

Emre Uzunođlu

İYTE Modelleme ve
Prototipleme Laboratuvarı

emreuzuno@gmail.com

Endüstriyel Uygulamalarda Kullanılan Yüksek İvmeli Çalışan Paralel Robotların Konumlama Hassasiyetinin Artırılmasına Yönelik Yöntemler Çalıştayı

İçerik

Birinci Kısım:

Kinematik artıksıllık ile denetleme metodları
Makro-mikro manipölatör ile uygulaması

İkinci Kısım:

Dinamik model benzetimi ve simölasyon ile dođrulaması
Dinamik model ile denetleyici tasarımı
Denetleyicilerin simölasyon ortamında test edilmesi



Makro-Mikro Manipülasyon için Denetleyici

Kinematik artıksılıktan faydalanarak makro-mikro sistem için denetleyicinin tasarlanması.

Objektifler:

Birincil öncelikli görev:

- Uç noktası konumu izlemesi

İkincil öncelikli görev:

- İvmelerin makro ve mikro sisteme dağılımı
- Çalışma uzayı ihlallerinin engellenmesi

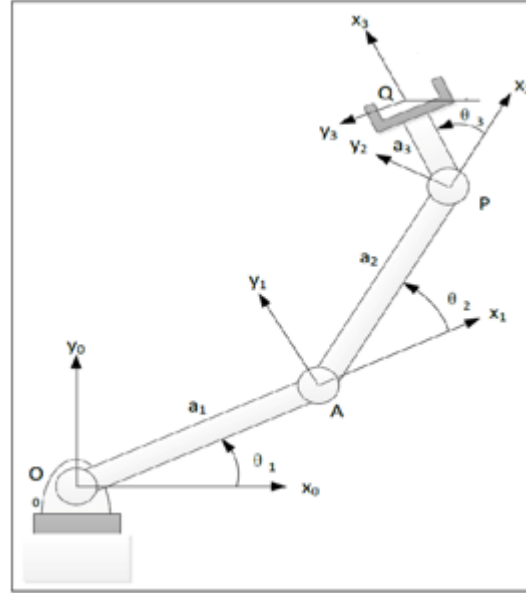
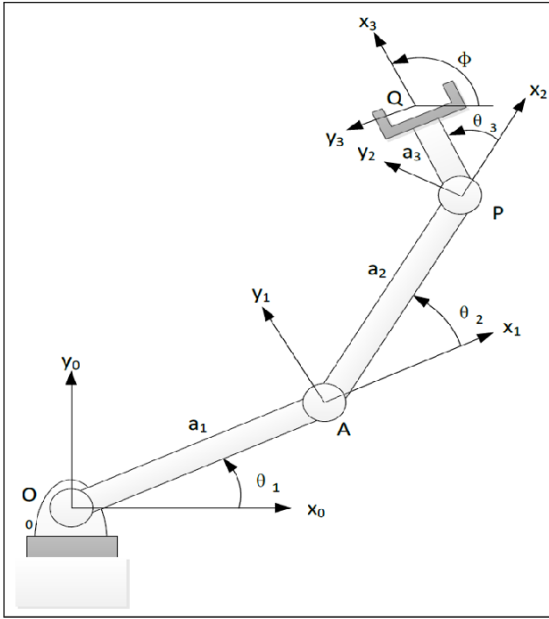
Kinematik Artıksılık

$$r = f(q)$$

Mafsal Uzayı $R^n \rightarrow R^m$ Çalışma Uzayı

Eğer $n > m$ ise manipülatör kinematik olarak artıksıldır

Bir görevi gerçekleştirmek için gerekli olandan daha yüksek serbestlik derecesine sahipse



3 serbestlik dereceli düzlemsel manipülatör çalışma uzayı seçimine göre artıksıl olarak kullanılabilir.

Makro-mikro Manipülatörler

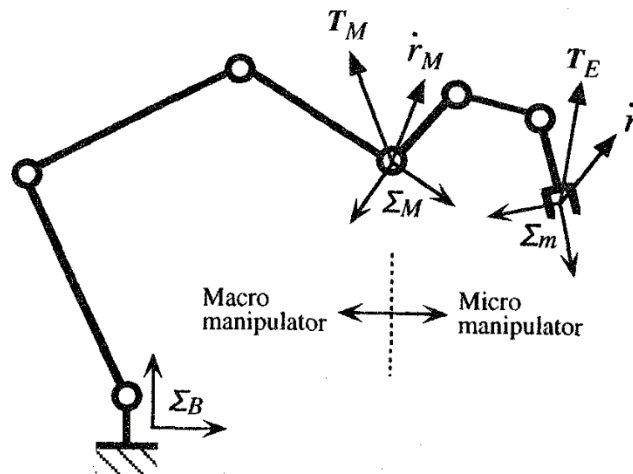
- Farklı avantajlara sahip kinematik olarak farklı mekanizmalar ile benzersiz bir kinematik artıksılık türü tasarlanabilir.

Makro Manipülatör

Çalışma alanı

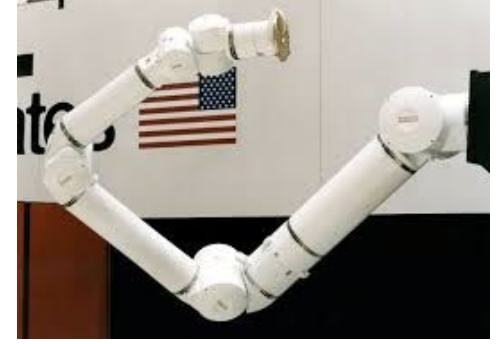
Mikro Manipülatör

Düşük atalet



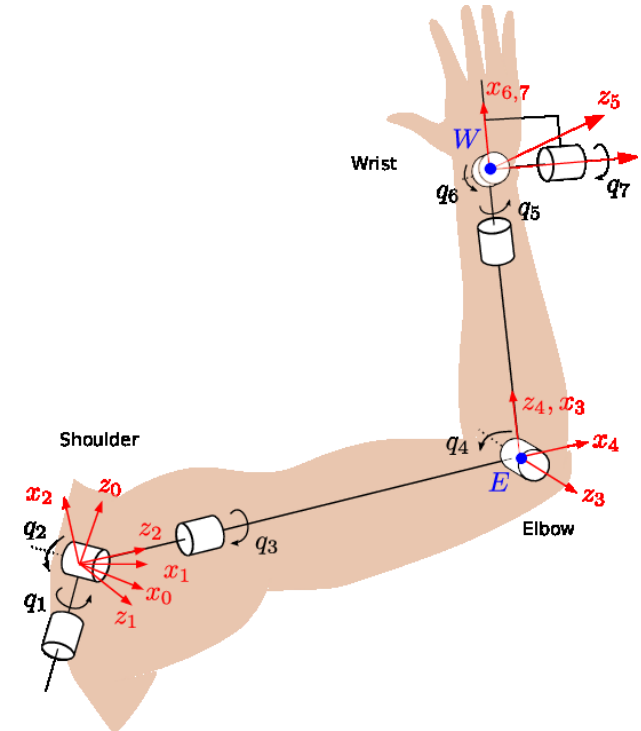
Kinematik artıksıllık:

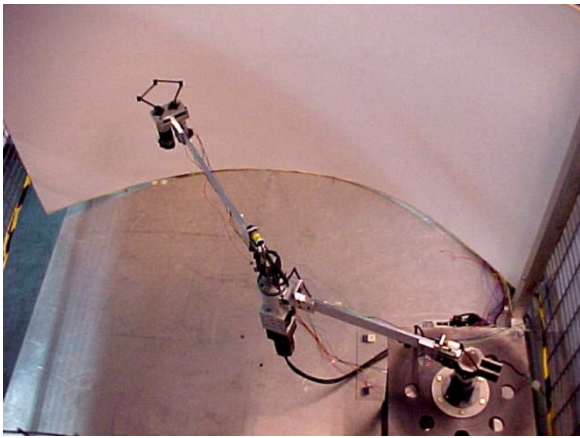
- Mafsal hızları minimizasyonu [1]
- Manipulasyon yeteneği (manipulability) [2]
- Objelerden kaçınma [3]
- Kinematik tekilliklerden kaçınma [4]
- Mafsal limitlerinden kaçınma [5]
- Enerji tüketimi minimizasyonu [6]



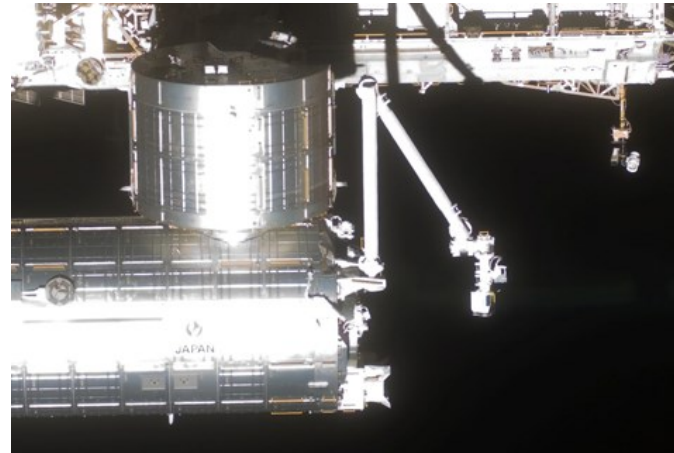
Makro-mikro yapıdaki artıksıl manipülatörler iki farklı manipülatörün farklı yapıdaki özelliklerinden faydalanmak için kullanılabilir:

- Uç noktası konumlama hassasiyet artırma
- Uç noktası kuvvet hassasiyetini artırma

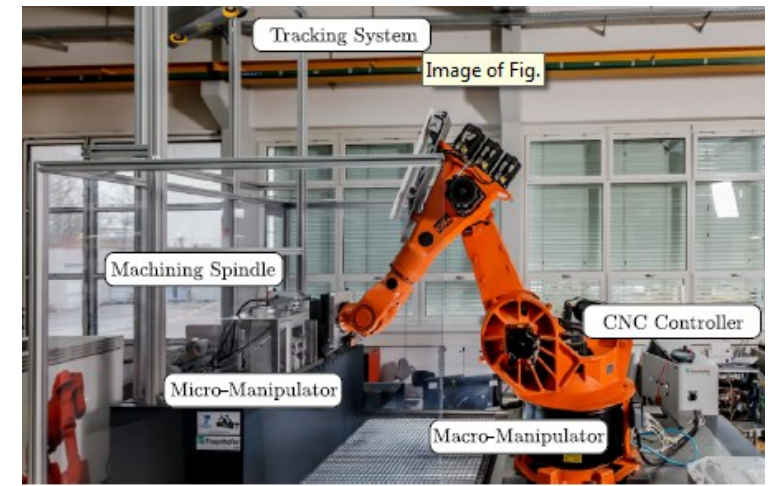




Dynamic Compensation Control of Flexible Macro-Micro Manipulator Systems (2010)



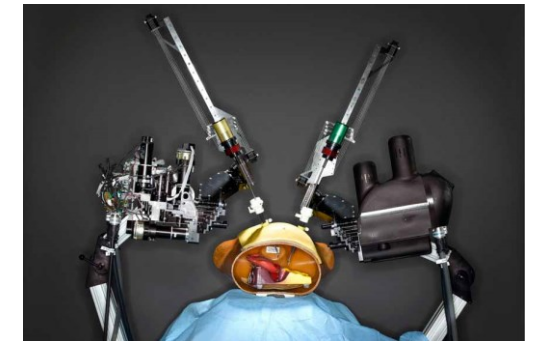
Japanese Experiment Module Remote Manipulator System (JEMRMS).



