

# Genetik algoritmalarla simülör kontrolünde PD katsayılarının optimizasyonu

Sait N.YURT\*, İbrahim ÖZKOL

İTÜ Uçak Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, 80626, Maslak, İstanbul

## Özet

*Bu çalışmada bir pilotu eğitmek amacıyla uçuş sırasında oluşabilecek birbirini takip eden hareketler sonucundaki kuvvet ve momentlerin uçuş simülörünüyle oluşturulması tasarlanmaktadır. Bu sebeple bu tasarım için 6-3 Stewart Platform Mekanizması (SPM) kullanılmaktadır. Elde edilen dinamik modelin kontrolü için, ayak uzunluğuna dayanan bir PD kontrol algoritması uygulanmıştır. PD katsayılarının optimizasyonunda Gerçek kodlanmış Genetik Algoritmalar (GA) kullanılmıştır. Daha hızlı ve efektif bir performans elde etmek için GA'da seçilen uygunluk fonksiyonu, sistemin birim basamak cevabına ilişkin maksimum aşım, yerleşme zamanı ve kalıcı hatayı içermektedir. Son olarak ele alınan sistemin performansı literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Paralel mekanizmalar, Dinamik Analiz, PD kontrol, Genetik Algoritmalar.

## Optimisation of the PD coefficients in a flight simulator control via GAs

### Abstract

*In this study the design of motion-based flight simulators is carried out by specifying the performance required of the motion cueing mechanism, to generate translational and angular motions, as a 6-3 Stewart Platform Mechanism. These motions are intended to approximate the specific forces and angular accelerations encountered by the pilot in the simulated aircraft. Firstly, the dynamics of this 6-3 Stewart Platform Mechanism is given in closed form as in our earlier study. Then, for the control of obtained dynamic model, a leg-length based PD algorithm is applied. In the optimisation of the applied PD algorithm's coefficients, Real Coded Genetic Algorithms (GAs) are used. So as to have faster and effective system's performance, the fitness function chosen, in Genetic Algorithms, having maximum overshoot value, settling time and steady state error which are obtained from the unit step response. The performance of the system studied is compared to the similar studies in the literature exist, reveals that the performance obtained about three times better than any performances for the similar system, given in the literature. Furthermore, achievement in the system performance can be increased by using more adaptive algorithms by which it is possible to make precise real time control. However, in order to manage this goal, the dynamical model needed further improvement such as friction modelling on the moving surfaces.*

**Keywords:** Parallel mechanism, dynamic analysis, PD Control, GAs.

---

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Sait N. YURT. [syurt@yahoo.com](mailto:syurt@yahoo.com); Tel: (212) 285 31 00.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Uçak Uzay Bilimleri Fakültesi'nde tamamlanmış "6-3 Stewart platform mekanizmasının kinematik, dinamik analizi ve kontrolü" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 04.02.2002 tarihinde dergiye ulaşmış, 31.05.2002 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.12.2002 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.



## Giriş

Son yıllarda, paralel mekanizmalar çeşitli disiplinlerdeki birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Bu çalışmada bir uçuş simülöründe pilotun algılaması gereken birbirini takip eden hareketleri oluşturacak doğrusal ve açısal ivmelenmeleri oluşturacak bir mekanizmanın tasarlanması amaçlanmaktadır.

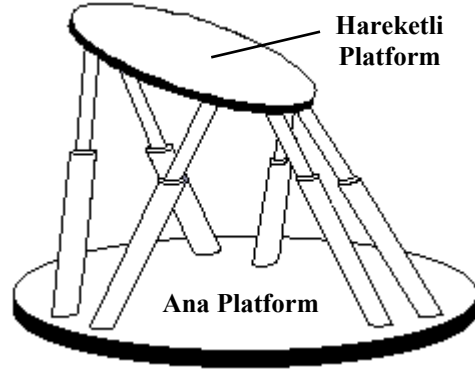
Bu hareketlerle, simüle edilen uçaktaki pilotun karşılaştığı özel ivmelere bir yaklaşım yapılması ve pilotun izlediği ekran ile kendi vücudunun algıladığı ivmelenmeler arasında bir uyumun sağlanması amaçlanmaktadır. Bu hareketleri gerçekleştiren Stewart platformu söz konusu gereksinimlerin bir fonksiyonu olarak boyutlandırılabilir. (Reid ve Nahon, 1988, Advani v. diğ., 1999).

