



Altı serbestlik dereceli elektromekanik hareket simülöründe 6x9 matris yöntemine göre iterasyon

Hüseyin Bayram^{1*}

19.10.2015 Geliş/Received, 13.06.2016 Kabul/Accepted

ÖZ

Altı serbestlik derecesine sahip Stewart Platform Mekanizması, askeri araçların kule sistemi testlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılan simülörlerden birisidir. Bu makalede, altı eksenli Stewart Platform Mekanizması ile 6x9 transfer matrisi kullanılarak, data iterasyonu yapılması incelenmiştir. İterasyon öncesinde; data toplanacak parkurun belirlenmesi, enstrümantasyon, parkurdan data toplanması ve data analiz süreci gerçekleştirilmektedir. İterasyon esnasında yapılan işlemler, simülörün kuleye göre ayarlanması, 6x9 transfer matrisi ile model oluşturma ve 6x9 matris ile iterasyon yapılmasıdır.

Anahtar Kelimeler: 6 Dof, simülör, iterasyon, Stewart, test

Six degrees of freedom electro-mechanical motion simulator in 6x9 matrix method of iteration

ABSTRACT

Six degrees of freedom Stewart Platform Mechanism is one of the simulators used to test the turret systems of military vehicles. In this article, data iteration with six axis Stewart Platform Mechanism with 6x9 transfer matrix is described. Before iteration; road identification, implementation of instrumentation, data collection from the road and data analysis progresses is carried out. The implemente processes during the iteration are adjusment of simulator according to the turret, model creation with 6x9 transfer matrix and iteration with 6x9 transfer matrix.

Keywords: 6 Dof, simulator, iteration, Stewart, test

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1 Otokar Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş., Test ve Validasyon Müdürlüğü, Sakarya - huseyinbayram@outlook.com

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

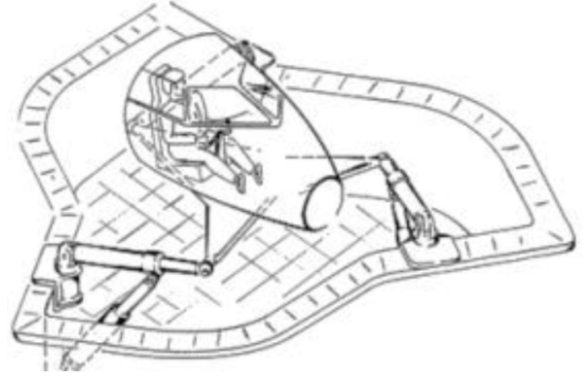
Altı serbestlik dereceli hareket simülatörü birçok farklı amaç için kullanılmaktadır. Bunlardan biri askeri araçlarda bulunan kule sistemi testlerinin gerçekleştirilmesidir. Testler hem dayanım hem de ekipman performans kontrolü olarak gerçekleştirilir. Dayanım testlerinde kuleye entegre olan ekipmanların öngürülen kullanım süreleri ele alınarak test döngüsü oluşturulur. Bunun için kulenin entegre olacağı araçta data toplama işlemi gerçekleştirilir. Toplanan datalar kule simülatöründe itere edilir. Test döngüleri oluşturulurken, kulenin kullanım ömrü dikkate alınarak test süresi belirlenir. Kuleye entegre olan ekipmanların (periskop, atış kontrol sistemi komponentleri, elektronik kartlar vb.) performans testlerinde ise hareket simülatörüne verilen karakteristiği farklı komutlar kullanılabilir. Parkurdan toplanan data iterasyon sonucu hareket profillerine dönüştürülebildiği gibi; farklı frekans, genlik ve sürelerde hareket profillerinden oluşan döngüler de oluşturulabilmektedir. Böylece farklı stabilizasyon algoritmalarının etkisini ortaya çıkarmak amacıyla testler yapılmaktadır.

Simülatör üç öteleme (lineer), üç dönme (açısal) olmak üzere toplam altı parametre ile kontrol edilir. Yoldan toplanan datanın bu parametrelerle paralellik göstermesi için, çoğunlukla kulenin merkezine yerleştirilen gyroscope ile üç adet öteleme ve üç adet dönme hareket datası toplanır. Kule modeli oluşturulurken ve iterasyonlar yapılırken de, simülatör platformunun altı eksenli hareketi ile kule dönme merkezinden altı eksenli hareketi arasında 6x6 transfer matrisi oluşturulur.

Bu çalışmada ise, data toplama aşamasında kulenin dönme merkezine 6 eksenli gyroscope yerleştirmek yerine, kule rulmanının altında gövdenin üç noktasından üç eksen (X, Y, Z) öteleme hareketi olmak üzere toplam dokuz parametre ölçülmüştür. Model oluşturma ve iterasyonlar esnasında da dokuz parametre kullanılarak 6x9 transfer matrisi oluşturulmuştur.

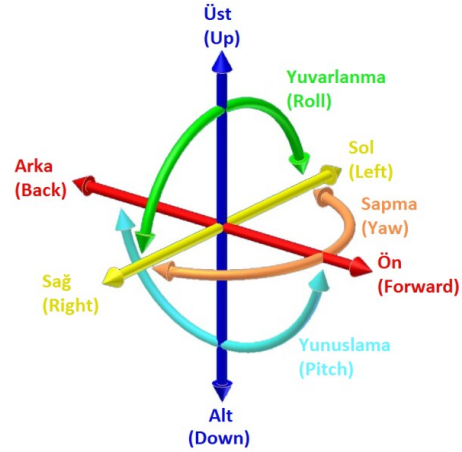
2. ALTI SERBESTLİK DERECELİ SİMÜLATÖR (SIX DEGREE OF FREEDOM SIMULATOR)

1965 yılında D.Stewart yazdığı makalede altı serbestlik dereceli (6 DOF) Şekil 1'de gösterilen hareketli bir platformun helikopter pilotlarının eğitiminde uçuş simülatörü olarak kullanılmasını önermiştir [1].



