\pm 90^\circ$ arasında ve $B_i C_i - C_i D_i$ uzuvları arasındaki açının $0^\circ, +180^\circ$ veya $0^\circ, -180^\circ$ arasında kalmasını sağlamaktadır. $B_i C_i - C_i D_i$ uzuvları için $\pm 180^\circ$ açı ölçüsü konfigürasyon seçimine bağlıdır. Eniyileme algoritması uzuv boyutlarını belirlerken, bu kısıtların çalışma uzayının her noktasında sağlandığından emin olduktan sonra eniyileme sürecine devam etmektedir. Kullanım sırasında, uzuvların kullanıcıya çarpmaması için ise yukarıda bahsi geçenlere ek olarak bir kısıt daha tanımlanmıştır. Bu durum için kullanıcının elinin her zaman hareketli platformun pozitif eksenini tarafında kalacağı öngörülmüştür. Dolayısıyla hiçbir uzuv, P noktasında tanımlanan XZ-, YZ- ve XY- düzlemlerini kesmemelidir. Bu durum C_i noktasının P'de tanımlı X-, Y- ve Z- eksenlerinin negatif tarafında kalmasıyla mümkündür. Eniyileme çalışması sonucunda bir çözüm kümesi elde edilmiştir. Bu küme içinden empedans ve frekans aralığı başarımlını en fazla arttıran çözüm seçilmiştir. Belirlenen parametreler sırasıyla şöyledir; $b = 111.7$ mm, $c = 74.1$ mm, $d = 121.8$ mm. Bu uzuv boyutları ile elde edilebilecek iletilen mafsallın çalışma aralığı $\pm 32.5^\circ$ 'dir.

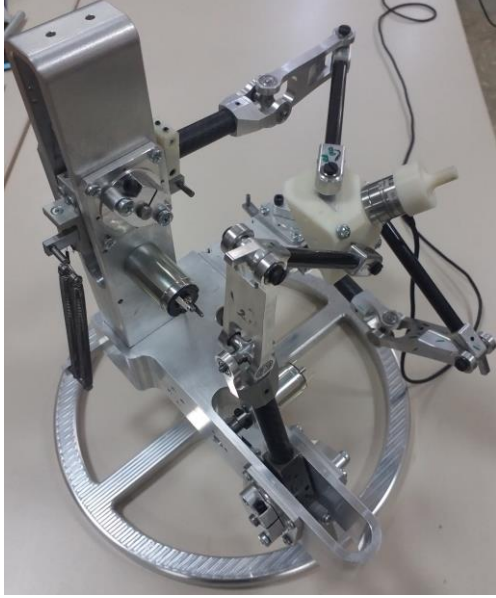
III. KONTRÜKSİYONEL TASARIM VE DENGELEME

Kinestetik haptik cihazların pasif olarak geriye sürülebilen tiplerine genel olarak empedans tipi haptik cihaz adı verilmektedir. Empedans tipi haptik cihazlar için iyileştirilmiş saydamlık (İng: transparency) ve geniş frekans aralığında çalışabilirlik için hafif ve yüksek dirençlikli manipülatör tasarımı önemlidir. Bu nedenle uzuvlar için karbon fiber borular ve bağlantı parçaları için alüminyum malzemeden üretim tercih edilmiştir (Şekil 3).

Bir manipülatörü ana cihaz olarak kullanırken kullanıcı uzuvların ağırlığını ve ataletsel etkilerini hissetmemelidir. Ağırlık etkilerini en aza indirmesi amacıyla yerçekimi dengelemesi için yaylar kullanılmıştır. Hareketli platform ve hareketli platform ile aynı dikey seviyede hareket eden tüm uzuvların ağırlıkları dikey eksenindeki hareketten sorumlu olan Bacak 3'e indirgenmiştir ve bu ağırlıklar Bacak 3'ün $A_3 B_3$