Improving Robotic Machining Accuracy through Experimental Error Investigation and Modular Compensation (2012)



Micro/Macro Approach for Dexterity Enhancement of PKM's (2002)

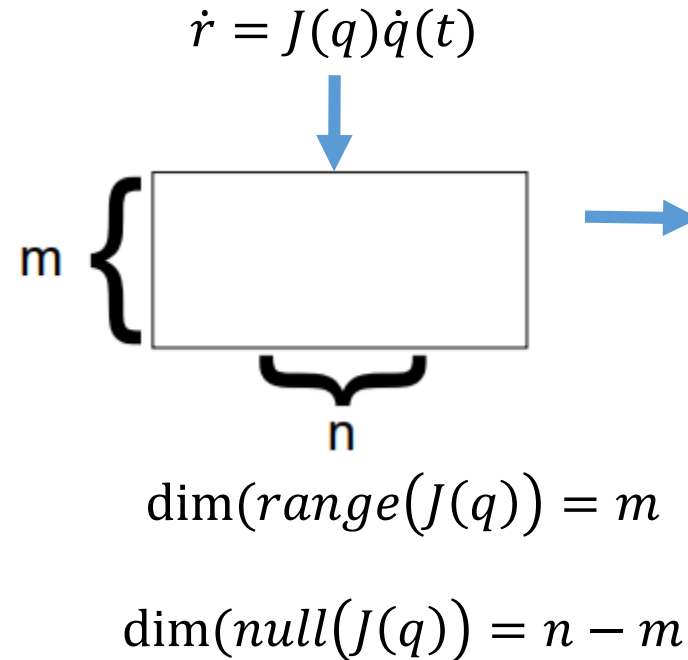


C-arm RAVEN Surgical robot (2008)

$$f(r(t)) = q(t)$$

Artıksılık ile oluşan ters kinematik problemi:

- Hız seviyesinde kinematik denklem
- Sonsuz çözüm



Ters çözümü için metotlar

- Eniyileme
- Genelleştirilmiş Jakobi çözümü
- Eklemeli Jakobi çözümü

Sıfır Uzayı Çözümü

$$\dot{q} = \boxed{\dot{q}^*} + N\dot{q}_0$$



Mafsal hızlarında optimizasyon

$$g(\dot{q}) = \frac{1}{2} \|\dot{q}\|^2 \quad \dot{r} = J\dot{q}^*$$

Modifiye edilmiş optimizasyon

$$g(\dot{q}, \lambda) = \frac{1}{2} \|\dot{q}\|^2 + \lambda^T (\dot{r} - J\dot{q})$$

$$\frac{\partial g}{\partial \dot{q}} = 0 \quad \frac{\partial g}{\partial \lambda} = 0$$



$$\dot{q} - J^T \lambda = 0$$



$$\dot{r} - J\dot{q} = 0$$



$$\dot{r} = J^T \lambda$$



$$(JJ^T)^{-1} \dot{r} = \lambda$$

$$\dot{q} = J^T (JJ^T)^{-1} \dot{r}$$

$$\dot{q} = J^+ \dot{r}$$

(Moore Penrose) Sözdde ters,
Genelleştirilmiş ters matris

$$JJ^+ = I$$

$$\dot{r} = J(q)\dot{q}$$

$$\dot{q} = \dot{q}^* + N\dot{q}_0$$

N: Projeksiyon matrisi

\dot{q}_0 : Rastgele seçilmiş çözüm

\dot{q}^* : Çözüm

$$J\dot{q} = J\dot{q}^* + JN\dot{q}_0$$

$$\dot{r} = J\dot{q}^*$$

$$\dot{q} = \dot{q}^* + \mathbf{N}\dot{q}_0$$

$$g^*(\dot{q}) = \frac{1}{2} \|\dot{q} - \dot{q}_0\|^2$$

$$\dot{q} = J^T (JJ^T)^{-1} \dot{r}$$



$$\dot{q} = J^+ \dot{r} + (I - J^+ J) \dot{q}_0$$



Uç noktası hareketleri



İçsel hareketleri



\dot{q}_0 tasarlanmalı

$$\dot{q} = (J^+ \dot{r} + (I - J^+ J) \dot{q}_0)$$

$$\dot{r} = J \dot{q} + J(I - J^T (JJ^T)^{-1} J) \dot{q}_0$$

$$\dot{r} = J \dot{q} + \underbrace{(J - (JJ^T)(JJ^T)^{-1} J)}_{0} \dot{q}_0$$

0

İvme seviyesinde genelleştirilmiş
Jakobi çözümü

$$\dot{r} = J(q)\dot{q}$$

$$\ddot{r} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q}$$

$$\ddot{r} = \ddot{x} + \dot{J}(q)\dot{q}$$

$$\ddot{q} = J^+ \ddot{x} + (I - J^+ J)\ddot{q}_0$$

\dot{q}_0 için bir method:

$$\dot{q}_0 = K \left(\frac{\partial H(q)}{\partial q} \right)^T$$

$H(q)$ için yerel maksimumuna ulaşmak amaçlanmaktadır

$$H(q) = \sqrt{\det(JJ^T)} \quad \text{Manipüle edilebilirlik}$$

$$H(q) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i - \bar{q}_i}{q_i^+ - q_i^-} \right)^2 \quad \text{Mafsal limitlerinden kaçınma}$$

$$H(q) = \min \|r'(q) - o(x, y)\| \quad \text{Objeden kaçınma}$$

Eklemeli Jakobi Çözümü

$$r = f(q) \quad \text{Ana görev}$$

$$y = h(q) \quad \text{Yardımcı görev}$$

$$\dot{r}_* = \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \frac{\partial h}{\partial q} \end{bmatrix} \dot{q} = J_A(q) \dot{q}$$

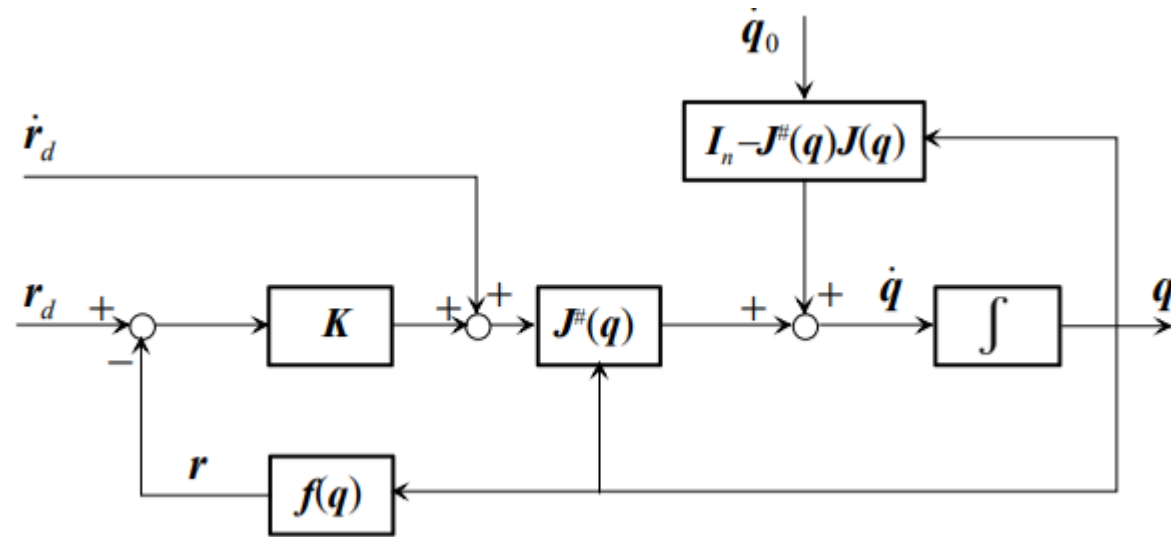
$$J_A(q)^{-1} \dot{r}_* = \dot{q}$$

Yeni tekilliklere sebep olabilir.

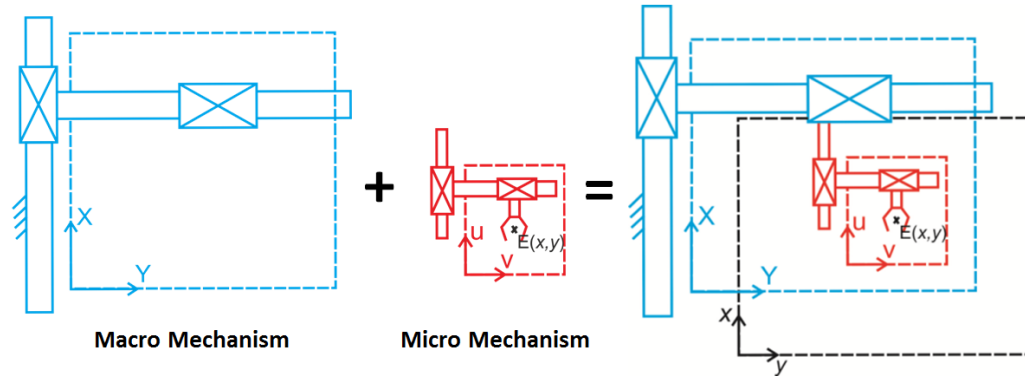
Kinematik Denetim

$$r = f(q)$$

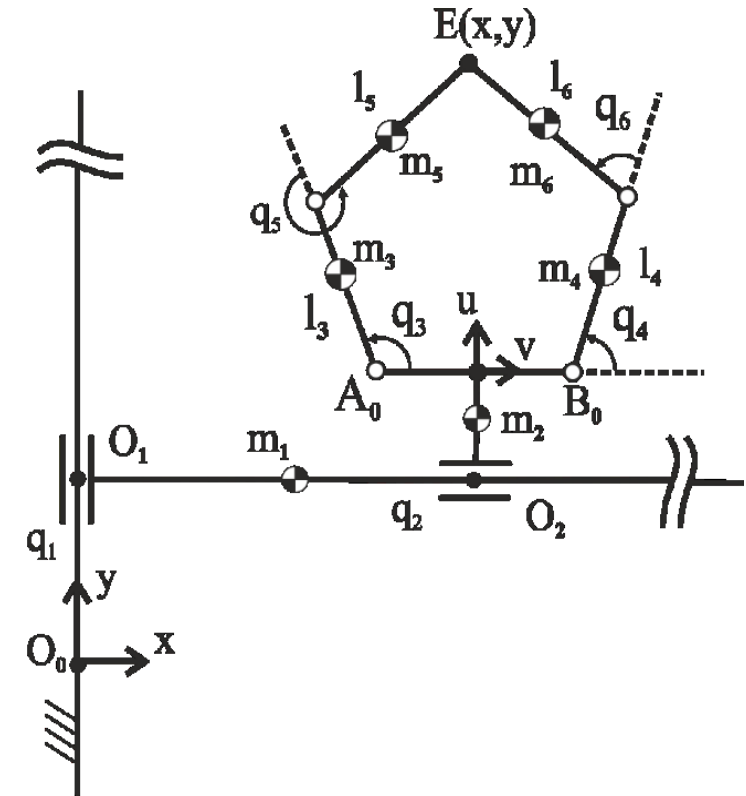
$$\dot{q} = J^+(\dot{r}_d + K(r_d - r)) + (I - J^+J)\dot{q}_0$$



Makro-Mikro Manipülatör



- Makro sistemin ivme limiti $1g$
- Mikro sistem daha yüksek ivmelere çıkabiliyor fakat çalışma uzayı kısıtlı