Şekil 1. Stewart uçuş simülatörünün şeması (Schematic of Stewart's flight simulator) [1]

D.Stewart'ın makalesinde anlattığı altı serbestlik derecesine sahip uçuş simülatörü bir adet hareketli üçgen platform ve bir adet sabit platform ile altı bacadan oluşmaktaydı. Şekil 2'de görüldüğü üzere üçü öteleme (heave, sway, surge) (T) üçü de dönme (pitch, roll, yaw) (R) hareketi olmak üzere toplam altı serbestlik derecesine sahiptir.



Şekil 2. Dönme eksenleri (Rotational axes)

Bu altı serbestlik dereceli hareketli platform, D.Stewart'a atfen Stewart Platform Mekanizması olarak adlandırılmakla birlikte bu mekanizmanın benzeri daha önce lastik test makinası olarak Dr. Eric Gough tarafından önerildiği için Stewart-Gough Mekanizması olarak da adlandırılmaktadır. Ayrıca mekanizma altı bacadan oluştuğu için Hexapod olarak da adlandırılmakta olup, bu isim Geodetic Technology firmasının ticari markası olarak tescillenmiştir.

Kuvvet geri besleme kontrolü olarak kullanılacak altı serbestlik dereceli yeni paralel robotlar ise Dafaoui [2] tarafından önerilmişlerdir. Hunt [3] ve Pritschow [4] ise noktalar ve doğrular arasındaki uzaklığa göre yeni paralel robotlar önermişlerdir.

1965'te Stewart'ın uçuş simülörü olarak önerdiği altı serbestlik dereceli paralel platform mekanizması başta uçak, tank, deprem ve sürüş simülörleri, radar anteni, eğlence parkları, petrol platformları, robot kolları, CNC tezgâhları, yüzey cilalama, kesme ve şekillendirme, montaj işlemleri, anten yerleştirme, mikro makineler ve ameliyat robotları olmak üzere pek çok alanda kullanılmaktadır [1, 5].

2.1. Stewart Platform Mekanizması (Stewart Platform Mechanism)

SPM (Stewart Platform Mekanizması) yapısal olarak rijit sabit ve hareketli platformlar, değişebilen/sabit uzunluklu bacaklar (aktif mafsal) ve bacaklarla platform arasındaki bağlantıyı sağlayan mafsalardan (pasif mafsal) oluşmaktadır [6, 7]. En yaygın olarak kullanılan SPM sınıflandırma şekli, bacakların platformlara bağlanma düzenlemesine göre, bir başka ifade ile hareketli ve sabit platformdaki bağlantı noktalarının sayısına göre sınıflandırmadır [8, 9]. Tekil konfigürasyonlarda bir yandan tüm bacaklar kilitlenirken, diğer yandan mekanizma bir veya daha fazla istenmeyen serbestlik derecesi kazanır veya kaybeder [10, 11]. Gerek mekanizma tasarımında gerekse mekanizmanın hareket kontrolünde, yol planlamasında tekil noktalardan kaçınmak büyük önem arz etmektedir [12, 13]. Stewart Platform Mekanizması gibi paralel robotlar kapalı çevrimli mekanizmalardır ve paralel bağlantılı yapıları nedeniyle kontrol problemlerinin çözümü karmaşıktır [14]. Diğer yandan paralel robotlarda herbir bacağın konumlama hatası doğrudan uç organı etkilemekte olup, hataların toplanan bir yapısı yoktur. Bu nedenle paralel robotların konumlama doğruluğu yüksektir [15, 16].

Stewart Platform Mekanizmasının kapalı kinematik yapısı, yüksek rijitlik sunmakla birlikte, kontrolü ve dinamik analizi güçleştirmektedir. Robotikte hassas kontrol için dinamik tanımlamanın doğru yapılması gerekmektedir [17, 18]. SPM dinamik modeli kullanılarak belirli görevler simüle edilebilmektedir. Hareketli platforma etkiyen kuvvetler simülasyon programlarında dinamik modelleme ile gözlemlenebilmektedir. Çeşitli belirlenmiş görevleri test etmek için gerçek sisteme ihtiyaç duymaksızın robotik sistemin bilgisayar simülasyonunda dinamik model kullanılabilir. [19, 20]. Mekanizmanın kinematik analizinde, hareketin tüm geometrik ve zaman esaslı özellikleri ele alınmaktadır [21, 22]. SPM kinematik analizini, ters kinematik ve düz kinematik yöntemler kullanarak gerçekleştirmek mümkündür. Ayrıca SPM düz kinematik analizi genellikle yüksek mertebeli lineer olmayan denklemler içerir. Bu denklemlerin kapalı form ve özgün çözümleri yoktur [23, 24]. Çalışma uzayı, paralel mekanizma hareketli platformunun geometrik

merkezinin/uç organın ulaşabildiği tüm koordinatlardan, noktalardan oluşan bölgedir [25, 26]. Paralel mekanizmaların kapalı çevrim yapısı, çalışma uzaylarını sınırlar ve çalışma uzayı içinde karmaşık kinematik tekillikler oluşturur. Bu nedenlerle çalışma uzayı içinde yörünge planlama çok güçleşir [27, 28].