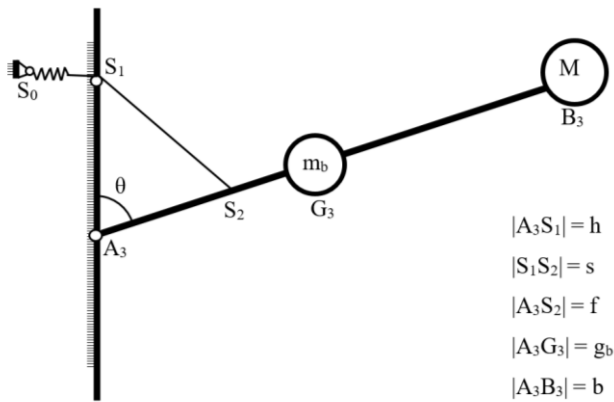
koluna bağlı bir yay ile dengelenmiştir (Şekil 2). Hareketli platform ile B_3C_3 ve C_3D_3 uzuvlarının potansiyel enerjisi birlikte değişmektedir ve bu yüzden bu uzuvların kütleleri toplanıp B_3 mafsalına indirgenmiştir. Ayrıca dengeleme çözümünü basitleştirmek için B_1C_1 , C_1D_1 , B_2C_2 ve C_2D_2 kütlelerinin yarısı B_3 mafsalına indirgenen kütlelere eklenmiştir. Bu kütlelerin yarısının alınmasının nedeni ise uzuvların kütle merkezlerinin yaklaşık olarak uzuvların ortasında yer alması ve bu nedenle dikey yöndeki hareketlerinin platform hareketinin yaklaşık yarısı kadar olmasıdır. B_3 mafsalına indirgenen toplam kütle M şu şekilde bulunur:

$$M = m_p + m_c + m_d + 2(m_c/2) + 2(m_d/2) = m_p + 2m_c + 2m_d. \quad (12)$$



Şekil 3: HISS prototip

Denklem (12)'de m_p , m_c ve m_d sırasıyla hareketli platform, B_1C_1 ve C_1D_1 uzuvlarının kütleleridir. A_3B_3 uzvunun m_b kütlesi de hesaba katıldığında Şekil 4'te gösterilen ters sarkacın dengelenmesi gerekmektedir.



Şekil 4: Yay ile dengeleme

Şekil 4'te görüldüğü üzere dengeleme yayının bir ucu manipülâtör kaidesine sabit bir S_0 noktasına, diğer ucu ise bir kabloya bağlıdır. Tasarım parametreleri $|A_3S_2| = f$, $|A_3S_1| = h$ ve doğrusal yay katsayısı k 'dır. Yay ve kablo bağlantı noktaları S_0 , S_1 , S_2 ile yay ve kablo uzunluğu öyle ayarlanmalıdır ki A_3B_3 uzvu dik konumdayken, yani $\theta = 0$ iken yay yüksüz konumda

olmalıdır, yani $f = h$ seçilmelidir. Kütleler ile yayın toplam potansiyel enerjisi şu şekilde yazılır:

$$U = m_b g g_b \cos\theta + M g b \cos\theta + \frac{1}{2} k s^2. \quad (13)$$

$S_1S_2A_3$ üçgeninde kosinüs teoremine göre

$$s^2 = f^2 + h^2 - 2fh\cos\theta. \quad (14)$$

Sabit potansiyel enerji için potansiyel enerjinin θ açısına göre değişimi sıfır olmalıdır. Denklem (14) Denklem (13)'te yerine konur, türev alınır ve sıfıra eşitlenirse

$$\frac{\partial U}{\partial \theta} = (-m_b g g_b - M g b + k f h) \sin\theta = 0 \Rightarrow k f h = (m_b g_b + M b) g \quad (15)$$

elde edilir. Denklem (15)'te tüm terimler bilinmektedir. İlk olarak seçilen f değeri için bir hedef k değeri tespit edilir. Daha sonra bu hedeflenen k değerine göre bir yay imal edilir. İmal edilen yayın yay sabiti ölçümlerle tespit edilir. Ölçüm sonucu hesaplanan yay sabiti hedeflenen değerden bir miktar farklı olacaktır. Ölçüm sonucu hesaplanan yay sabiti değeri uyarınca f değeri güncellenir.