Makro-Mikro Manipülatör

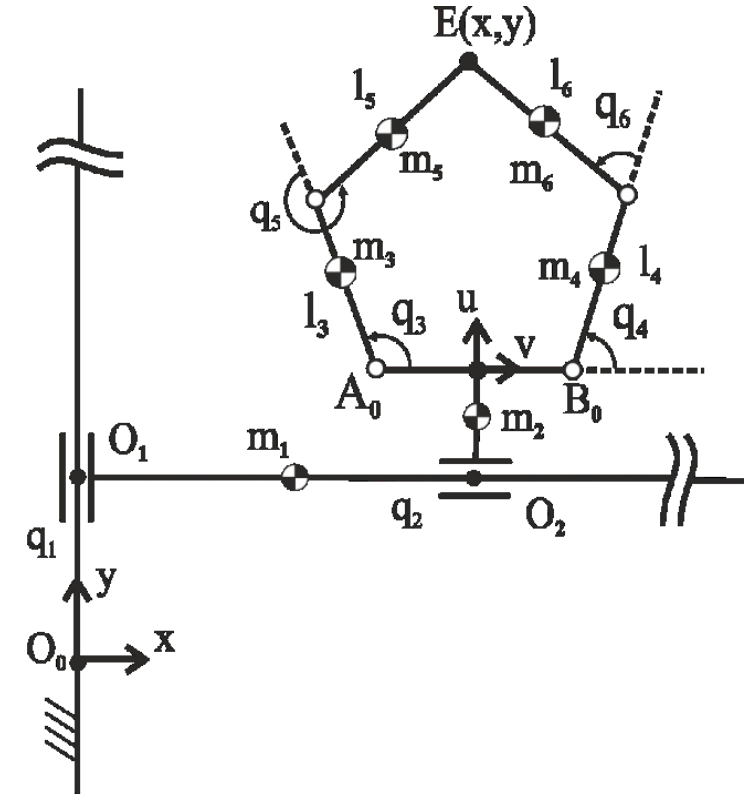
	Link length/maximum travel distance (mm)	Center of Mass (mm)	Mass (kg)	Moment of Inertia about the z-axis (kgmm ²)
Link 1	1500 (max)	750.2	422.49	1020718.61
Link 2	1000 (max)	100	29.87	36363.92
Link3/ Link4	150	80.35	3.40	1800.02
Link 5/Link 6	150	82.66	3.91	1312.99

İşlemin gerçekleşmesi için birincil öncelikli görev:

- Uç noktası konumu izlemesi

Sistem ivmesini arttırabilmek için ikincil öncelikli görevler

- İvmelerin makro ve mikro sisteme dağılımı
- Çalışma uzayı ihlallerinin engellenmesi



Denetleyici

- Hesaplmalı tork methodu
- Hsu, Mauser and Sastry (1989) [7]

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}') \{ \boldsymbol{J}^+ (\ddot{\boldsymbol{X}}_d + \boldsymbol{K}_v \dot{\boldsymbol{e}} + \boldsymbol{K}_p \boldsymbol{e} - \dot{\boldsymbol{J}} \dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{\phi}_N \} + \boldsymbol{N}(\boldsymbol{q}', \dot{\boldsymbol{q}}')$$

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{X}_d - \boldsymbol{X}, \dot{\boldsymbol{e}} = \dot{\boldsymbol{X}}_d - \dot{\boldsymbol{X}}$$

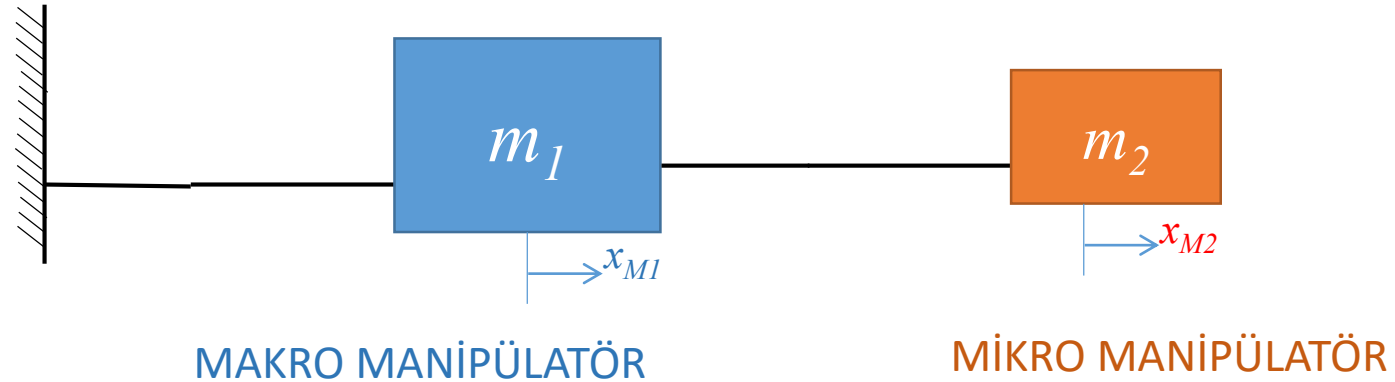
$\boldsymbol{\phi}_N \in \mathbb{R}^4$ Jakobi matrisinin bu uzaya projeksiyonu ile yaratılan isterleri kapsar

$$\boldsymbol{\phi}_N = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}^+ \boldsymbol{J}) \ddot{\boldsymbol{\theta}}$$

İkincil Seviye Denetleyici

- Sadeghian H, Villani L, Keshmiri M and Siciliano B (2011) Multi-priority control in redundant robotic systems. In: 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011, pp. 3752-3757. IEEE.
- Platt RJr, Abdallah ME and Wampler C (2010) Multi-Priority Cartesian Impedance Control. In: Robotics: Science and Systems. Zaragoza, Spain, 27-30 June, 2010.

İkinci Seviye Denetleyici: İvme isterleri

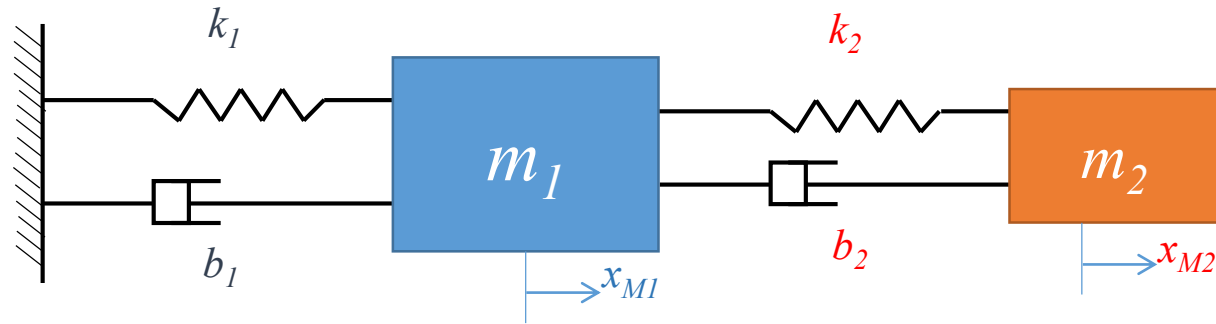


$$\ddot{\mathbf{x}}_{Md} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{M1d} \\ \ddot{y}_{M1d} \\ \ddot{x}_{M2d} \\ \ddot{y}_{M2d} \end{bmatrix}$$

$$\ddot{x}_{M1d} = \begin{cases} \ddot{x}_{sat}^+ & \ddot{x}_d \geq \ddot{x}_{sat}^+ \\ \ddot{x}_{sat}^- & \ddot{x}_d \leq \ddot{x}_{sat}^- \\ \ddot{x}_d & \text{else} \end{cases}, \ddot{y}_{M1d} = \begin{cases} \ddot{y}_{sat}^+ & \ddot{y}_d \geq \ddot{y}_{sat}^+ \\ \ddot{y}_{sat}^- & \ddot{y}_d \leq \ddot{y}_{sat}^- \\ \ddot{y}_d & \text{else} \end{cases}$$

$$\ddot{x}_{M2d} = \begin{cases} \ddot{x}_d - \ddot{x}_{sat}^+ & \ddot{x}_d \geq \ddot{x}_{sat}^+ \\ \ddot{x}_d - \ddot{x}_{sat}^- & \ddot{x}_d \leq \ddot{x}_{sat}^- \\ 0 & \text{else} \end{cases}, \ddot{y}_{M2d} = \begin{cases} \ddot{x}_d - \ddot{y}_{sat}^+ & \ddot{x}_d \geq \ddot{y}_{sat}^+ \\ \ddot{x}_d - \ddot{y}_{sat}^- & \ddot{x}_d \leq \ddot{y}_{sat}^- \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

İkinci Seviye Denetleyici: Sanal Dinamik



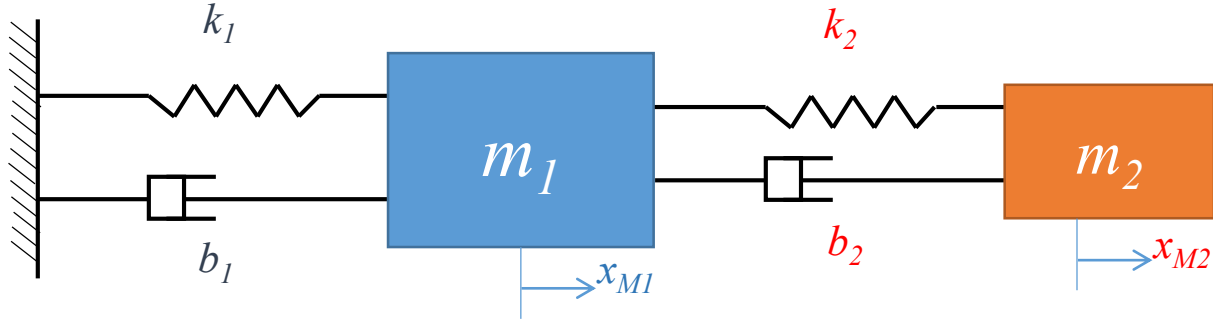
$$\mathbf{M}_d \ddot{\tilde{\mathbf{X}}} + \mathbf{B}_d \dot{\tilde{\mathbf{X}}} + \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{X}} - \mathbf{F}_e = 0$$

$$\mathbf{M}_d = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_d = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_d = \begin{bmatrix} b_1 + b_2 & -b_2 \\ -b_2 & b_2 \end{bmatrix}$$

Sanal Dinamiğin Entegrasyonu



$$\mathbf{M}_d \ddot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{B}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$$

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_{Md} - \mathbf{x}_M, \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \dot{\mathbf{x}}_{Md} - \dot{\mathbf{x}}_M, \ddot{\tilde{\mathbf{x}}} = \ddot{\mathbf{x}}_{Md} - \ddot{\mathbf{x}}_M$$

$$\ddot{\mathbf{x}}_M = \ddot{\mathbf{x}}_{Md} + \mathbf{M}_d^{-1} [(\mathbf{B}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}})]$$

$$\ddot{\mathbf{x}}_M = \mathbf{J}_s \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \dot{\mathbf{J}}_s \dot{\boldsymbol{\theta}}$$

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}_s^{-1} \{ \ddot{\mathbf{x}}_{Md} + \mathbf{M}_d^{-1} [(\mathbf{B}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{K}_d \tilde{\mathbf{x}})] - \dot{\mathbf{J}}_s \dot{\boldsymbol{\theta}} \}$$