Stewart platform mekanizması (SPM) boyları değişebilen bacaklarla birbirine bağlanmış iki rijit cisimden oluşan, altı serbestlik dereceli bir mekanizmadır. Bu paralel mekanizma yapısı, 1965'te D. Stewart tarafından uçuş simülörü olarak sunulan mekanizmanın genelleştirilmesi ile elde edilir. Stewart platformunun uçuş simülörü olarak kullanılmasından sonra bu yapıda seri-paralel veya tamamen paralel olarak kullanılmasına yönelik birçok değişiklikler önerilmiştir.

Son birkaç yılda birçok araştırmacı paralel mekanizmalar konusuna kinematik ve dinamik olarak bazı açılardan genişlik kazandırmıştır. Genelleştirilmiş Stewart platformu her iki ucunda küresel mafsal veya bir ucunda küresel diğer ucunda üniversal mafsal bulunan altı adet bacak ile birbirine bağlanmış, biri sabit diğeri hareketli iki adet platform içermektedir (Şekil 1) (Dasgupta ve Mruthyunjaya, 1998a).

Bu çalışmada kolay kontrol edilebilen daha kuvvetli bir paralel mekanizma oluşturabilmek için incelenen 6-3 Stewart Platform mekanizmasındaki uzayıp kısalabilen ayaklar birleştirilerek üst platforma bağlanmışlardır. Her bir bacağın alt parçası üniversal mafsal kullanılarak alt platforma bağlanmıştır. Bu üniversal mafsalların sabit eksenleri alt platform düzleminde ve

üst taraftan birleştirilen bacakların alt noktalarından geçen doğru yönündedir.



Şekil 1. Stewart Platform mekanizmasının genel bir görünüşü

Her bir bacak çiftinin üst parçaları döner mafsal kullanılarak birbirine bağlanmıştır. Bacak çiftlerinin belirlediği düzlemin üzerinde bulunan döner mafsalların dönme merkezine küresel bir mafsal yerleştirilmiştir. Bu döner mafsalların hareketli üst platforma bağlantısı, söz edilen bu küresel mafsallarla sağlanmaktadır.

Her iki platforma, bacaklara ait kütle tanımlamaları ve atalet momentleri ile 6-3 UPS SPM'in dinamik denklemlerinin türetilmesine ait metodoloji, kaynak (Yurt ve Ozkol, 2001)'ta gösterilmiştir. Burada Newton-Euler yaklaşımıyla geliştirilen dinamik modelde bütün mafsallara ait sürtünmeler göz önüne alınmıştır.

## Dinamik Model

Son yıllarda paralel mekanizmaların kinematiği ve dinamiği üzerine pratik ve teorik birçok çalışma yapılmaktadır. Paralel mekanizmaların dinamik modelinin kurulmasına yönelik olarak, Lagrange yaklaşımı, Newton-Euler yaklaşımı ve virtüel iş prensibinin kullanılması gibi metodlar önerilmiştir (Lee ve Shah, 1988; Lebret v. diğ., 1993). Dinamik denklemlerin çıkarılmasında Virtüel iş prensibinin kullanılması, paralel mekanizmaların ters dinamiği için daha uygundur (Wang ve Gosselin, 1998; Tsai, 2000). Diğer taraftan Lagrange yaklaşımı iyi yapılandırılmış bir formülasyon olmakla birlikte metodun gerektirdiği kısmi türevlerin bulunmasında yüklü miktarda sembolik hesaplamalar gerektirmekte-

dir (Lee ve Geng, 1993; Pang ve Shahinpoor, 1994; Liu ve Lu, 2000). Bununla birlikte, Newton-Euler yaklaşımında bağlantı elemanları arasındaki bütün kısıtlayıcı kuvvet ve momentlerin hesaplanması gerekir (Dasgupta ve Mruthyunjaya, 1998b). Geliştirilen dinamik modele bağlı olarak kuvvetler ve momentler bu çalışmamızda yaptığımız gibi simülasyonun kontrol parametreleri ile ilişkilendirilebilir.

Başlangıçta, dinamik modelin oluşturulmasında kullanılacak platforma ait büyüklükleri tanımlayalım. Burada  $q_i$ , üst platformun kendi eksen takımında köşe koordinatları ve R dönüşüm matrisi olmak üzere, bacak vektörü  $S_i$ ' yi:

$$\mathbf{q}_i = \mathbf{R} \mathbf{p}_i \quad (i : 1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{q}_i + \mathbf{t} - \mathbf{b}_i, \quad (i : 1, 2, \dots, 6) \quad (2)$$