Geriye kalan dengelenmemiş tek uzuv A_1B_1 uzvudur. Bu uzuv da Şekil 4 ve sonrasındaki formülasyona benzer şekilde dengelenebilir. İlk tasarım uyarınca her iki dengeleme yayı Şekil 2'de görülmektedir. Ancak güncel tasarımda A_1B_1 uzvu kütle merkezi dönme ekseninde olacak şekilde tasarlanmış ve Şekil 2'de altta yer alan yaya gerek kalmamıştır. Üstteki dengeleme yayının da yeri değiştirilerek tasarım daha kompakt hale getirilmiştir (Şekil 3). Şekil 3'teki prototip üzerindeki işlevsel testlerde statik dengelemenin istendiği şekilde elde edildiği görülmüştür. Mafsal sürtünmeleri denge için faydalı olmakta ve kullanıcı yerçekimine karşı herhangi bir iş yapmamaktadır.

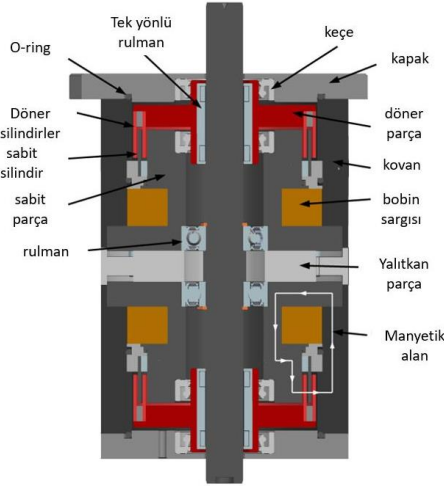
Bu kısmın başında ifade edildiği üzere ideal durumda kullanıcı uzuv ağırlıklarının haricinde ataletsel etkileri de hissetmemelidir. Ataletsel etkileri sıfırlamak ya da azaltmak için manipülâtörün tamamen ya da kısmen dinamik dengeli olması gerekmektedir. Dinamik dengeleme mevcut çalışmanın dışında tutulmuştur.

IV. YARI-AKTİF EYLEYİCİ TASARIMI

Haptik cihaz, insan operatörün dokunsal duyularını harekete geçirmek için sadece direnç kuvveti oluşturmaz, aynı zamanda yüzey pürüzlülüğü veya kayma koşulları gibi etkileri canlandırabilmek için tutamağın hareketini de üretir. HIPHAD v1.0'daki eyleyici sistem, fırçasız doğru akım (FDA) motoru içeren doğrudan-tahrik sisteminden oluşmaktadır. Bu şekilde oluşturulmuş veya bir elektrik motoru ve kapstan sürücü ile oluşturulan bir eyleyici sistemi ile çalışan bir cihaz, hem tutamağın hareketine karşı direnç kuvveti uygulayabilmekte hem de gerektiğinde tutamağın hareketini oluşturabilmektedir. Bu tip tahrik sistemleri harekete karşı direnç kuvveti ve gerektiğinde hareket üretmek için tasarlanmasına rağmen, bu eyleyici sistemleriyle direnç kuvveti oluşturulması sınırlayıcı bir faktöre sahiptir. Bu sınırlayıcı faktör, motorun boyutudur. Daha yüksek miktarda statik kuvvet uygulayabilmek için sistemin dinamik performansını düşüren daha büyük ebatlarda elektrik motorları gerekir.

Haptik cihazların eyleyici sisteminde, manyeto-reolojik sıvı (MRS) tabanlı fren sistemleri ile yani kontrol edilebilir viskozite temelli yarı-aktif eyleyiciler ile harekete karşı direnç kuvveti üretilebilir. [11]'de MRS tabanlı fren kullanılarak geliştirilmiş haptik cihazın tasarımı sunulmuştur. Bir diğer

çalışmada, MRS tabanlı fren kullanılarak çok serbestlik dereceli haptik cihaz üretilmiştir [12]. Bazı araştırmacılar, MRS tabanlı fren ile geleneksel elektrik motor-kapstan tahrik sistemini [13] kullanarak cihazın uygulayabildiği empedans-geşişliğini arttırmışlardır.