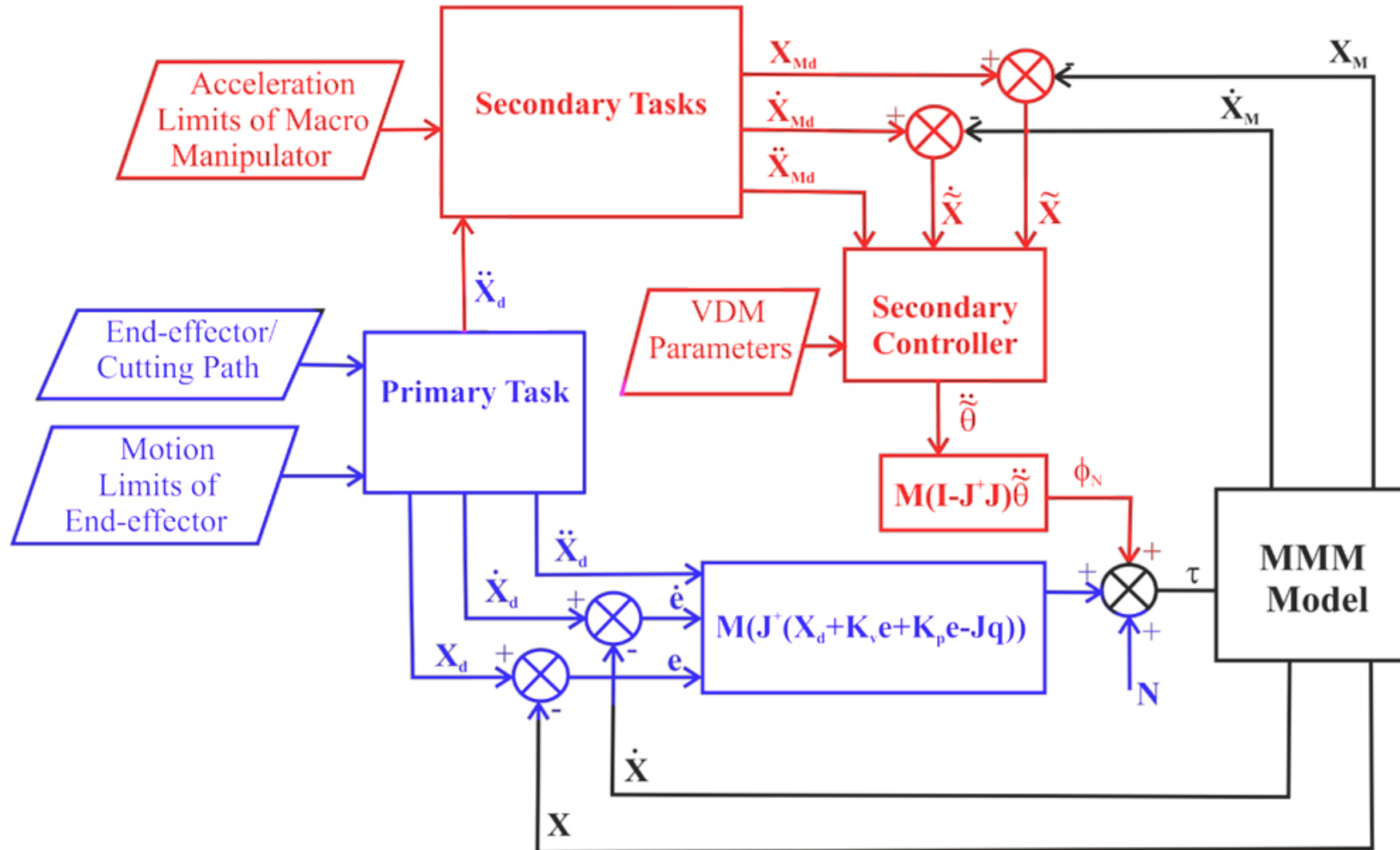
$$\boldsymbol{\phi}_N = (\mathbf{I} - \dot{\mathbf{J}}^+ \mathbf{J}) \boldsymbol{\theta}$$

$$\ddot{x}_{M1d} = \begin{cases} \ddot{x}_{sat}^+ & \ddot{x}_d \geq \ddot{x}_{sat}^+ \\ \ddot{x}_{sat}^- & \ddot{x}_d \leq \ddot{x}_{sat}^- \\ \ddot{x}_d & \text{else} \end{cases}, \ddot{y}_{M1d} = \begin{cases} \ddot{y}_{sat}^+ & \ddot{y}_d \geq \ddot{y}_{sat}^+ \\ \ddot{y}_{sat}^- & \ddot{y}_d \leq \ddot{y}_{sat}^- \\ \ddot{y}_d & \text{else} \end{cases}$$

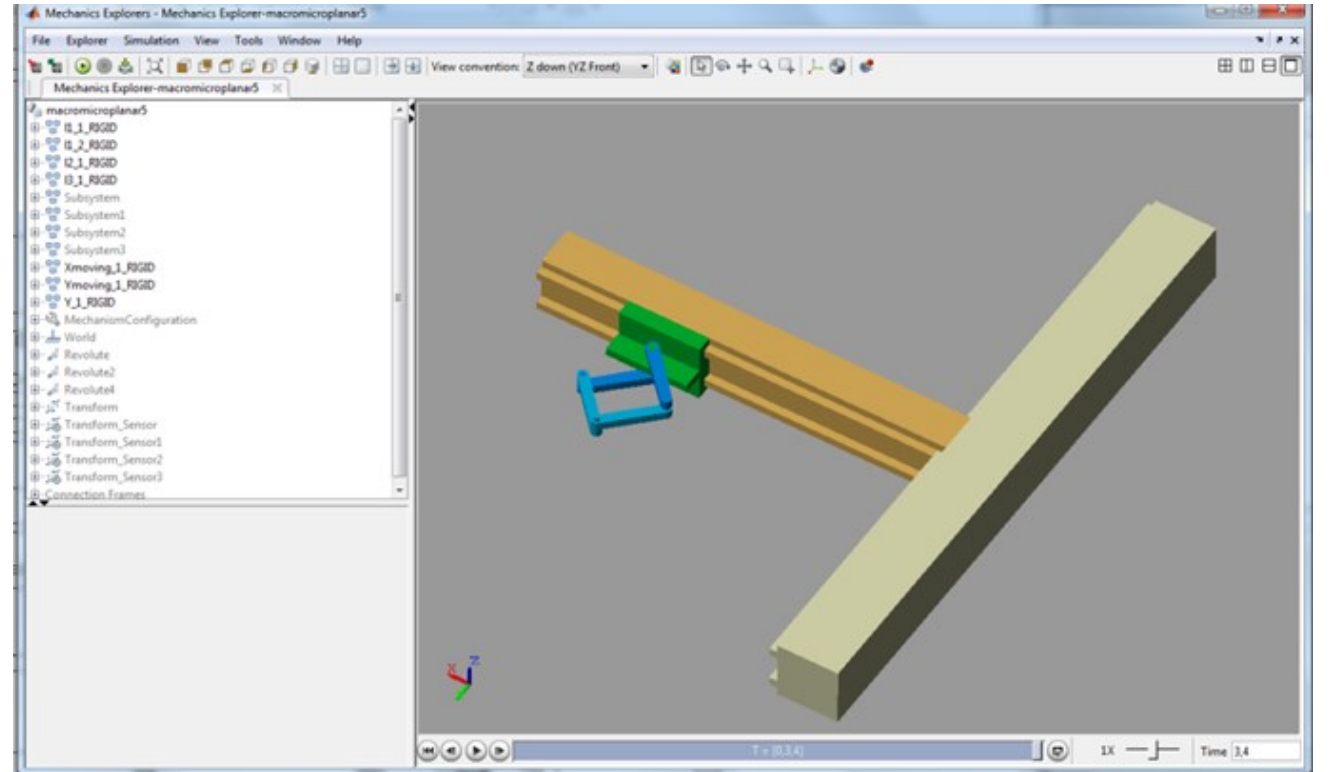
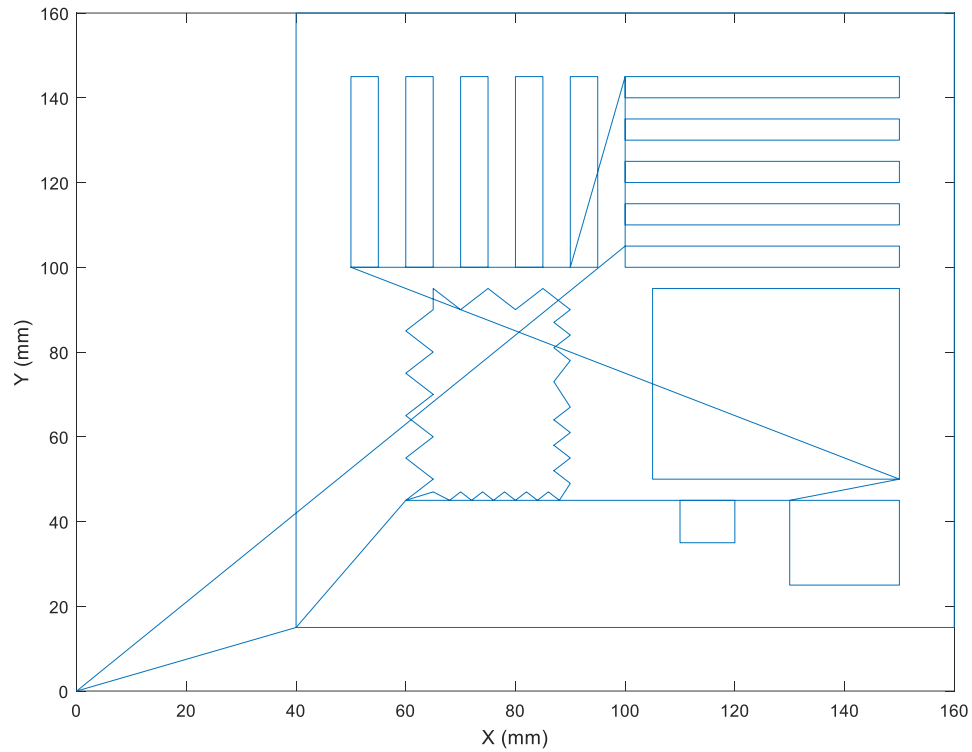
$$\ddot{x}_{M2d} = \begin{cases} \ddot{x}_d - \ddot{x}_{sat}^+ & \ddot{x}_d \geq \ddot{x}_{sat}^+ \\ \ddot{x}_d - \ddot{x}_{sat}^- & \ddot{x}_d \leq \ddot{x}_{sat}^- \\ 0 & \text{else} \end{cases}, \ddot{y}_{M2d} = \begin{cases} \ddot{x}_d - \ddot{y}_{sat}^+ & \ddot{x}_d \geq \ddot{y}_{sat}^+ \\ \ddot{x}_d - \ddot{y}_{sat}^- & \ddot{x}_d \leq \ddot{y}_{sat}^- \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