şeklinde yazabiliriz. İndis karışıklığını önlemek amacıyla, üçgen olan üst platformun köşeleri yukarıdaki ifadelerde  $\{p_1, p_1, p_2, p_2, p_3, p_3\}$  gibi iki kere sayılmış ve köşe sayısı altı olarak düşünülmüştür. Bu sistemde ikişerli guruplanan bacakların uç noktalarının hızları aynı olacaktır. Bacaklara ait hızları:

$$\dot{\mathbf{S}}_i = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{q}_i + \dot{\mathbf{t}}, \quad (i : 1, 2, \dots, 6) \quad (3)$$

şeklinde yazabiliriz. Ayrıca bacakların uzunlukları,  $L$  ve birim vektörleri,  $s_i$ , aşağıda verilmiştir:

$$s_i = \mathbf{S}_i / L_i \quad (4)$$

$$L_i = \|\mathbf{S}_i\| \quad (5)$$

Bacaklara ait büyüklükler kendi eksen takımlarında verilmektedir. Bacaklara ait dinamik denklemlerin ise sabit eksen takımında veya ona paralel bir eksen takımında yazılması gerekmektedir. Bunun için kullanılacak dönüşüm matrisi,  $k_i$  bacağına bağlanan üniversal mafsalsın sabit dönme eksenini doğrultusu olmak üzere:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_i &= \mathbf{s}_i ; \\ \hat{\mathbf{y}}_i &= (\mathbf{k}_i \times \mathbf{s}_i) / \|\mathbf{k}_i \times \mathbf{s}_i\| ; \\ \hat{\mathbf{z}}_i &= \hat{\mathbf{x}}_i \times \hat{\mathbf{y}}_i \end{aligned} \quad (6)$$

$$\mathbf{T}_i = [\hat{\mathbf{x}}_i \quad \hat{\mathbf{y}}_i \quad \hat{\mathbf{z}}_i] \quad (7)$$

şeklinde seçilebilir. Bundan sonra, kendi eksen takımında verilen ayağın alt ve üst kısımlarının ağırlık merkezi koordinat vektörleri ve atalet momentleri:

$$\mathbf{r}_{di} = \mathbf{T}_i \mathbf{r}_{di0}, \quad (8)$$

$$\mathbf{r}_{ui} = \mathbf{T}_i (\mathbf{v}_i + \mathbf{r}_{ui0}) \quad (9)$$

$$\mathbf{v}_i = [L_i \quad 0 \quad 0]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{I}_{di} = \mathbf{T}_i \mathbf{I}_{di0} \mathbf{T}_i^T, \quad (11)$$

$$\mathbf{I}_{ui} = \mathbf{T}_i [\mathbf{I}_{ui0} + m_{ui} L_i^2 \mathbf{diag}(0 \ 1 \ 1)] \mathbf{T}_i^T \quad (12)$$

şeklinde yazılabilir. Bacağın alt ve üst kısmı arasındaki hız ve bacağına ait açılma hızı aşağıda verilmiştir:

$$\dot{L}_i = \mathbf{s}_i \cdot \dot{\mathbf{S}}_i, \quad (13)$$

$$\mathbf{W}_i = \mathbf{s}_i \times \dot{\mathbf{S}}_i / L_i \quad (14)$$

### İvme Analizi

Ayağın üst platforma bağlandığı noktanın ivmesini, ayağa ait  $S$  vektörü ifadesinden:

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{S}}_i &= \ddot{L}_i \mathbf{s}_i + 2 \mathbf{W}_i \times \dot{L}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{A}_i \times \mathbf{S}_i \\ &\quad + \mathbf{W}_i \times (\mathbf{W}_i \times \mathbf{S}_i) \end{aligned} \quad (15)$$

şeklinde veya üst platforma ait  $S$  vektörü ifadesinden:

$$\ddot{\mathbf{S}}_i = \mathbf{a}_{pi} + \mathbf{U}_{li} \quad (16)$$

$$\mathbf{a}_{pi} = \ddot{\mathbf{t}} + \boldsymbol{\alpha} \times \mathbf{q}_i \quad (17)$$

$$\mathbf{U}_{li} = \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{q}_i) \quad (18)$$

şeklinde yazabiliriz. Yukarıdaki ifadelerde bacağına açılma ivmesini gösteren  $A$  ve bacağına iki parçası arasındaki kayma hareketinin ivmesini gösteren  $\ddot{L}$ 'ye ait ifadeleri (15)ve (16) nolu denklemlerden yararlanarak:

$$\ddot{L}_i = \mathbf{s}_i \cdot \mathbf{a}_{pi} + u_i \quad (19)$$

$$u_i = \mathbf{s}_i \cdot \mathbf{U}_{li} - \mathbf{s}_i \cdot (\mathbf{W}_i \times \{\mathbf{W}_i \times \mathbf{S}_i\}) \quad (20)$$

$$\mathbf{A}_i = \frac{1}{L_i} (\mathbf{s}_i \times \mathbf{a}_{Pi}) + \mathbf{U}_{2i} \quad (21)$$

$$\mathbf{U}_{2i} = \frac{1}{L_i} (\{\mathbf{s}_i \times \mathbf{U}_{1i}\} - 2\dot{L}_i \mathbf{W}_i) \quad (22)$$