Şekil 5: Tek yönlü MRS tabanlı frenin üç boyutlu tasarımı [16]

Bir MRS sıvı tabanlı yarı-aktif eyleyici sistemi veya başka bir deyişle MRS tabanlı bir fren sistemi, sistemin dinamik performansını düşürmeden daha küçük hacme ve hareket eden ataletle sahip olarak daha yüksek miktarda statik kuvvet oluşturabilir. Bu tür sistemlerin histerisis karakteristiklerinin belirlenip uygun bir kontrolcü ile kullanılması gereklidir. Ayrıca, çalışma öncesinde sıvı içindeki partüküllerin homojen olarak dağılması ve sıcaklığın kontrol edilmesi sistemin belirlenen operasyonel karakteristikleri etrafında çalışması için gereklidir. Bununla birlikte, bu tür sistemlerin iki büyük dezavantajı vardır;

(1) genel amaçlı bir haptik cihazda sadece MRS-tabanlı fren sistemi olamaz, cihazın [14]'te sunulan sistemde olduğu gibi hareketi de oluşturabilmesi gerekmektedir.

(2) MRS frenin geleneksel tasarımı, etkinleştirildiğinde her iki yönde de fren uygulayarak hareketi kısıtlar. Bu durum, kullanıcı tarafında istenmeyen bir yapışma/takılma hissi oluşturur.

Önerilen tasarımda hareketi farklı yönlerde birbirinden bağımsız şekilde sınırlamak için, ortak bir shaft üzerine zıt yönlerde montajlanmış iki adet tek-yönlü MRS tabanlı fren bulunmaktadır. Bu şekilde, her iki yönde de birbirinden bağımsız olarak frenleme yapmak mümkündür ve bu sayede MRS tabanlı frenlerde yaygın olarak görülen yapışma/takılma sorunu çözülmüştür [15]. Tasarım ve performans değerlendirmesi [16] 'da verilmiştir ve Şekil 5'te sunulmuştur.

Tasarımdaki en temel özellik, tek yönlü kavrama veya başka bir deyişle, hareketi bir yönde sınırlayan tek yönlü rulmandır. Bu rulmanlar hareketi sadece tek yönde iletmektedir. Bu sayede tork mil tarafından tek yönde iletilir ve ters yöndeki harekette milin hareketinin serbest bırakılması sağlanır. Yeni MR fren tasarımı, Şekil 6'da gösterilen iki yönlü fren koşuluna sahiptir:

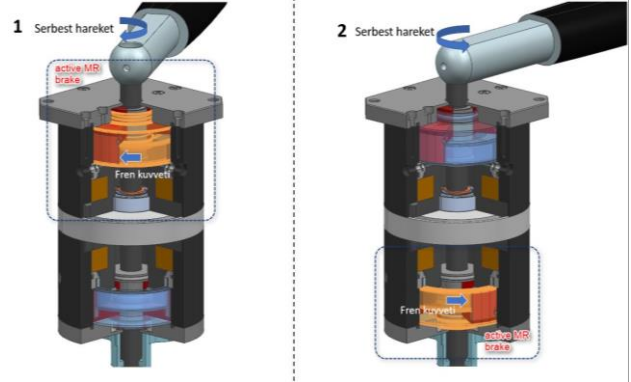
(1) Saat yönünde hareket:

- Üst MRS fren ve dönen mil arasında kavrama gerçekleşir.
- Kullanıcı, MRS freninin üst kısmının aktivasyonu ile saat yönünde dönüş gerçekleştirirken frenleme kuvvetini hisseder. Dolayısı ile kullanıcının saat yönündeki hareketine karşı direnç torku uygulanmış olur.