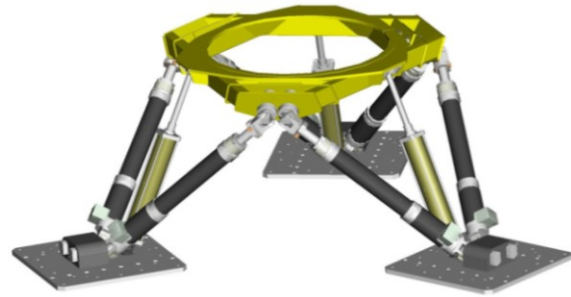
İnner ve Küçük tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı sayıda bacağa sahip olası tüm SPM mekanizmalarının kolaylıkla tasarlanabilmesini sağlayan bağlantı matrisi algoritması geliştirilmiştir. Üç ile altı bacak sayısına sahip olası tüm SPM mekanizmalarının boyutsal eniyilemesini yapabilen yazılım, kinematik özellikler temel alınarak geliştirilmiştir. Yazılım, kullanıcıların en iyi bacak uzunluklarını, sabit ve hareketli platformun yarıçapları ile bağlantı noktalarının konumlarını manipülörün beceri değeri yardımıyla hesaplayabilmektedir. Jacobian matrisi yardımıyla hesaplanan Global Beceri İndisi mekanizmanın kinematik performansını gösteren önemli bir kriterdir [29]. 6x9 matris yöntemi ise varolan bir mekanizmada yoldan toplanan dataların SPM'de simüle edilmesi için farklı bir matrisin oluşturulmasıdır.

2.2. İterasyon Yapılacak Simülör Özellikleri (The Properties Of The Iteration Simulator)

İterasyon işleminin gerçekleştirileceği altı serbestlik dereceli hareket simülörünün kapasitesi:

- Sistemin frekans kontrol aralığı: 0,4 – 20 Hz.
- Sistem kapasitesi: 25 ton
- Doğrusal hareket sığası (her üç eksen): ±300mm,
- Açısal hareket sığası (her üç eksen): ±10 derece
- Hız: 1m/s
- İvme: 10m/s²

Altı serbestlik dereceli hareket simülörü ana hatlarıyla taşıyıcı platform, altı adet hareketi sağlayan elektromekanik eyleyici ve üç adet pnömatik pistonlu oluşmaktadır (Bkz. Şekil 3).



Şekil 3. Simülörün ana bileşenleri (Simulator's main components) [30]

Pnömatik pistonlar pasif konumdadır. Pnömatik pistonların işlevi hareketli platformun statik ağırlığının bir kısmını desteklemektir. Elektromekanik eyleyici sistemin hareketini sağlayan aktif pistonlardır. eyleyici içinde bulunan hava basıncı statik dengeyi sağlar ve eyleyicinin pasif bileşenidir. Eyleyicinin alt kısmında hareketi sağlayan bir servomotor ve hareketi iletmek için eyleyicinin içinde bir mil bulunmaktadır. Motor hareketi üretmek için kullanılır. Bu kısım eyleyicinin aktif bileşenidir. Pnömatik destek sistemi dokuz piston içinde hava üretimini sağlamaktadır. Komut sinyalleri; kontrol bilgisayarının çıkış kartları üzerinden servomotor sürücülerine gönderilmektedir. Geri bildirim sinyalleri ise pistonlar üzerinde bulunan enkoderlerden kontrol bilgisayarının giriş kartlarına gönderilmekte ve bu şekilde kapalı döngü kontrol sağlanmaktadır.

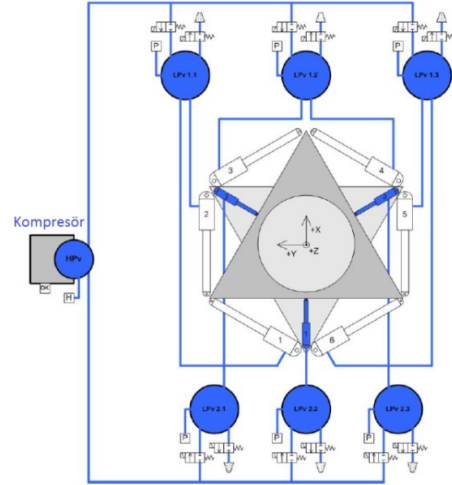
Hareketli platform farklı boyutlardaki kulelerin montajına olanak verecek şekilde tasarlanmıştır. Kulenin alt kısım uzantılarını geçirebilmek için platformun iç kısmı halka şeklindedir. Platformun dış yüzeyi ise altıgen şekilde tasarlanarak elektromekanik eyleyicilerin bağlantıları için mafsallar ve yataklar bulunmaktadır. Pnömatik pistonlar ise dış yüzeyin kenarlarına gelecek şekilde monte edilmiştir. Pistonların yerle bağlantısını sağlayan kısımlarda sabit platformlar bulunmaktadır. Sabit platformlar zemine rijit şekilde montajı yapılmıştır.

Elektromekanik eyleyiciler düşük sürtünme katsayısına sahip teleskopik tüplerden meydana gelir. İç kısımlarında vidalı mil bulundurmaktadırlar. Servomotor ise mili hareket ettirebilecek şekilde montajı yapılmıştır. Elektromekanik eyleyiciler sisteme geri besleme bilgisi verebilmek için sensörlerle donatılmıştır. Simülâtörün çalışma esnasında pistonlar içerisinde bulunan hava basıncı sabit kalır.

Simülâtörün kapasitesini taşıyabilecek ölçekte pnömatik destek sistemi bulunmaktadır. Pasif pnömatik sistem hareket eden statik yükü desteklemek için kullanılır. Bunun sonucu olarak servomotorlar sadece hareket eden platformu hızlandırmak ve yavaşlatmak için kullanılır. Statik yükü dengelemek zorunda değildir. Böylece servomotorların performansı olumlu yönde etkilenir, yüksek akım çekmesine gerek kalmaz ve sıcaklık artışı düşük seviyede kalır. Şekil 4'de görüldüğü üzere pnömatik destek sistemi vana, hortum, basınç kabı ve hava kompresöründen oluşmaktadır.