şeklinde elde edebiliriz. Bacağın alt kısmının sadece dönme ve üst kısmının hem dönme hem de öteleme hareketi yaptığı göz önüne alınırsa, alt ve üst kısmın ağırlık merkezlerinin ivme ifadeleri  $\mathbf{a}_d$  ve  $\mathbf{a}_u$  sırasıyla:

$$\mathbf{a}_{di} = \frac{1}{L_i} (\mathbf{s}_i \times \mathbf{a}_{Pi}) \times \mathbf{r}_{di} + \mathbf{U}_{3i} \quad (23)$$

$$\mathbf{a}_{Ui} = (\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{a}_{Pi}) \mathbf{s}_i + \frac{1}{L_i} (\mathbf{s}_i \times \mathbf{a}_{Pi}) \times \mathbf{r}_{Ui} + \mathbf{U}_{4i} \quad (24)$$

$$\mathbf{U}_{3i} = \mathbf{U}_{2i} \times \mathbf{r}_{di} + \mathbf{W}_i \times (\mathbf{W}_i \times \mathbf{r}_{di}) \quad (25)$$

$$\mathbf{U}_{4i} = u_i \mathbf{s}_i + \mathbf{U}_{2i} \times \mathbf{r}_{ui} + \mathbf{W}_i \times (\mathbf{W}_i \times \mathbf{r}_{ui}) + 2\dot{L}_i \mathbf{W}_i \times \mathbf{s}_i \quad (26)$$

şeklinde yazılabilir.

### Dinamik Denklemlerin Türetilmesi

İkişerli gruplanmış bacakların hareketli parçalarına ait kuvvet dengesini, parçaların ivmesiz hareket yaptığını kabul ederek aşağıdaki gibi yazabiliriz (Şekil 2):

$$\mathbf{F}_i - m_{Ui} \mathbf{g} \cdot \mathbf{s}_i - C_p \dot{L}_i - \mathbf{F}_{Si} + (-1)^i \mathbf{F}_{Li} \cdot \mathbf{s}_i = 0 \quad (27)$$

Burada,

$\mathbf{F}_{Li}$  = birleştirilen bacakların birbirine uyguladıkları kuvvetler

$\mathbf{F}_i$  = pistonu uygulanan basınç

$\mathbf{F}_{S1,2}$  = bacaklara üst platformun uyguladığı kuvvet

$C_p L_{1,2}$  = prizmatik mafsalları sebebiyle bacaklara uygulanan kuvvet

olarak tanımlanmıştır. Bacağın bütünü için alt bağlantı noktasına göre Newton-Euler formülasyonunu kullanarak moment dengesini yazalım:

$$\begin{aligned} m_{di} \mathbf{r}_{di} \times \mathbf{a}_{di} + m_{Ui} \mathbf{r}_{Ui} \times \mathbf{a}_{Ui} + (I_{di} + I_{Ui}) \mathbf{A}_i \\ + \mathbf{W}_i \times (I_{di} + I_{Ui}) \mathbf{W}_i = (m_{di} \mathbf{r}_{di} + m_{ui} \mathbf{r}_{ui}) \times \mathbf{g} \\ + \mathbf{S}_i \times (\mathbf{F}_{Si} + (-1)^{i+1} \mathbf{F}_i) + \mathbf{M}_{Ui} \\ + \mathbf{M}_{UTi} \cdot \mathbf{s}_i + C_{Ui} \mathbf{W}_i \end{aligned} \quad (28)$$

Burada,

$\mathbf{M}_{ui}$  = platforma bağlantı noktasındaki döner mafsalları sebebiyle oluşan moment

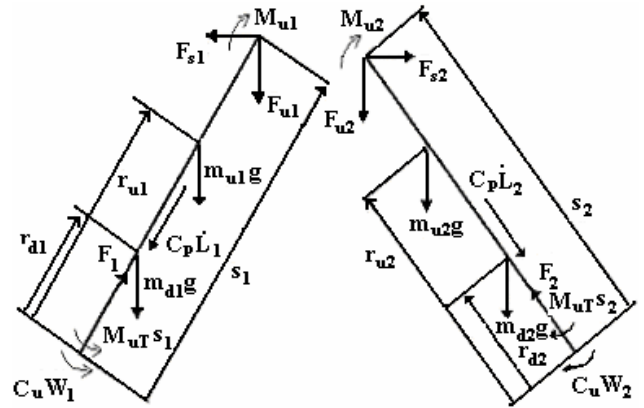
$C_u \mathbf{W}_{1,2}$  = üniversal mafsalları viskoz sürtünmesinden oluşan reaksiyon kuvveti