- Üst MRS freni çalışıyor olsa bile saat yönünün tersine hareket etmek mümkündür ve kullanıcı bu yöndeki hareketi esnasında herhangi bir direnç torku hissetmez.

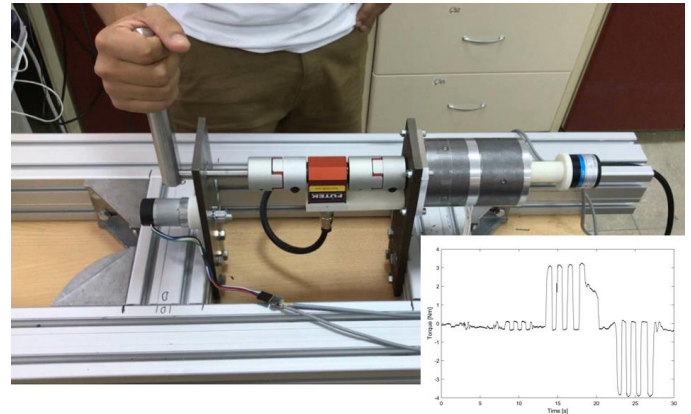
(2) Saatin ters yönündeki hareket:

- Alt MRS tabanlı fren ile mil arasında kavrama gerçekleşir.
- Kullanıcı, MRS tabanlı freninin alt kısmının aktivasyonu ile saat yönünün tersine dönüş gerçekleştirirken frenleme kuvvetini hisseder. Dolayısı ile kullanıcının saatin tersine yöndeki hareketine karşı direnç torku uygulanmış olur.
- Alt MRS tabanlı fren çalışıyor olsa bile saat yönünde hareket etmek mümkündür ve kullanıcı bu yöndeki hareketi esnasında herhangi bir direnç torku hissetmez.



Şekil 6: Tek yönlü çalışan yeni MRS tabanlı fren sistemi

Geliştirilen bu tasarımın bir sonucu olarak, harekete karşı direnç tek bir hareket yönünde uygulanabilir. Buna ek olarak, her iki yöndeki hareket farklı fren kuvvetleri ile eşzamanlı olarak bile kısıtlanabilir. Şekil 7'de sunulan deneysel çalışmanın sonuçları MRS tabanlı freninin hareketi bir yönde kısıtladığında, kullanıcının diğer yönde hareket etmekte serbest olduğunu ve kuvvet hissetmediğini açıkça göstermektedir.



Şekil 7: Kullanıcı değerlendirme test düzeneği ve sonuçlar

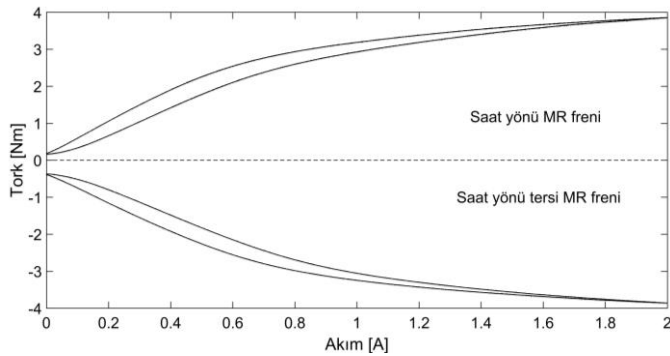
Şekil 7'deki deneysel test düzeneği, bir MRS tabanlı frene monte edilmiş manivela ile tork algılayıcısından oluşmaktadır. Kullanıcı, test sırasında kolu her iki yöne hareket ettirir. Şekil 7'deki sağ alt köşedeki bulunan resimde, kullanıcı manivelayı hareket ettirirken oluşan kuvvetlerin tork algılayıcısı tarafından ölçülen değerlerini göstermektedir. Görüldüğü gibi, MRS tabanlı freni ilk olarak sadece bir yönde aktif olmaktadır ve daha sonra ters yönde direnç torku oluşturabilen kısım aktif olur. Bu grafik incelendiğinde, kullanıcı frenleme kuvveti oluşan yönde hareket etmeye çalışırken MR freni tarafından oluşturulan bir direnç kuvvetinin oluştuğu görülmektedir. Fren