İki adet elektromekanik eyleyici için bir adet basınç tüpü kullanılmaktadır. Altı adet elektromekanik eyleyici için üç adet basınç tüpü vardır. Pnömatik pistonların birini ayrı ayrı basınç tüpleri besler. Bu nedenle üç adet pnömatik piston için üç, toplamda ise sistemin altı adet basınç tüpü bulunmaktadır. Sisteme alınan her kule için

kule ağırlığına orantılı olarak tüplerin basınç değerleri ayarlanır.



Şekil 4. 6 DOF pnömatik şeması (6 DOF pneumatic diagrams) [30]

3. HAZIRLIK AŞAMALARI (PREPARATION PROCESS)

6 DOF testi için data elde edilmesi 4 adımda gerçekleştirilmektedir:

- Parkur belirleme
- Enstrümantasyon
- Veri toplama
- Veri analizi ve sinyal işleme

3.1. Stabilizasyon Parkuru (Stabilization Road)

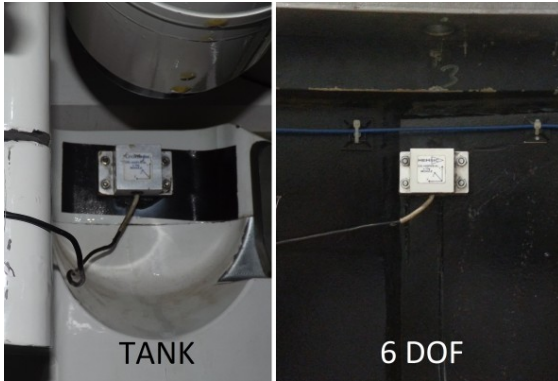
İterasyon ana muharebe tank kulesi ile yapılacaktır. Bu nedenle tankın atış kontrol sistemlerinin testi için stabilizasyon parkuru kullanılmaktadır (Bkz. Şekil 5). Parkur tasarım kriteri olarak ITOP 3-2-836 askeri standardı dikkate alınır. Standartta tarif edilen iki ayrı tip tümsek, parkur boyunca ilgili mesafelerde bulunmaktadır.



Şekil 5. Stabilizasyon Parkuru (Stabilization Road)

3.2. Araç Enstrümantasyonu (Vehicle Instrumentation)

Parkurdan gelen darbeler tankın süspansiyon sistemi ve gövdesinden geçerek kuleye iletilmektedir. Kulenin bağlantı rulmanının altına 120° açılarla takılacak ivmeölçerlerden elde edilecek data 6 DOF sisteminde iterasyon işlemi için kullanılacaktır. Tank gövdesine yerleştirilen ivmeölçerlerin mesafeleri ölçülerek bu değerler 6 DOF hareket platformu üzerinde aynı noktalara ivmeölçer yerleşiminde kullanılır. Şekil 6'da ivmeölçerlerin kuleye olan mesafesi gözönünde bulundurularak tankta ve 6 DOF sistemindeki yerleşimi gösterilmektedir.



Şekil 6. Tank ve 6 DOF ivmeölçer yerleşimi (Tank and 6 DOF accelerometer placement)

Tankın gövdesine 120° açı yapacak şekilde üç adet ivmeölçer yerleştirilir. İvmeölçerlerden üç eksen (X, Y, Z) için data toplama işlemi gerçekleştirilir. Ayrıca tankın hızını ve konumunu kayıt altına almak için GPS cihazı kullanılır. Çok kanallı veri toplama sistemi, ivmeölçerler ve GPS'den gelen dataları senkronize olarak kaydetmesi için tanka yerleştirilir.

3.3. Data Toplama (Collecting Data)

Araç uygun hızlarda stabilizasyon parkurunda sürülerek test için data toplama işlemi gerçekleştirilir. Data toplama işlemi test için en önemli süreçtir. Data toplama esnasında yapılacak yanlışlık tüm teste olumsuz yönde etki edecektir. Bu yüzden data toplama işleminden önce yol profili, tankta bulunan ekipmanın doğruluğu, ivmeölçerlerin yeri, data örnekleme frekansı ve data çözünürlüğü seçilirken dikkat edilmesi gerekmektedir. Şekil 7'de ana muharebe tankıyla stabilizasyon parkurundan data toplama işlemi görülmektedir.

Yoldan gelen titreşimlerin kayıpsız bir şekilde hafızaya alınabilmesi için beklenen en yüksek titreşim frekansının en az iki katı büyüklüğünde örnekleme frekansı seçilmelidir. Testler esnasında yol verileri 1000 Hz örnekleme frekansı ile kayıt altına alındı. Bu testler

esnasında ivme kanallarının çözünürlüğü 16 bit olarak seçildi [31].



Şekil 7. Stabilizasyon parkurundan data toplama (Collecting data on the stabilization road)

3.4. Data Analizi ve Sinyal İşleme (Data Analysis And Signal Processing)

Test için toplanan yol dataları iterasyondan önce bazı işlemlerden geçirilir.

- Datanın başlangıç değerinde kayma varsa "Drift/Offset" yöntemi ile düzeltilir.
- Datanın içerisinde gerçek dışı minimum, maksimum noktalar varsa "Spike Filter" yöntemiyle temizlenir.
- Data içerisinde bulunan yüksek frekanslı veriler gerçek mekanik titreşim olmadığı için filtrelenir. Filtreleme işlemi dijital ortamda "Fourier Filter" metodu ile gerçekleştirilir.

4. 6 DOF'DA İTERASYON SÜRECİ (6 DOF ITERATION PROCESS)

İterasyon işlemi için kullanılacak kule tank gövdesinden sökülerek 6 DOF'a bağlanır. Burada kulenin bağlantı şekli, kilitli olma durumu gibi parametreler önemlidir. Data toplama işlemindeki parametreler 6 DOF sisteminde de aynı şekilde olmalıdır. Aksi takdirde iterasyon işlemi başarısızlıkla sonuçlanır.