$\mathbf{M}_{Uti}$  = bacakların kendi eksenini etrafında dönmemesi sonucu oluşan moment

$\mathbf{A}_{1,2}$  = bacakların açısal ivmesi

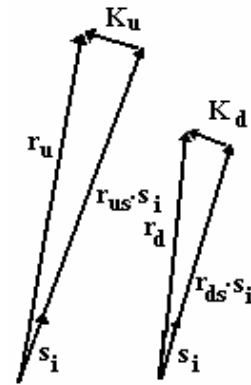
$\mathbf{W}_{1,2}$  = bacakların açısal hızı

olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. Ayak çiftlerine uygulanan tüm kuvvet ve momentler

Bacakların alt kısımları üniversal mafsalla bağlı olduğu için ağırlık merkezini gösteren vektörleri aşağıdaki gibi belirleyebiliriz (Şekil 3).



Şekil 3. Bacakların alt ve üst kısımlarının ağırlık merkezleri ( $r_d$ ,  $r_u$ ) ve bacak birim vektörü ( $s_i$ )

$$\mathbf{r}_{dsi} = \mathbf{r}_{di} \cdot \mathbf{s}_i \quad (29)$$

$$\mathbf{r}_{usi} = \mathbf{r}_{ui} \cdot \mathbf{s}_i \quad (30)$$

$$\mathbf{K}_{di} = \mathbf{r}_{di} - \mathbf{r}_{dsi} \mathbf{s}_i \quad (31)$$

$$\mathbf{K}_{U_i} = \mathbf{r}_{U_i} - \mathbf{r}_{U_i} \mathbf{s}_i \quad (32)$$

Yukarıda verilen tüm tanımlamaları kullanarak ve aşağıdaki sadeleştirmeleri yaparak:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_i = & \left[ \mathbf{E}_3 \right] - \left[ \mathbf{s}_i \mathbf{s}_i^T \right] \left[ \frac{m_{d1} (\mathbf{r}_{dSi})^2 + m_{U1} (\mathbf{r}_{USi})^2}{L_i^2} \right] \\ & + \left[ \mathbf{K}_{di} \mathbf{K}_{di}^T \right] \left[ \frac{m_{di}}{L_i^2} \right] + \left[ \mathbf{K}_{Ui} \mathbf{K}_{Ui}^T \right] \left[ \frac{m_{Ui}}{L_i^2} \right] \\ & + \left[ \mathbf{K}_{Ui} \mathbf{s}_i^T \right] \left[ \frac{m_{Ui}}{L_i} \right] + \frac{1}{L_i^2} \left[ \tilde{\mathbf{s}}_i (I_{di} + I_{Ui}) \tilde{\mathbf{s}}_i \right] \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{5i} = & m_{di} \mathbf{r}_{di} \times \mathbf{U}_{3i} + m_{Ui} \mathbf{r}_{Ui} \times \mathbf{U}_{4i} \\ & + (\mathbf{I}_{di} + \mathbf{I}_{Ui}) \mathbf{U}_{2i} + \mathbf{W}_i \times (\mathbf{I}_{di} + \mathbf{I}_{Ui}) \mathbf{W}_i \\ & - (m_{di} \mathbf{r}_{di} + m_{Ui} \mathbf{r}_{Ui}) \times \mathbf{g} + C_U \mathbf{W}_i \end{aligned} \quad (34)$$

$$\mathbf{V}_{5i} = [C_p \dot{L}_i + m_{Ui} \mathbf{g} \cdot \mathbf{s}_i] \mathbf{s}_i + \frac{\mathbf{U}_{5i} \times \mathbf{s}_i}{L_i} \quad (35)$$

$$\tilde{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} 0 & -s_z & s_y \\ s_z & 0 & -s_x \\ -s_y & s_x & 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

bacakların üst platforma uyguladıkları tepki kuvvetini:

$$\mathbf{F}_{Si} = [\mathbf{Q}_i] \mathbf{a}_p + \mathbf{V}_{5i} - \mathbf{s}_i \mathbf{F}_i \quad (37)$$

şeklinde ifade edebiliriz.