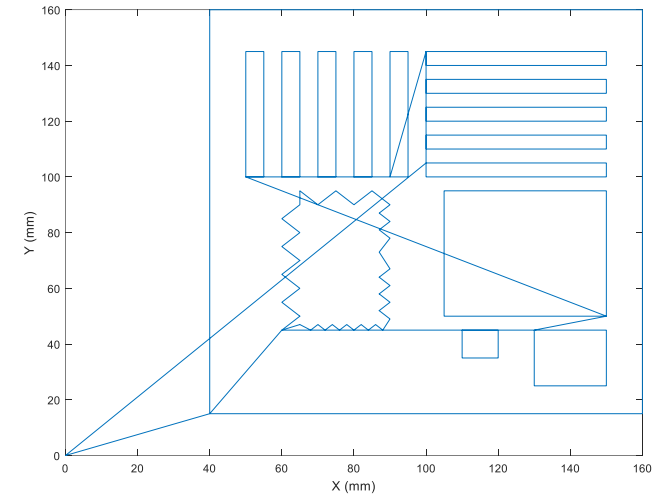
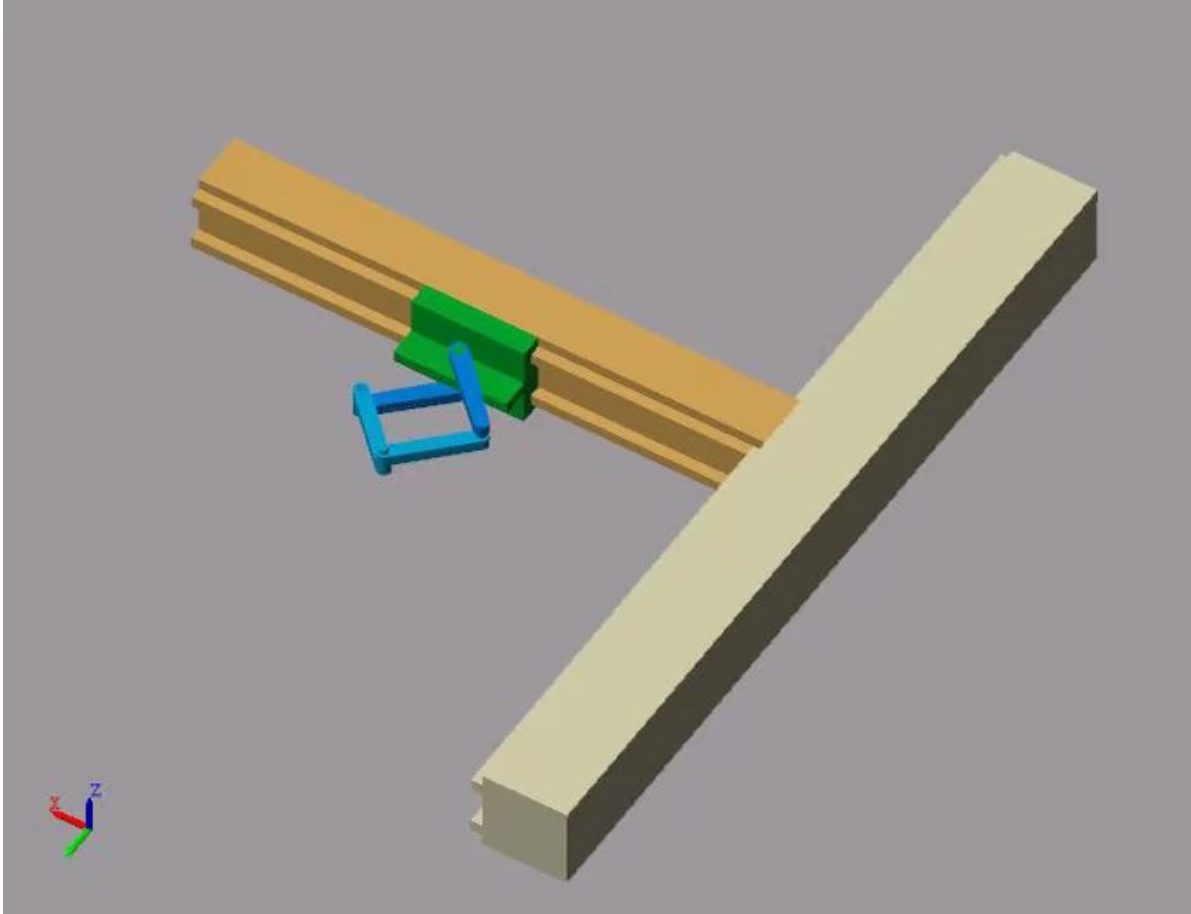
$$\ddot{\mathbf{x}}_{Md} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{M1d} \\ \ddot{y}_{M1d} \\ \ddot{x}_{M2d} \\ \ddot{y}_{M2d} \end{bmatrix}$$

Denetim Şeması

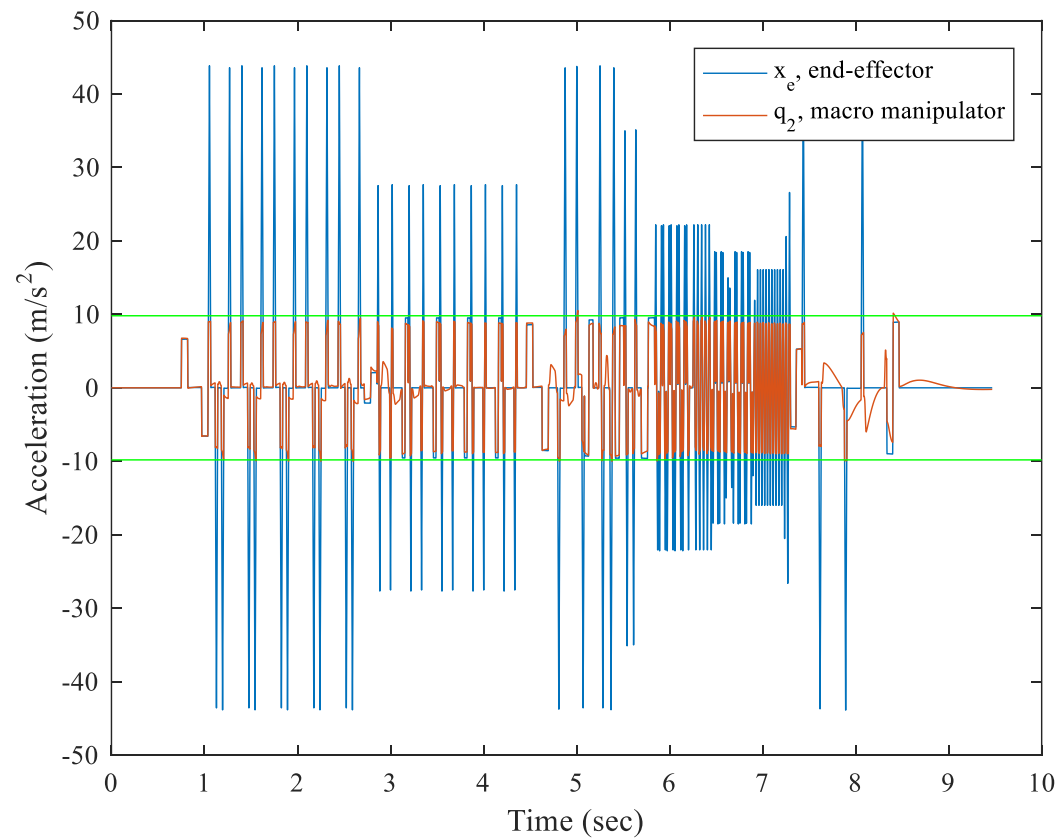
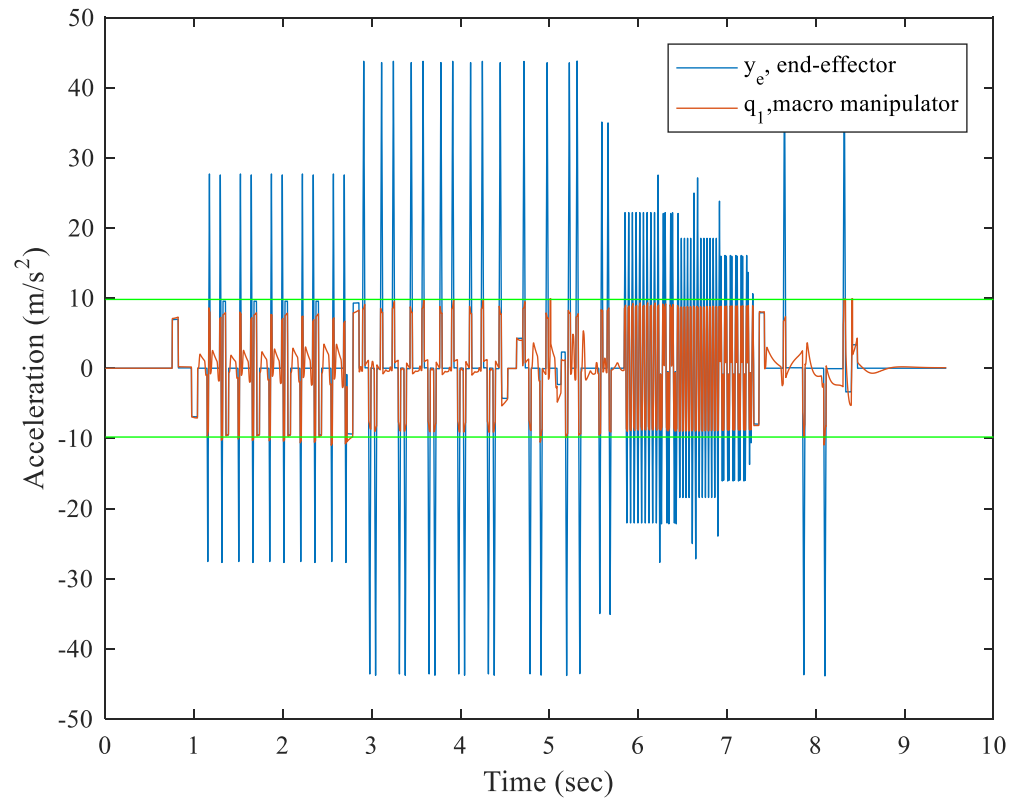