İterasyon işlemi için öncelikle 6x9 matrisine göre kulenin modeli oluşturulur daha sonra parkurdan toplanan datayı hareket simülasyonunda elde edebilmek için iterasyon işlemine başlanır. İterasyon işlemi tamamlandıktan sonra istenilen döngü sayısına göre test süresi oluşturulur.

4.1. Model Oluşturma (Creation of Model)

Kule ağırlığına göre sisteme ait olan hava tüplerinin basınç değerlerinin ayarlanması gerekmektedir. Basınç değerinin düşük olması durumunda hava tüplerindeki hava sistem ağırlığını kaldıramaz. Basıncın yüksek olması ise

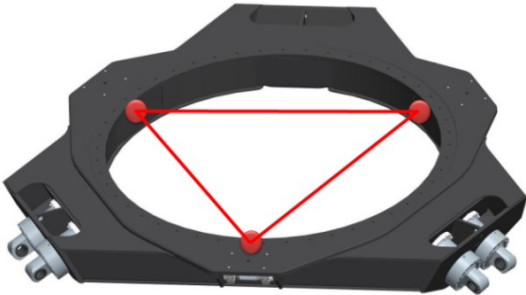
sistemi kilitleyerek çalışmasını engeller. Şekil 8'de tank kulesinin 6 DOF'daki konumu gösterilmektedir.



Şekil 8. Kulenin 6 DOF'daki yerleşimi (Turret placement on the 6 DOF)

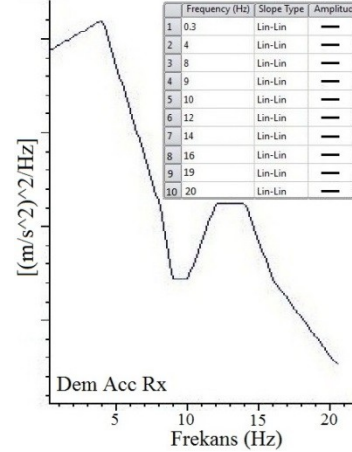
Altı serbestlik dereceli hareket simülöründe yapılan işlem, stabilizasyon parkurundan elde edilen data'lara karşılık gelen piston hareket değerlerinin bulunmasıdır.

İterasyon sonucu elde edilen değerler simüle edildiğinde parkurda elde edilen ivme değerlerinin aynı oluşmalıdır. Hareket simülöründe alınan her kule için ayrı ayrı model oluşturulması gerekmektedir. Bunun için öncelikle tankın gövdesine takılan ivmeölçerler kuleye olan mesafeleri sabit tutularak 6 DOF sistemi üst platformuna yerleştirilir. Şekil 9'da görüldüğü üzere parkurdan data toplanırken kullanılan üç noktaya üçer eksen olacak şekilde yerleşim gerçekleştirilir.



Şekil 9. 6 DOF ivmeölçer noktaları (Accelerometer points in the 6 DOF)

Kulenin matematiksel modeli oluşturulurken sistemde çalışacak datanın frekansa bağlı enerji seviyeleri (PSD) belirlenebilir. Enerji seviyeleri belirlenirken hangi frekansta daha yüksek, hangi frekansta daha düşük enerji seviyesinin girileceği parkurdan toplanan data yardımıyla bulunur. Bunun için parkurdan toplanan ivme datasının PSD grafiği alınır. Frekansa bağlı bulunan enerji seviyeleri hareket simülörünün yazılımı sayesinde sisteme girilir (Bkz. Şekil 10).

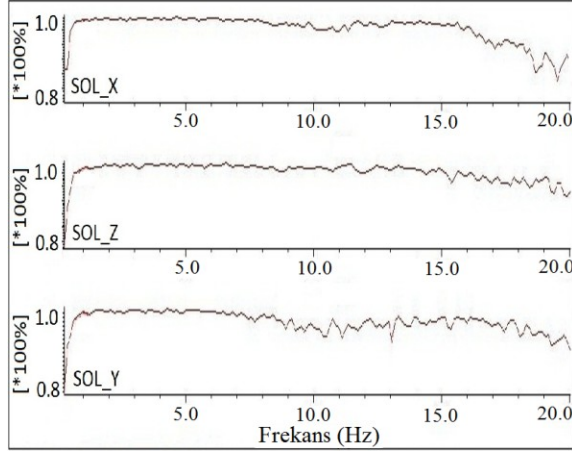


Şekil 10. Yol data frekansı (Road data frequency)

Bu işlem sayesinde parkurdan toplanan data ve kule modelini çıkarmak için çalışacak datanın frekans içeriği hem karakteristik olarak hemde enerji seviyesi olarak birbirine yaklaşmış olur. Kulenin matematiksel modeli oluştururken ve iterasyon işlemleri esnasında 6x9 matris kullanılır. Sistem kontrolünü üç adet öteleme ve üç adet dönme hareketi olmak üzere altı parametreden kontrol eder. Data toplama işlemi esnasında ise tankın gövdesinden üç noktada üç eksen (X, Y, Z) olmak üzere toplam dokuz parametre kullanılmıştır. Bu parametrelerin tamamı 6x9 matrisinde eşleştirilir.

Sisteme her bir eksende 0.4-20 Hz frekans aralığında ve önceden belirlenen genlik profiline sahip altı eksenli hareket sinyali komut olarak gönderilir, geri bildirim sinyali olarak ivmeölçerlerden dokuz eksenli ivme verisi elde edilir. Simülör yazılımı kullanılarak, komut ve geri bildirim sinyalleri arasındaki frekansa bağlı transfer matrisi (H) oluşturulur, kazanç (gain) ve uyumluluk (coherence) eğrileri elde edilir.