aktif ve ters yönde hareket ederken ise ölçülen tork sıfır değerine yaklaşmıştır ki bu da kullanıcının ters yönde hareket ederken direnç kuvvetini hissetmediğini doğrulamaktadır. Yapılan bu deney, çift yönlü MRS tabanlı fren sisteminin çalışma prensibini kanıtlamaktadır. Geliştirilen MRS tabanlı fren sisteminin karakterize etmek için bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2: MRS tabanlı fren özellikleri

Kategori	Özellikler
Ürün kütlesi	3.57 kg
Maks. tork @ 2 A	3.8 Nm
Min. tork @ 0 A	0.15 – 0.4 Nm
Bant genişliği	63 rad/s
Dış çap	80 mm
Uzunluk	124 mm
Sargı tel çapı	0.5 mm
Maks. akım	2 A
Sargı sayısı	450
Manyeto-reolojik malzeme	MRF-122EG
Manyetik malzeme	AISI 1008 Çeliği
Anti-manyetik malzeme	SS 304, AA 2204

Geliştirilen MR fren sisteminin oluşturacağı çıkış torku, elektrik akımı ile kontrol edilmektedir. Bu nedenle aralarındaki ilişki deneysel olarak elde edilmiştir. Karakterizasyon testi için rampa girdisi uygulanarak MRS tabanlı freninin ürettiği direnç torku tork algılayıcısı ile ölçülmüştür. Şekil 7'de verilen akım-tork ilişkisi, MRS tabanlı frenin elektrik akımı uygulanmadığında mekanik sürtünmelerden kaynaklanan minimum direnç torku ve en yüksek akım değeri uygulandığındaki maksimum direnç torku değerleri arasındaki iniş çıkışlarda gözlemlenen histerezis eğrisini sunmaktadır. İlk çalışmalarda, MRS tabanlı freni her iki yönde de kontrol edebilmek için sistem beşinci dereceden bir polinom fonksiyon ile modellenmiştir. Bu şekilde modellenen MRS tabanlı fren sistemi çıktılarını, deneysel olarak ölçülen tork değerleri ile karşılaştırıldığında, hataların karesinin ortalamasının karekökünün 0.01 Nm'nin altında olduğu görülmüştür [16].



Şekil 7: MRS tabanlı frenin akım-tork ilişkisi [16]

V. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu bildiriye daha önce ACTUATORS 2018 [16], EUCOMES 2018 [17] ve Asian MMS 2018 [18] uluslararası konferanslarında sunulmuş ve HISS projesi kapsamında gerçekleştirilen kinestetik haptik cihaz ve bileşenlerinin iyileştirilmiş başarımları için tasarlanması anlatılmıştır. Eniyileme çalışmaları sonucunda hem seri kinematik zincirlerin kinematik yapısı, hem uzuv boyutları ve yapıları hem de konstrüksiyonel iyileştirmeler önerilmiştir. Pasif dengeleme mekanizması minimum empedans değerlerini olumsuz etkilemeyecek şekilde sistem en az küle/atalet ekleyerek

geliştirilmiştir. Son olarak maksimum empedans değerlerini en küçük hacimlerde oluşturmak için yarı-aktif eyleyici tasarımı sunulmuştur. Yarı-aktif eyleyicinin eniyileme çalışması bu bildiride yer alan çalışmaların sonrasında tamamlanmıştır. Eniyilenmiş sistemde toplam dönen atalet azaltılmış ve geliştirilen haptik cihazda elektrik motor – kapstan sürücüsü ikilisi ile beraber çalışacak şekilde her eksenin sürülmesi için eniyilenmiş MRS-tabanlı frenlerin üretimi tamamlanmıştır. Bahsi geçen yarı-aktif eyleyiciler tek yönlü çalıştığı için ağırlık dengelemesi için tek başına veya yay ve/veya kütle dengelemesi ile beraber kullanılabilir. Bildiride sunulan mekanizmalar ve bileşenler üretilmiştir ve testleri devam etmektedir.