Dinamik Simülasyon ile doğrulama



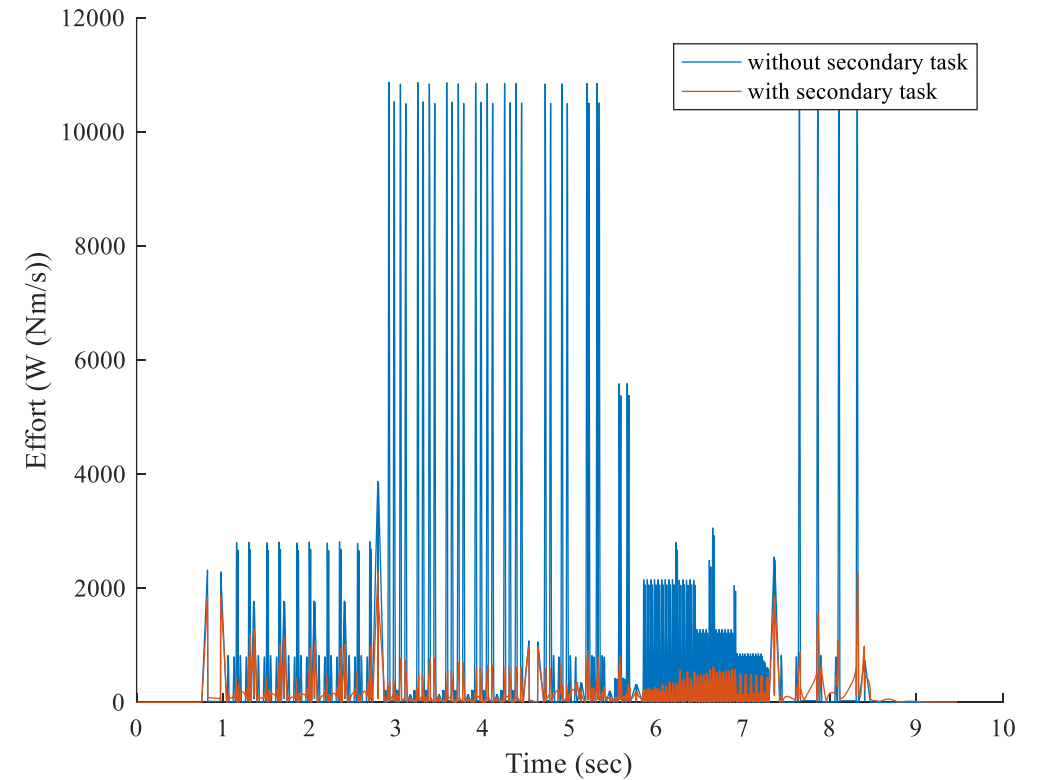


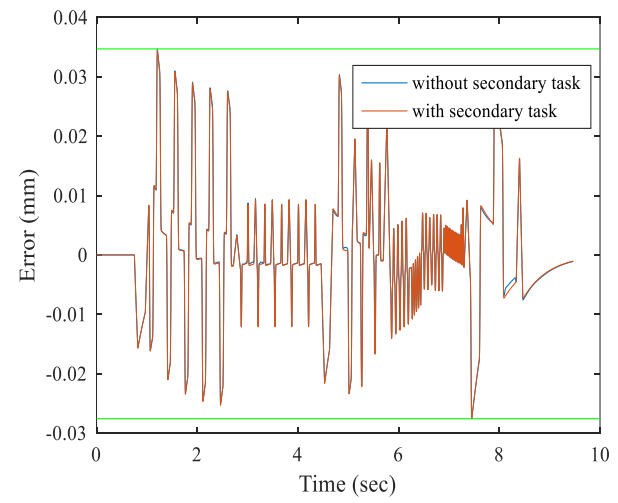
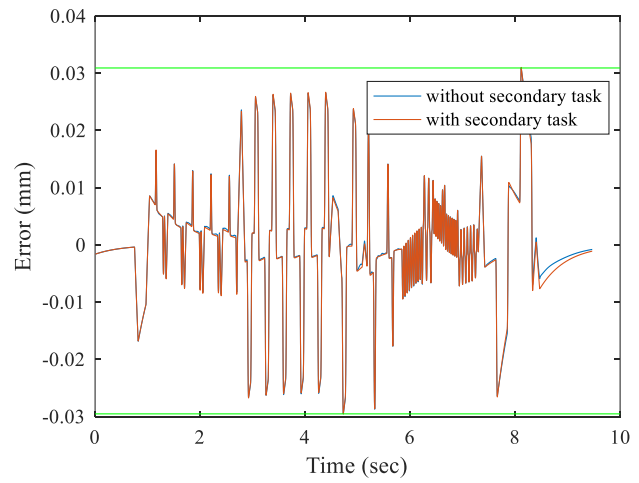
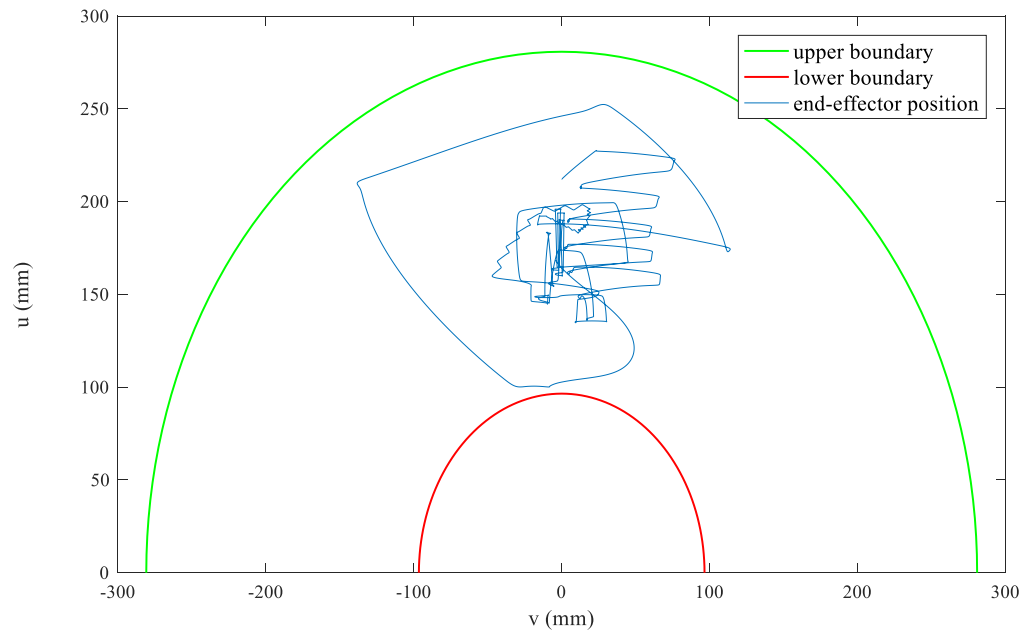
35.93% zaman kazanımı



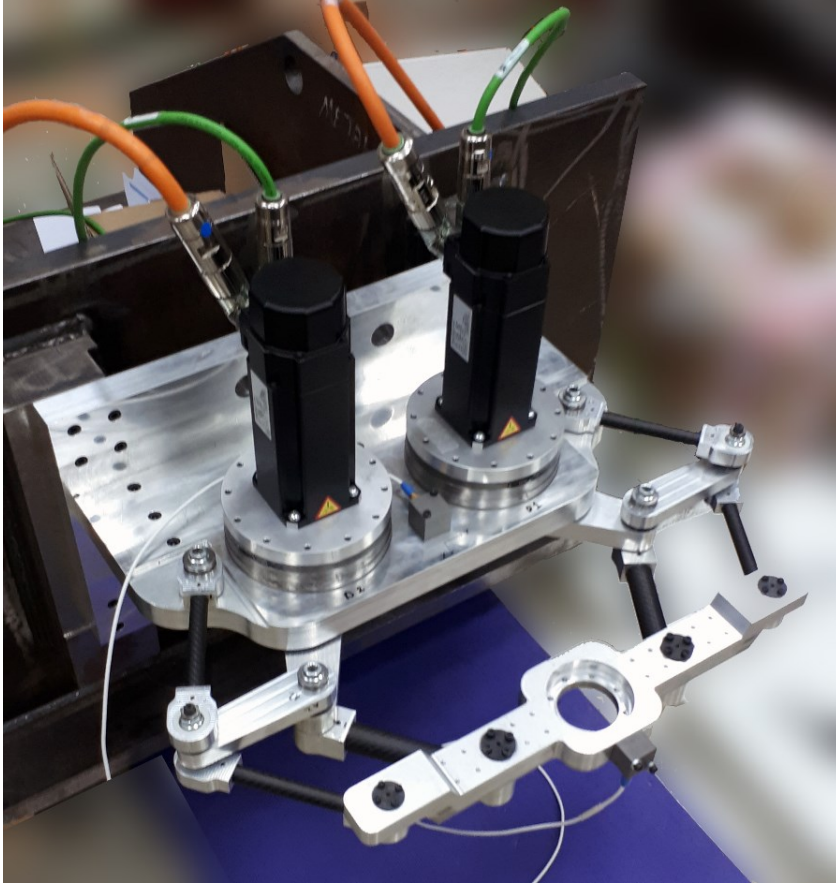
Toplam harcanan enerji

- MMM: 2397.82 J
- Sadece Makro ile: 8118.56 J



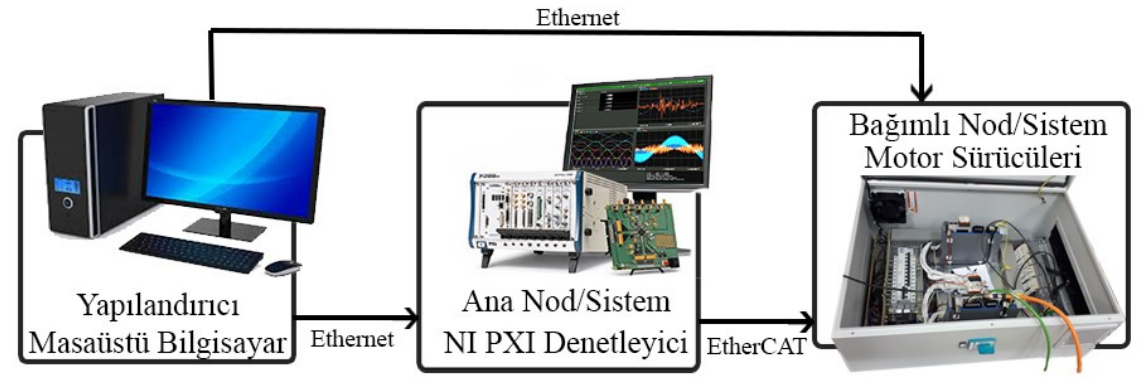


Denetleyici Sistem

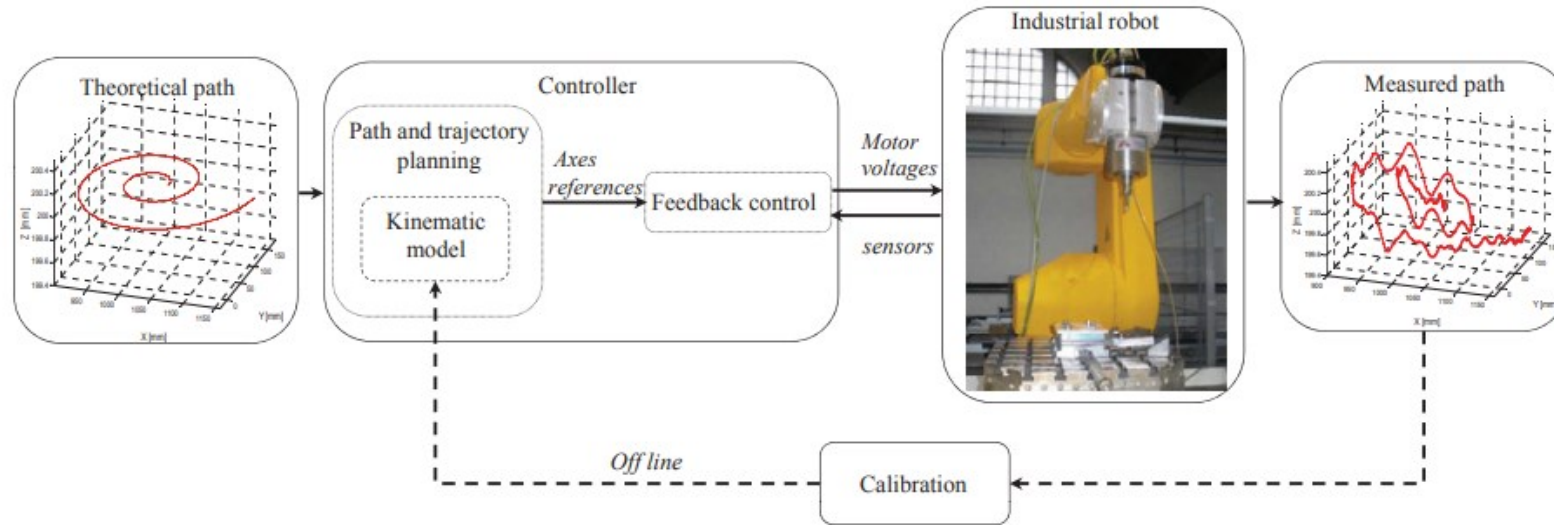


Yüksek ivmeli hareketler için uç noktası hassasiyetinin artırılması

- Direngenlik modeli destekli algoritmalar
- Doğrusal olmayan denetleyiciler
- Bozucu etkilere karşı denetleyiciler