Coherence (uyumluluk, eş fazlı) eğrisinde sisteme verilen konut ile sistemden okunan verinin birbirini karşılama oranına bakılmaktadır. Bu değer bir seviyesinde olması, sisteme verilen konut ile sistemden okunan konutun aynı olduğunu gösterir. Coherence eğrisindeki uyum daha kaliteli model ve iterasyon yapmasını sağlar. Şekil 11'de 6 DOF simülörünün ön kısmında yer alan ivmeölçerlerin X, Y ve Z eksenleri için çıkartılan coherence grafikleri görülmektedir. Coherence eğrileri üç ivmeölçer için de çıkartılmıştır.



Şekil 11. Coherence grafikleri (Coherence graphics)

İterasyon kule modeli üzerinden devam ettiği için doğru modeli oluşturmak iterasyonun güvenilirliği için önemlidir. Tablo 1’de kule modeli için oluşturulan 6x9 matris görülmektedir.

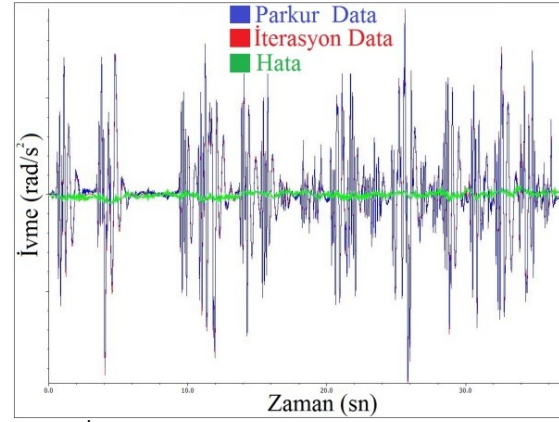
Tablo 1. 6x9 matris model (6x9 matrix modeling)

		Transfer Matris Girdisi						
		R _x	R _y	R _z	T _x	T _y	T _z	
Transfer Matris Çıktısı	Ön	T _x	H _{1,1} (T _x ,R _x)	H _{1,2} (T _x ,R _y)	H _{1,3} (T _x ,R _z)	H _{1,4} (T _x ,T _x)	H _{1,5} (T _x ,T _y)	H _{1,6} (T _x ,T _z)
		T _y	H _{2,1} (T _y ,R _x)	H _{2,2} (T _y ,R _y)	H _{2,3} (T _y ,R _z)	H _{2,4} (T _y ,T _x)	H _{2,5} (T _y ,T _y)	H _{2,6} (T _y ,T _z)
		T _z	H _{3,1} (T _z ,R _x)	H _{3,2} (T _z ,R _y)	H _{3,3} (T _z ,R _z)	H _{3,4} (T _z ,T _x)	H _{3,5} (T _z ,T _y)	H _{3,6} (T _z ,T _z)
	Sağ	T _x	H _{4,1} (T _x ,R _x)	H _{4,2} (T _x ,R _y)	H _{4,3} (T _x ,R _z)	H _{4,4} (T _x ,T _x)	H _{4,5} (T _x ,T _y)	H _{4,6} (T _x ,T _z)
		T _y	H _{5,1} (T _y ,R _x)	H _{5,2} (T _y ,R _y)	H _{5,3} (T _y ,R _z)	H _{5,4} (T _y ,T _x)	H _{5,5} (T _y ,T _y)	H _{5,6} (T _y ,T _z)
		T _z	H _{6,1} (T _z ,R _x)	H _{6,2} (T _z ,R _y)	H _{6,3} (T _z ,R _z)	H _{6,4} (T _z ,T _x)	H _{6,5} (T _z ,T _y)	H _{6,6} (T _z ,T _z)
Sol	T _x	H _{7,1} (T _x ,R _x)	H _{7,2} (T _x ,R _y)	H _{7,3} (T _x ,R _z)	H _{7,4} (T _x ,T _x)	H _{7,5} (T _x ,T _y)	H _{7,6} (T _x ,T _z)	
	T _y	H _{8,1} (T _y ,R _x)	H _{8,2} (T _y ,R _y)	H _{8,3} (T _y ,R _z)	H _{8,4} (T _y ,T _x)	H _{8,5} (T _y ,T _y)	H _{8,6} (T _y ,T _z)	
	T _z	H _{9,1} (T _z ,R _x)	H _{9,2} (T _z ,R _y)	H _{9,3} (T _z ,R _z)	H _{9,4} (T _z ,T _x)	H _{9,5} (T _z ,T _y)	H _{9,6} (T _z ,T _z)	

4.2. İterasyon (Iteration)

Modelde kullanılan üç adet ivmeölçerin üçer eksenli iterasyonlar esnasında da kullanılır. 6x9 matrisinden yararlanılarak iterasyon işlemi gerçekleştirilir. Parkurdan toplanan data seçildikten sonra, sistemde simüle edilecek frekans aralığı belirlenir. İterasyonlar esnasında yoldan toplanan datanın %30 oranı sisteme verilir. Bu nedenle

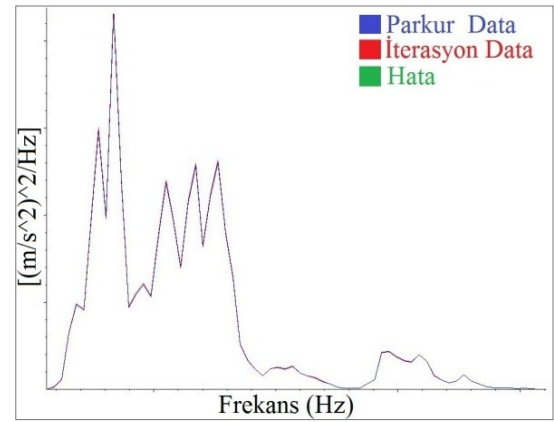
ilk iterasyonda RMS hata payı yaklaşık %70 civarında oluşur. İterasyona devam edildiğinde hata payı gittikçe azalarak parkurdan toplanan dataya yaklaşılır.