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışmada sunulan araştırmaya destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederiz (Proje Numarası: 117M405).

KAYNAKÇA

- [1] W. Li, F. Gao, J. Zhang, "R-CUBE, a decoupled parallel manipulator with revolute joints," *Mechanism and Machine Theory*, 40, 467-473, 2005.
- [2] T. Bilginçan, E. Gezgın, M. İ. C. Dede, "Integration of the hybrid-structure haptic interface HIPHAD v1.0," *Proc. Int. Sym. Mechanism and Machine Theory*, İzmir, 267-284, 2010.
- [3] T. Bilginçan, "Design of a Six Degree-of-Freedom Haptic Hybrid Platform Manipulator," Yüksek Lisans Tezi, İzmir İleri teknoloji Enstitüsü, İzmir, Mayıs 2010.
- [4] E. Samur, *Performance Metrics for Haptic Interfaces*, Springer, 2012.
- [5] J. E. Colgate, J. B. Brown, "Factors affecting the z-width of a haptic display," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 3205-3210, 1994.
- [6] E. Mobedi, İ. Görgülü, M. İ. C. Dede, "Experimental evaluation of actuation and sensing capabilities of a haptic device," *European Conference on Mechanism Science (EUCOMES 2018)*, 137-144, Springer, Cham, Eylül 2018.
- [7] T. Yoshikawa, "Manipulability of robotic mechanisms," *International Journal of Robotics Research*, 4(2), 3-9, 1985.
- [8] J. K. Salisbury, J. J. Craig, "Articulated hands: force control and kinematic issues," *International Journal of Robotics research*, 1(1), 4-17, 1982.
- [9] C. Gosselin, "Stiffness mapping for parallel manipulators," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 3, 377-382, 1990.
- [10] G. Carbone, M. Ceccarelli, "Comparison of indices for stiffness performance evaluation," *Frontiers of Mechanical Engineering*, 5(3), 2010, 270-278.
- [11] B. Liu, W. Li, P. B. Kosasih, and X. Zhang, "Development of an MR-brake-based haptic device," *Smart materials and structures*, vol. 15, no. 6, 1960, 2006.
- [12] D. Senkal and H. Gurocak, "Spherical brake with MR fluid as multi degree of freedom actuator for haptics," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 20, no. 18, 2149-2160, 2009.
- [13] E. Samur, L. Flaction, U. Spaelter, H. Bleuler, D. Hellier, and S. Ourselin, "A haptic interface with motor/brake system for colonoscopy simulation," *Haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems, 2008. haptics 2008. symposium on, 2008*, 477-478: IEEE.
- [14] C. Rossa, J. Lozada, and A. Micaelli, "Design and control of a dual unidirectional brake hybrid actuation system for haptic devices," *IEEE transactions on haptics*, vol. 7, no. 4, 442-453, 2014.
- [15] M. Karabulut, B. Taner, and M. Dede, "MR Sıvısı ile Çalışan Haptik Kol Tasarımı," *TOK 2015 Bildiri Kitabı*, 867-872, 2015.
- [16] M. G. Karabulut, M. İ. C. Dede, "Design and experimental validation of an MR-fluid based brake for use in haptics," *Proc. Actuators 2018, Bremen, Germany, 25-27 Haziran 2018*.
- [17] İ. Görgülü, G. Kiper, M. İ. C. Dede, "A critical review of unpowered performance metrics of impedance-type haptic devices," *European Conference on Mechanism Science (EUCOMES 2018)*, 129-136, Springer, Cham, 4-6 Eylül 2018.
- [18] V. Sekendiz, İ. Görgülü, M. G. Karabulut, G. Kiper, M. İ. C. Dede, "Manipulator Design for a Haptic System with Improved Performance," *IFTOMM Asian Mechanism and Machine Science (Asian MMS)*, Bangalore, India, 17-20 Aralık 2018.