### Hareketli Üst Platforma Ait Denklemler

Üst platform için kuvvet ve moment dengesi yazalım (Şekil 4):

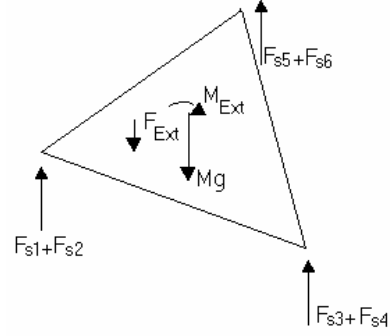
$$\mathbf{Mg} + \mathbf{R} \mathbf{F}_{Ext} - \sum_{i=1}^6 \mathbf{F}_{Si} - \mathbf{M} \mathbf{a} = 0 \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M} \mathbf{R}_p \times \mathbf{a} + \mathbf{I}_p \alpha + \omega \times (\mathbf{I}_p \omega) = \\ \sum_{i=1}^6 \mathbf{q}_i \times \mathbf{F}_{Si} + \mathbf{Mg} + \sum_{i=1}^3 M_{fi} + \mathbf{R} \mathbf{M}_{Ext} \end{aligned} \quad (39)$$

(38) ve (39) ifadelerindeki denklemler birleştirilir ve durum denklemi tarzında ifade edilir ise:

$$\mathbf{J} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{t}} \\ \alpha \end{bmatrix} + \boldsymbol{\eta} = \mathbf{H} \mathbf{F} + \begin{bmatrix} \mathbf{R} \mathbf{F}_{ext} \\ \mathbf{R} \mathbf{M}_{ext} \end{bmatrix} \quad (40)$$

denklemlerini elde ederiz.



Şekil. 4. Hareketli üst platforma uygulanan kuvvetler ve momentler

### Simülasyon ve Kontrol

Dinamik modeli ayrıntılı bir şekilde elde edilen sistemin simülasyonu, Matlab paket programındaki 4-5 derece Runge-Kutta metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bugüne kadar yapılan birçok çalışmada olduğu gibi üst platformun konumunu ve yönelmesinin belirlenmesi, ayak uzunluklarının ölçümlerine dayanılarak gerçekleştirilmiştir. Lineer sensörler kullanılarak elde edilen bu ölçümler, doğru bir konum ve yönelmeyi simüle etmek için kinematik denklemlerde kullanılır. Bu çalışmada bacak uzunluklarının ölçüldüğü kabul edilmiştir. Bu bilinen değerlerin kullanılmasıyla ayaklardaki pistonlara uygulanması gereken  $F_i$  kuvvetleri:

$$F_i = (K_p)_i \{ (L_i)_0 - L_i \} - (K_d)_i \dot{L}_i \quad (41)$$

şeklinde geliştirilen bir PD algoritmasıyla belirlenmektedir. Burada  $K_p$  orantı katsayısı ve  $K_d$  türev katsayısıdır.

Dinamik sistemin simülasyonu, başlangıç değerleri  $\dot{t}_0, \dot{\theta}_0, t_0, \theta_0, L_0$ , istenen bacak uzunlukları  $(L_i)_d$ , zaman adımı  $h=0.001$  s ve  $(K_p)_i = 18809$ ,  $(K_d)_i = 1379$  olmak üzere 1000 adım için Şekil 5'te sunulmuştur.