Şekil 12. İstenen data- cevap-hata miktarları (The desired data-response-error)

İterasyonlar esnasında kontrol amaçlı dikkate alınan grafiklerden ilki, parkur datası, cevap datası ve hata datasını aynı anda gösteren grafikdir. Bu grafikte hatanın nerelerde oluştuğu ve parkur ile iterasyon datasının birbirine ne kadar yaklaştığı görülür. Şekil 12’de elde edilmek istenen data, iterasyon sonucu elde edilen data ve aradaki hata payını gösteren data karşılaştırılmalı olarak gösterilmektedir.

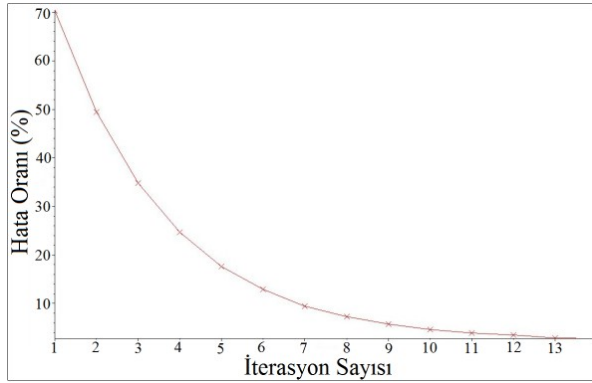
İterasyonlar esnasında elde edilen datanın doğruluğunu kontrol etmek için başvurulan yöntemlerden ikincisi frekans içeriği incelenmektedir. Parkurda toplanan data ve iterasyonlar sonucu elde edilen dataya ait frekans eğrilerinin karakteristikleri ve enerji seviyeleri birbirini tutması gerekmektedir. Şekil 13’de elde edilmek istenen data ile iterasyon sonucu elde edilen datanın frekans açısından karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 13. İstenen ve cevap datası frekans karşılaştırması (The desired and response data frequency comparison)

İterasyon sonucunun kontrolüne yönelik incelemelerden bir diğeri ise yüzdesel RMS hata oranıdır. İterasyona

başlamadan önce hata oranı 100 kabul edilir. İlk iterasyondan sonra oluşan hata payının % 30'u verilerek iterasyona devam edilir ve hata payı minimum noktaya ininceye kadar süreç devam eder. Her iterasyondan sonra gerçek dataya ne kadar yaklaşıldıysa o oranda hata oranında düşer. İterasyon sayısı arttıkça hata oranında da düşme gözlemlenir. Belli bir iterasyon sayısından sonra hata oranı ya çok az düşer ya da paralel şekilde kalır. Bu durumda iterasyon için optimum noktanın sağlanmış olduğu anlaşılır. Şekil 14'de iterasyonlar esnasında elde edilen RMS hata paylarının yüzdesel değişimi görülmektedir.



Şekil 14. RMS-hata yüzdesi (RMS percentage of errors)

6x9 matris yöntemi ile elde edilen data, parkurdan toplanan data ile karşılaştırıldığında hata payı % 3'ün altına düştüğü tespit edilmiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, askeri araçların kule testlerinde kullanıldığı gibi, otomotivden uzay teknolojisine kadar endüstrinin birçok farklı alanında başarı ile kullanılan bir paralel mekanizma türü olan Stewart Platform Mekanizması'nın iterasyon mantığı ele alınmıştır. Ayrıca SPM'nin gelişimi, sınıflandırılması, tasarımı, tekilliği, dinamiği, kontrolü, kinematiği konularından bahsedilmiştir. İterasyon için gerekli olan data toplama işleminin nasıl olması gerektiği incelenmiştir. Model oluşturma ve iterasyon esnasında kullanılan üç öteleme, üç dönme olmak üzere toplam altı parametre ile yapılacak 6x6 matris yerine kulenin üç noktasından üç eksen (X, Y, Z) olmak üzere toplam dokuz parametre kullanılarak 6x9 matris yapılmıştır. Yapılan bu matrise göre iterasyon gerçekleştirilmiş ve yoldan toplanan data ile iterasyon sonucu elde edilen datanın sapma miktarlarına bakılmıştır. 6x9 matris ile yapılan iterasyonlar sonucu elde edilen sonuçlar dikkate alındığında hata payı % 3'ün altında olduğu görülmüştür. Böylece iterasyonlar sonucunda elde edilen bu değer 6x9 matris modelin olumlu sonuç verdiğini göstermektedir.