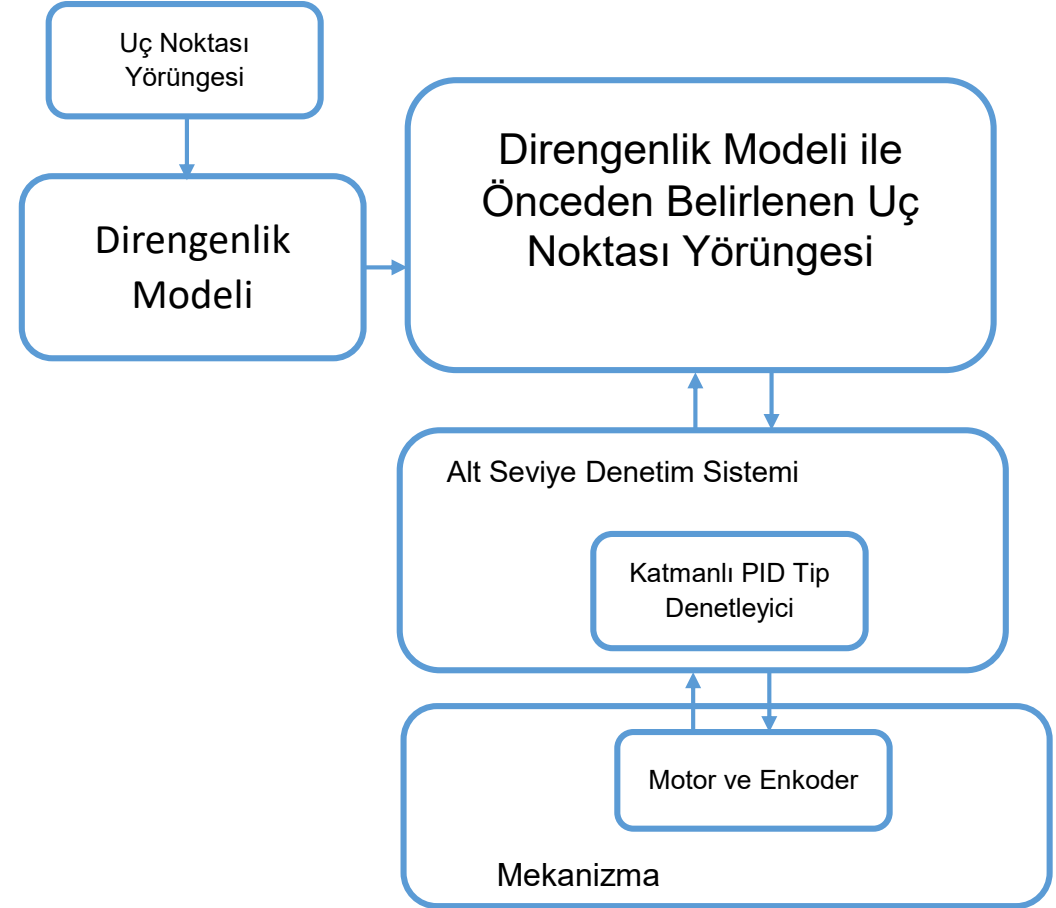
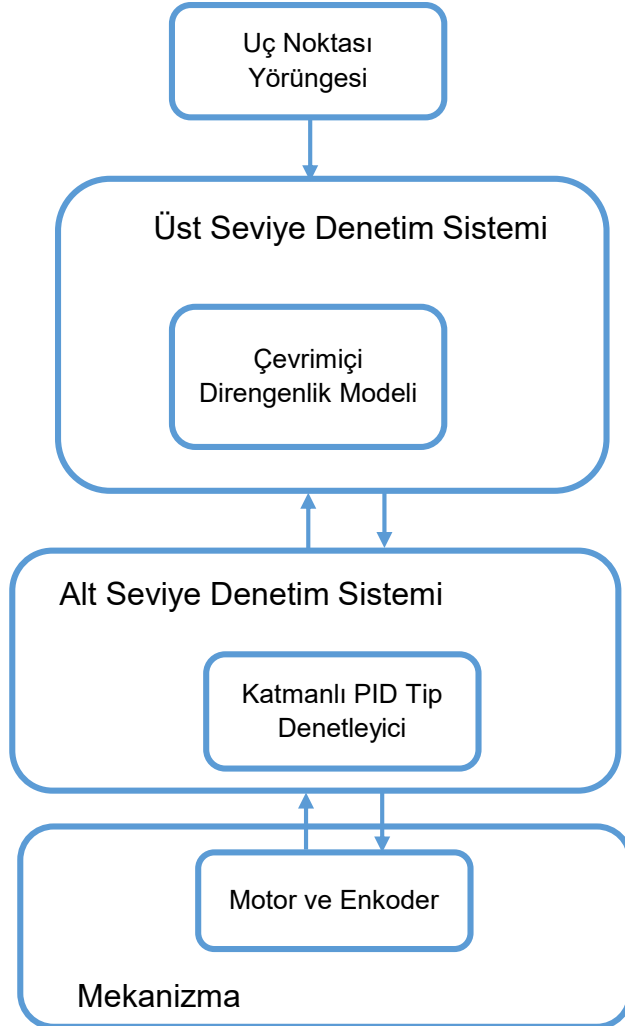
Denetleyici Alternatifleri: Esneklik ile Başetme



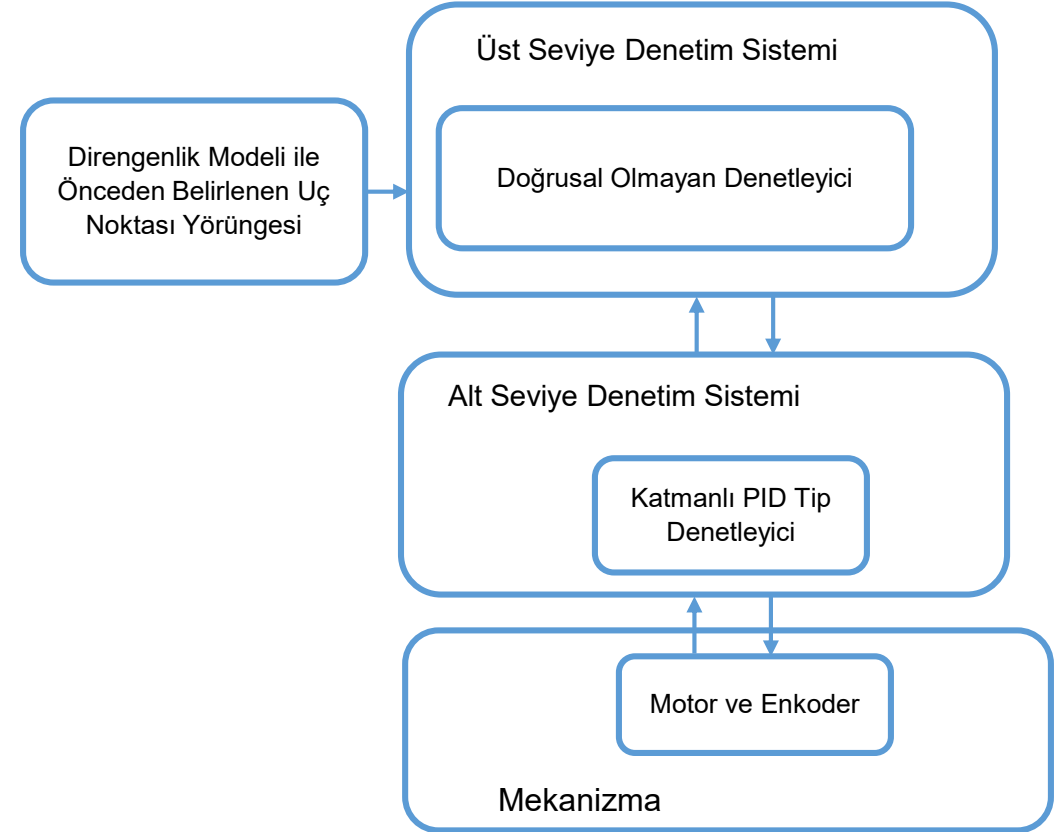
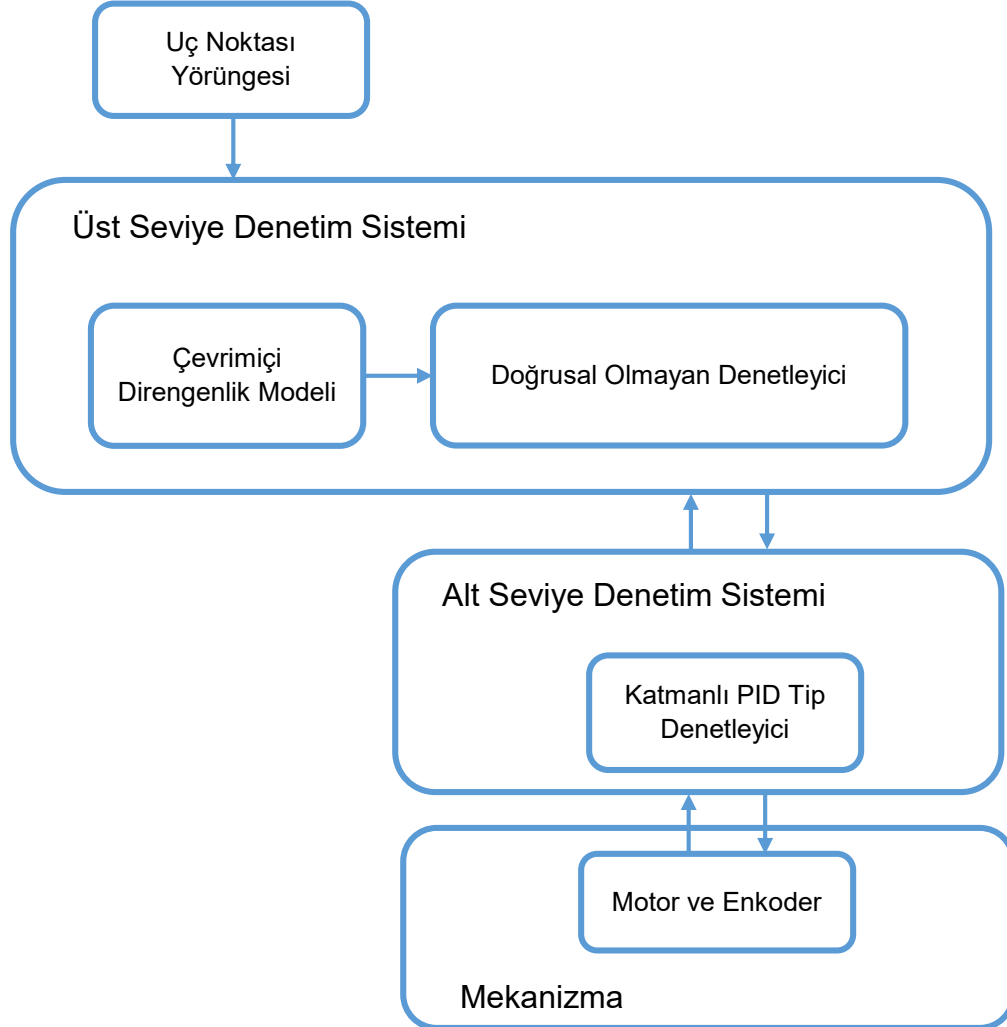
$$Q_{ref} = Q_{theo} - (\Delta Q_{stiff} + \Delta Q_{gear}),$$

«Improving the Accuracy of Industrial Robots by offline Compensation of Joints Errors» A Olabi, M Damak, R Béarée, O Gibaru, S Leleu (2013)