$$t_0 = [0.01 \ 0.01 \ 1]^T$$

$$\dot{t}_0 = [0.01 \ 0.01 \ 0.01]^T$$

$$\theta_0 = [0.01 \ 0.01 \ 0.01]^T$$

$$\dot{\theta}_0 = [0.001 \ 0.001 \ 0.001]^T$$

$$(L_i)_0 = [1.8 \ 1.8 \ 1.8 \ 1.8 \ 1.8 \ 1.8]^T$$

$$(L_i)_d = [2.5 \ 2.5 \ 2.5 \ 2.5 \ 2.5 \ 2.5]^T$$

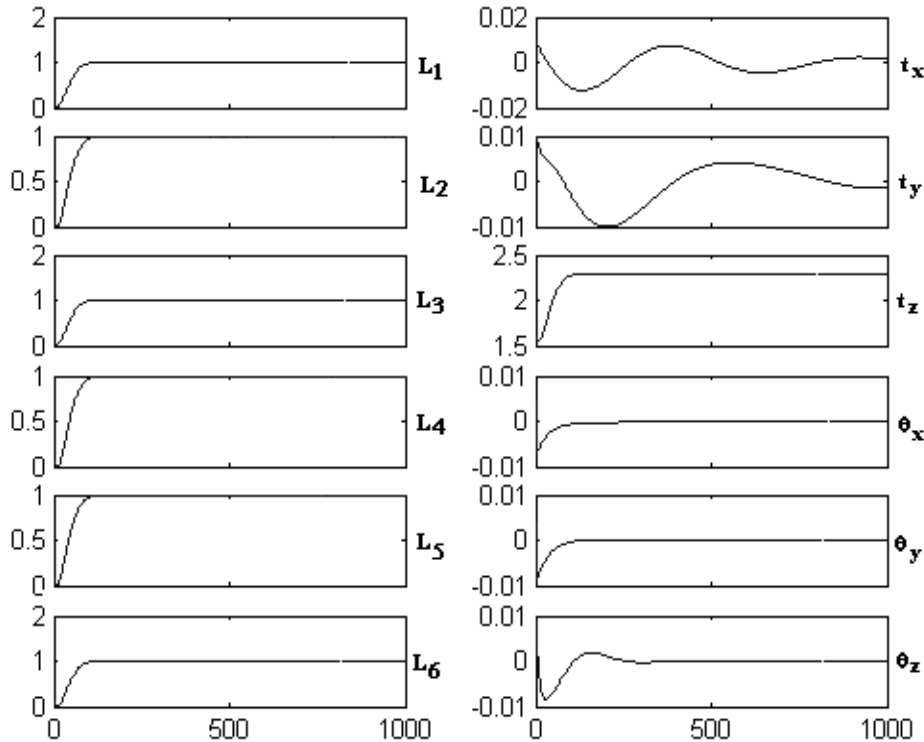
Her bir ayağın geometrik ve yapısal özellikleri aynı olduğundan bacaklardaki pistonu kontrol etmek için seçilen PD katsayıları birbiriyle aynı olacaktır. Burada yapılan kabule göre genetik algoritmalar kullanılarak yapılan optimizasyon işlemi tek bir  $K_p$  ve  $K_d$  değeri için yapılmıştır. Daha hızlı ve efektif bir algoritma elde etmek için seçilen uygunluk fonksiyonunda simüle edilen sistemin basamak cevabından elde edilen maksimum aşım ( $M_a$ ), yerleşme zamanı ( $T_s$ ) ve kalıcı durum hatası ( $e_{ss}$ ) bağımsız değişkenler olarak kullanılmaktadır.

$$f = \frac{1}{M_a + T_s + e_{ss}} \quad (42)$$

Yukarıda bahsedilen bu değerlerin hesaplanması için sistemin simülasyonu her bir gen için tekrar çalıştırılmıştır. Her bir popülasyonda 30 gen olmak üzere 20 popülasyon oluşturulmuştur. Çaprazlama olasılığı 0.8, mutasyon olasılığı 0.002, turnuva olasılığı 0.7, ve mutasyon ölçeği 0.1 olarak seçilmiştir.

## Sonuçlar

Buraya kadar bahsedilenleri kısaca bir özetlersek, göz önüne alınan uçuş simülörünün tasarımı, pilota gerçekçi bir uçuşu yaşatmak üzere, disiplinler arası koordineli bir çalışmayı gerektiren bir aktivitedir. Bu tasarımı gerçekleştirebilmek için dinamik denklemler ayrıntılı bir şekilde çıkarılmıştır. Uygulanan kuvvetler ve momentlere göre konum ve yönelmedeki doğruluğu elde etmek üzere hareketli platformu kontrol etmek için bacak uzunluklarına dayanan PD algoritması geliştirilmiştir. Böylece yüksek performanslı bir sistem elde edilmiştir. Bunu sağlamak için GA'daki seçilen uygunluk fonksiyonu, maksimum aşım, yerleşme zamanı ve kalıcı durum hatasını içermektedir. Elde edilen sistemin performansı literatürdeki sonuçlarla karşılaştırıldığında üç kat daha iyi bir sonuç elde edilmiştir.



Şekil 5. İncelenen dinamik sisteme ait üst platformun konumunu, yönelmesini ve bacak uzunluklarını gösteren simülasyon sonuçları

Tablo 1. Literatürdeki çalışmalarla incelenen sistemin performansının karşılaştırılması

SİSTEM PERFORMANSI	Literatürdeki çalışma (Dasgupta and Mruthyunjaya, 1998)	GA kullanılarak optimize edilen PD katsayıları ile elde edilen sistem performansı
Yerleşme Zamanı (s) L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> ,.....L <sub>6</sub>	0.2670	0.0940
	0.2760	0.0980
	0.2740	0.0970
	0.2560	0.1070
	0.3820	0.1060
Maksimum Aşım (%) L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> ,.....L <sub>6</sub>	0.2870	0.0990
	8.59	0.49
	7.11	0.23
	7.01	0.45
	5.73	0
Kalıcı Durum Hatası (%) L <sub>1</sub> ,L <sub>2</sub> ,.....L <sub>6</sub>	6.87	0
	6.79	0.85
	2.78	0.83
	3.61	0.86
	2.64	0.63
	1.84	0.57
	2.54	0.71
	2.71	0.69