Bu çalışmada üç noktadan ivme ölçümü ile 6x9 matris model oluşturulmuş ve 6x9 matrise göre iterasyon süreci ele alınmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda ölçüm nokta sayısı artırılabilir. Ancak matris daha karmaşık hale geleceği için buna bağlı olarak iterasyonun gerçeğe yaklaşmasında probleme neden olabilir. Bunun için ölçüm noktası ve iterasyon kalitesi göz önünde bulundurularak optimum noktanın belirlenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] D. Stewart, "A platform with six degrees of freedom", Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, cilt 180, pp. 371-386, 1965.
- [2] E. Dafaoui, Y. Amirat, J. Pontnau ve C. Francois, "Analysis and design of a six- DOF parallel manipulator, modeling, singular configurations, and workspace", IEEE Transactions on Robotics and Automation, cilt 14, pp. 78-92, 1998.
- [3] K. H. Hunt, "Structural kinematics of in-parallel-actuated robot-arms", Journal of Mechanical Design, cilt 105, p. 705-712, 1983.
- [4] G. Pritschow, C. Eppler ve W. Lehner, "Highly dynamic drives for parallel kinematic machines with constant arm length", Proc. 1st Int. Colloq., Collaborative Res. Center, Braunschweig, 2002.
- [5] F. Li, J. Kuiper, S. Khan, C. Hutchinson ve C. Evans, "Oc30 a new method to measure the inter-fracture site movements (IFMS) Dynamically By Means Of Stewart Platform Algorithm", J. Bone Joint Surg. Br., 2008.
- [6] E. Fichter ve E. McDowell, "A novel design for a robot arm", Proceedings of the ASME International Computer Technology Conference, San Francisco, 1980.
- [7] C. T. Chen, "Reconfiguration of a parallel kinematic manipulator for the maximum dynamic load-carrying capacity", Mechanism and Machine Theory, cilt 54, pp. 62-75, 2012.
- [8] B. Dasgupta ve Mruthyunjava, "The Stewart platform manipulator: a review", Mechanism and Machine Theory, cilt 35, pp. 15-40, 2000.
- [9] B. İner, S. Küçük ve Z. Bingül, "Farklı yapıdaki stewart platformlarının tek bir çatı üzerinden tasarımı ve benzetimi", Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Sivas, 2010.
- [10] H. Pendar, M. Mahnama ve H. Zohoor, "Singularity analysis of parallel manipulators using constraint plane method", Mechanism and Machine Theory, cilt 46, pp. 33-43, 2011.
- [11] Y. Cao, H. Zhou, L. Shen ve B. Li, "Singularity kinematics principle and position-singularity

- analyses of the 6-3 Stewart-Gough parallel manipulators”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, cilt 25, no. 2, pp. 513-522, 2011.
- [12] J. Chin, Y. Sun ve Y. Cheng, “Force computation and continuous path tracking for electro-hydraulic parallel manipulators”, *Control Engineering Practice*, cilt 16, pp. 697-709, 2008.
- [13] C. ShiLi, W. Tao, W. Qun, Y. Yu ve Z. Ying, “A novel method for singularity analysis of the 6-SPS parallel mechanisms”, *Science China Technological Series*, cilt 54, pp. 1220-1227, 2011.
- [14] J. Lin ve C. Chen, “Computer-aided-symbolic dynamic modeling for Stewart-platform manipulator”, *Robotica*, cilt 27, pp. 331-341, 2009.
- [15] S. Kızıır, Z. Bingül, C. Oysu ve S. Küçük, “Development and control of a high precision Stewart platform”, *SDU International Journal of Technologic Sciences*, cilt 3, pp. 51-59, 2011.
- [16] H. Guo, Y. Liu, G. Liu ve H. Li, “Cascade control of a hydraulically driven 6-DOF parallel robot manipulator based on a sliding mode”, *Control Engineering Practice*, cilt 16, pp. 1055-1068, 2008.
- [17] A. Lopes, “Dynamic modeling of a Stewart platform using the generalized momentum approach”, *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, cilt 14, pp. 3389-3401, 2009.
- [18] J. Wang, J. Wu, L. Wang ve T. Li, “Simplified strategy of the control”, *Mechanism and Machine Theory*, cilt 42, pp. 1119-1140, 2007.
- [19] H. Guo ve H. Li, “Dynamic analysis and simulation of a six degree of freedom Stewart platform manipulator”, *Mechanical Engineering Science*, cilt 220, pp. 61-72, 2006.
- [20] K. Harib ve K. Srinivasan, “Kinematic and dynamic analysis of Stewart platform-based machine tool structures”, *Robotica*, cilt 21, pp. 541-554, 2003.
- [21] W. Khalil ve D. Murareci, “Kinematic analysis and singular configurations of a class of parallel robots”, *Mathematics and Computers in Simulation*, cilt 41, pp. 377-390, 1996.
- [22] D. Zhang ve Z. Gao, “Forward kinematics, performance analysis, and multi-objective optimization of a bio-inspired parallel manipulator”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, cilt 28, pp. 484-492, 2012.
- [23] H. Gonzales, M. Dutra ve O. Lengerke, “Direct and inverse kinematics of Stewart platform applied to offshore cargo transfer simulation”, *13th World Congress in Mechanism and Machine Science*, Guanajuato, 2011.
- [24] M. Husty, “An algorithm for solving the direct kinematics of general Stewart-Gough platforms”, *Mechanism and Machine Theory*, cilt 31, pp. 365-380, 1996.
- [25] C. Brisan ve A. Csiszar, “Computation and analysis of the workspace of a reconfigurable parallel robotic system”, *Mechanism and Machine Theory*, cilt 46, pp. 1647-1668, 2011.
- [26] Z. Kuzeci, H. Alp, V. Omurlu ve İ. Ozkol, “Workspace analysis of parallel mechanisms through neural networks and genetic algorithms”, *The 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Sarajevo, 2012.
- [27] A. Dash, I. Chen, S. Yeo ve G. Yang, “Workspace generation and planning singularity-free path for parallel manipulators”, *Mechanism and Machine Theory*, cilt 40, pp. 776-805, 2005.
- [28] E. Macho, O. Altuzarra, E. Amezua ve A. Hernandez, “Obtaining configuration space and singularity maps for parallel manipulators”, *Mechanism and Machine Theory*, cilt 44, pp. 2110-2125, 2009.
- [29] B. Inner ve S. Küçük, “a novel kinematic design, analysis and simulation tool for general Stewart platforms”, *Transactions of the society for modeling and simulation international*, cilt 89, pp. 876-897, 2013.
- [30] MOOG, “System Design Report”, System design report MB-EP-6DOF/20/28000, Nieuw-Vennep, 2011.
- [31] H. Bayram, İ. Çokal ve E. Usta, “Yeni nesil zırlı aracın hızlandırılmış ömür testi ve iyileştirme faaliyetleri”, *7. Savunma Teknolojileri Kongresi*, Ankara, 2014.