## Ekler

### Platforma ait tanımlamalar

Alt Platform köşe noktaları

$$[b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5 \ b_6] = \begin{bmatrix} -0.2601 & -1.8599 & 2.6378 & 1.5286 & -1.9714 & -0.0988 \\ -2.0131 & -0.8129 & -0.5563 & -2.2206 & 2.4084 & 3.1108 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ [m]}$$

Üst platform köşe noktaları (Sabit referans eksen takımında)

$$[p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6] = \begin{bmatrix} -1.0 & -1.0 & 2.0 & 2.0 & -1.0 & -1.0 \\ -1.333 & -1.333 & -1.333 & -1.333 & 2.666 & 2.666 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ [m]}$$

Üniversal mafsalmın sabit eksenini yöündeki birim vektörler

$$[k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5 \ k_6] = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.6 & 0.3512 & 0.3512 & -0.8321 & -0.8321 \\ 0.8 & 0.8 & -0.9363 & -0.9363 & 0.5546 & 0.5546 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ [m]}$$

Ayakların alt ve üst parçalarının ve üst platformun atalet matrisleri

$$I_{p0} = \begin{bmatrix} 0.050 & 0.003 & 0.004 \\ 0.003 & 0.040 & 0.003 \\ 0.004 & 0.003 & 0.1 \end{bmatrix} \quad I_{u0} = \begin{bmatrix} 0.005 & 0.002 & 0.002 \\ 0.002 & 0.002 & 0.001 \\ 0.002 & 0.001 & 0.003 \end{bmatrix} \quad I_{d0} = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.005 & 0.007 \\ 0.005 & 0.002 & 0.003 \\ 0.007 & 0.003 & 0.001 \end{bmatrix}$$

Küresel, üniversal ve prizmatik mafsallara ait viskoz sürtünme katsayıları  
C<sub>u</sub> = 0.0001, C<sub>p</sub> = 0.001, C<sub>s</sub> = 0.0002,



## Kaynaklar

- Advani, S. K., Nahon M. A., Haeck N. ve Albronda, J., (1999). Optimization of six Degrees-of-freedom Motion Systems for Flight Simulators, *Journal of Aircraft*, **36**, 5, 819-826.
- Dasgupta, D. ve Mruthyunjaya, T. S., (1998a). Closed-form dynamic equations of the general Stewart platform through the Newton-Euler approach, *Mechanism and Machine Theory*, **33**, 993-1012.
- Dasgupta, D. ve Mruthyunjaya, T. S., (1998b). A Newton-Euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator, *Mechanism and Machine Theory*, **33**, 1135-1152.
- Lebret, G., Lui, K. ve Lewis, F. L., (1993). Dynamic analysis and control of a Stewart platform manipulator, *Journal of Robotic Systems*, **10**, 629-655.
- Lee, J. D. ve Geng, Z., (1993), A Dynamical Model of a Flexible Stewart Platform, *Computer and Structures*, **48**, 3, 367-374.
- Lee, K. ve Shah, D., (1988). Dynamic analysis of a three-degrees-of-freedom in parallel actuated manipulator, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **4**, 361-367.
- Liu, M., Li, C. X. ve Li, C. N., (2000). Dynamic analysis of the Gough-Stewart platform manipulator, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **16**, 94-98.
- Pang, H. ve Shahinpoor, M., (1994). Inverse Dynamics of a Parallel Manipulator, *Journal of Robotic Systems*, **11**, 8, 693-702.
- Reid, L. D. ve Nahon, M. A., (1988). Response of airline pilots to variations in flight simulator motion Algorithm, *Journal of Aircraft*, **25**, 7, 639-646.
- Stewart, D., (1965-66). A Platform with six degrees of freedom, *Proceedings Institution of Mechanical Engineers*, **180**, 371-386.
- Tsai, L-W, (2000). Solving the inverse dynamics of a Stewart-Gough manipulator by the principle of virtual work, *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, **122**, 1, 3-9.
- Wang, J. ve Gosselin, C. M., (1998). A New Approach for the Dynamic Analysis of parallel Manipulators, *Multibody System Dynamics*, **2**, 317-334.
- Yurt, S. N. ve Ozkol, I., (2001). A Study on the Dynamic Analysis and Control of 6-3 Stewart Platform Mechanism, *ELECO 2001 Second International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, November, 317-321.