Denetleyici Alternatifleri

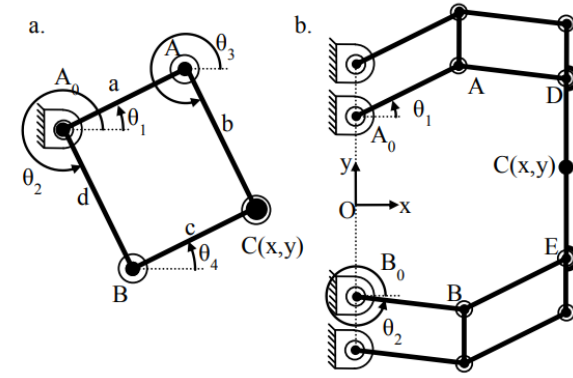
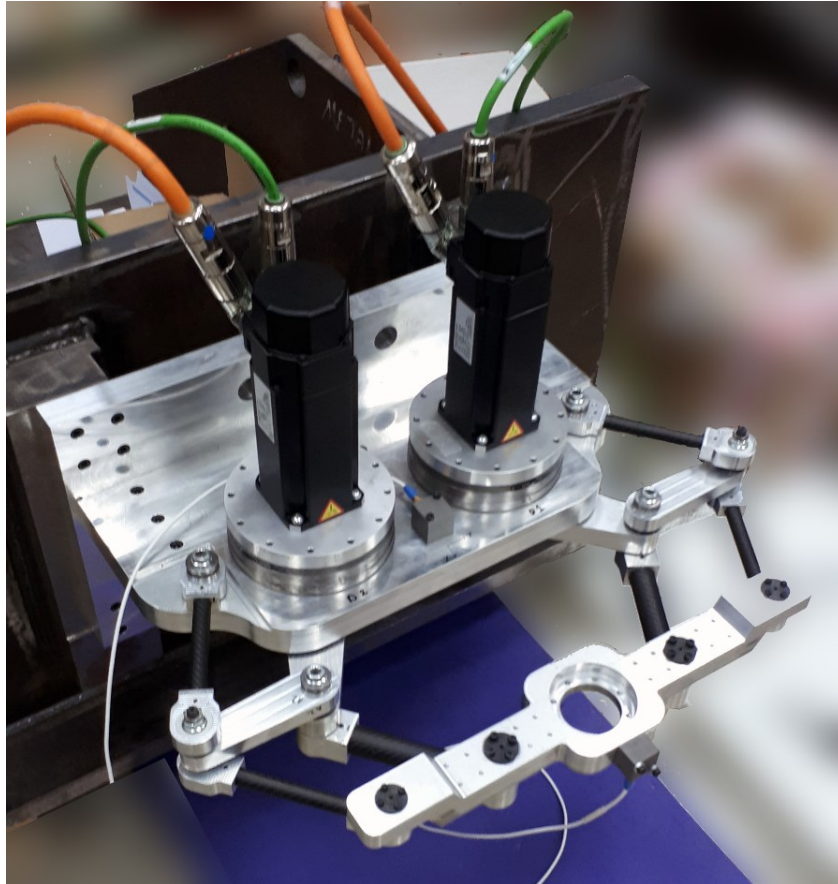


Denetleyici Alternatifleri

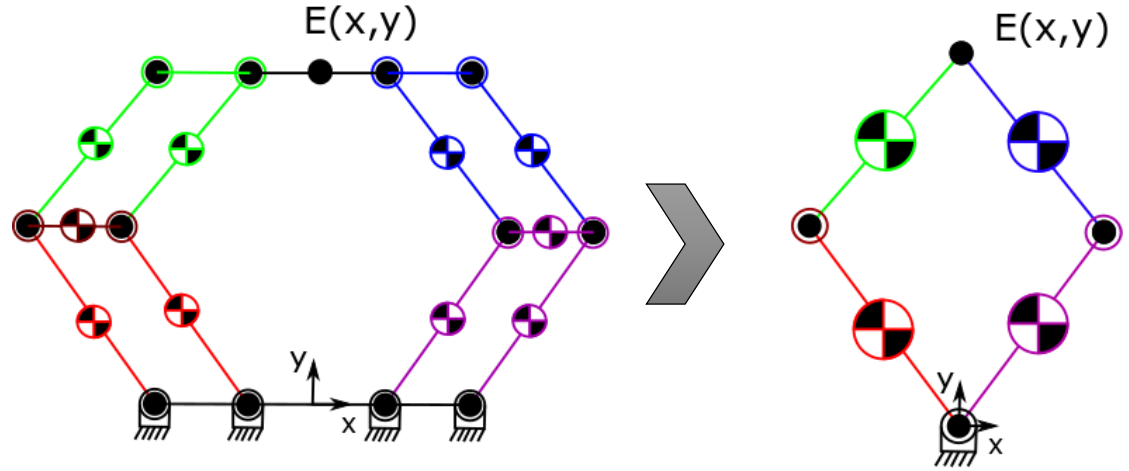


- Doğrusal olmayan denetleyiciler için üzerinde çalışılan probleme özgü tasarımlar yapılabilmekte ve performans arttırabilir.
- Hassas ve dinamik yörünge izleme için yapısal belirsizlikler ile baş edilebilmesi amaçlanmaktadır.
- Genel model ve tam bilinen model bazlı denetimler sistemin tüm paramaterlerinin bilindiği ve matematiksel modellenebildiği durumlarda kullanılmaktadır.
- Bunlara ek olarak sistem model denkleminin çözümünü gerektirmeyen veya kısmi (yakınsanmış model) çözünebildiği durumlarda, buna karşın çevresel bozucu etken ve yapısal belirsizliklerle kararlı bir şekilde başa çıkabilen denetleyiciler tasarlanabilmektedir.
- Özellikle sistemdeki belirsizliklerle başetme amacı ile akedemik çalışmalarda uyarlamalı denetim [8], öğrenme bazlı denetim [9] ve gürbüz denetim [10] metodları kullanılmaktadır.

Atalet parametrelerin kestirilmesi için doğrusal olmayan denetleyici

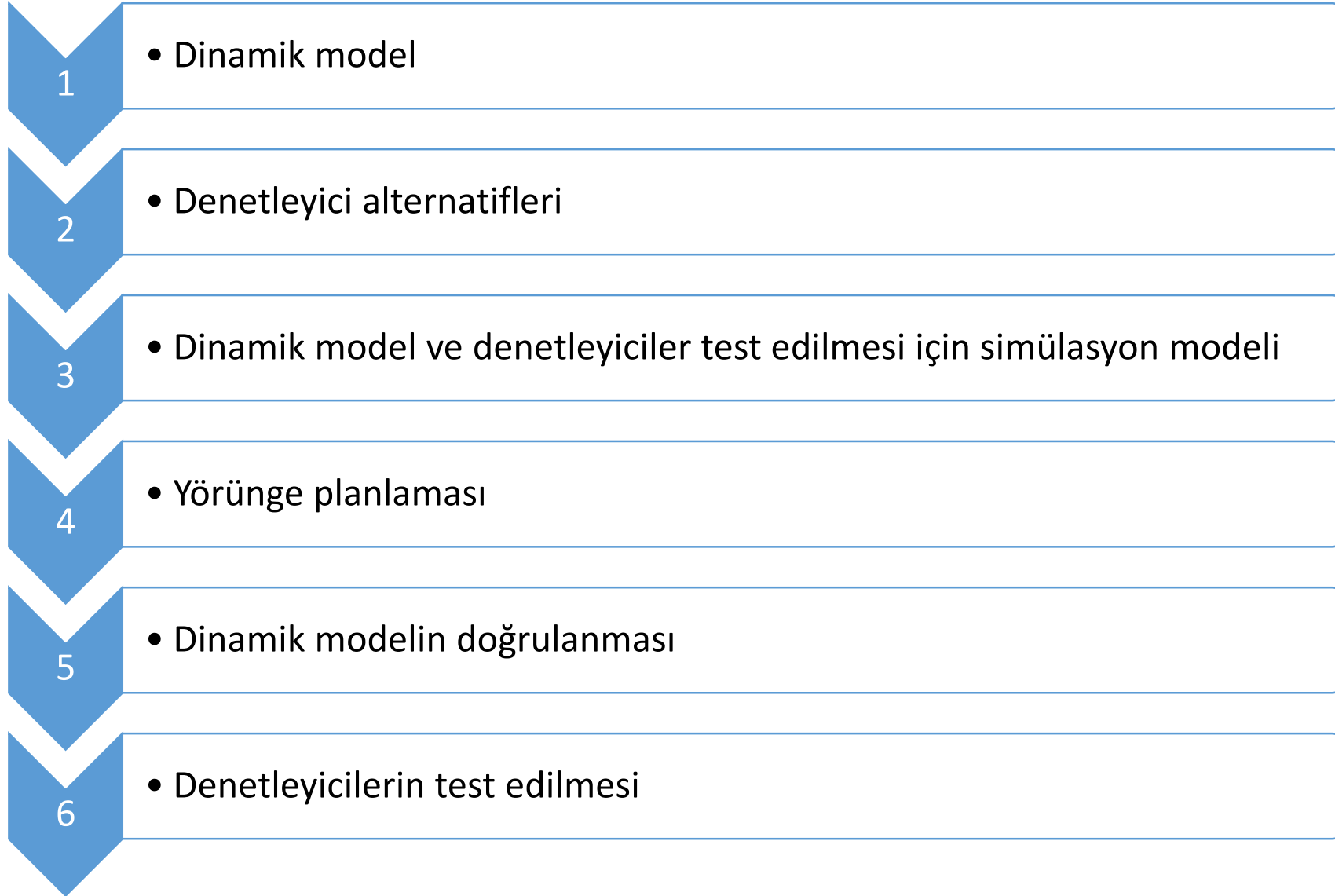


(Kiper vd., 2015 [11])



Modifiye edilmiş fazla kısıtlı mekanizma

Toplu parameterler ile indirgenmiş model



Manipülâtör Denetimi-Dinamik Model

- Robot manipülâtörün dinamik modeli Lagrange denklemi

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q})$$

- $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ ($n \times n$) Atalet matirisi
- $\mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$ ($n \times 1$) Coriolis ve centrifugal etkiler
- $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ ($n \times 1$) Yer çekimi etkileri
- $\boldsymbol{\tau}$ ($n \times 1$) Mafsal denetim girdileri vektörü, mafsal tork ve kuvvetleri

Ek olarak dinamik olarak benzetimde

- Eyleyici dinamikleri
- Mafsal veya uzuv esnemeleri
- Sürtünme
- Gürültü
- Bozunum

- Denetim metodları dinamik modelin bazı özelliklerini kullanarak yaratılmıştır.

Atalet matrisi simetrik pozitif matristir.

$$\lambda_h I_n \leq M(q) \leq \lambda_H I_n$$

Matris $\dot{M} - 2N$ eksi-bakışimli matristir.

$$\|N(q, \dot{q})\| \leq \|\dot{q}\| \text{ kurala uymalıdır.}$$

- Hareket denklemi atalet paramaterlerine doğrusal olmalıdır.
- $(r \times 1)$ ϕ vektörü ve $(n \times r)$ regrasyon matrisi $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ varolmalıdır ki:

$$Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\phi = M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)$$

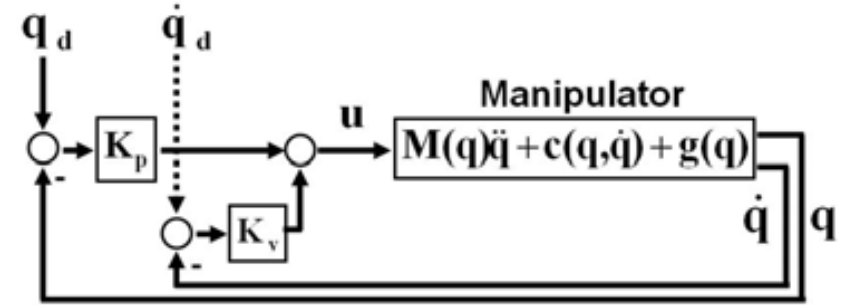
Bağımsız Mafsal Denetimi-PD,PID

- Her bir mafsal için denetim girdileri yalnızca ilgili mafsalın yer değiştirmesinin ve hızının ölçümüne bağlıdır.
- Endüstride karmařık denetleyicilere göre tercih edilmektedir.
- Özellikler karmařık denetleyicilerin performansa etkisi büyük ölçüde görülmedięinde tercih edilir.
- Geleneksel olarak, robot manipülatörlerinde denetleyici tasarımı, manipülatör mafsallarını tahrik eden her motor seviyesinde bir PD veya PID kompensatörünün ayarlanması olarak anlaşılabilir.

P-kontrol, mevcut durumu istenen duruma getirme çabasını gösterir;

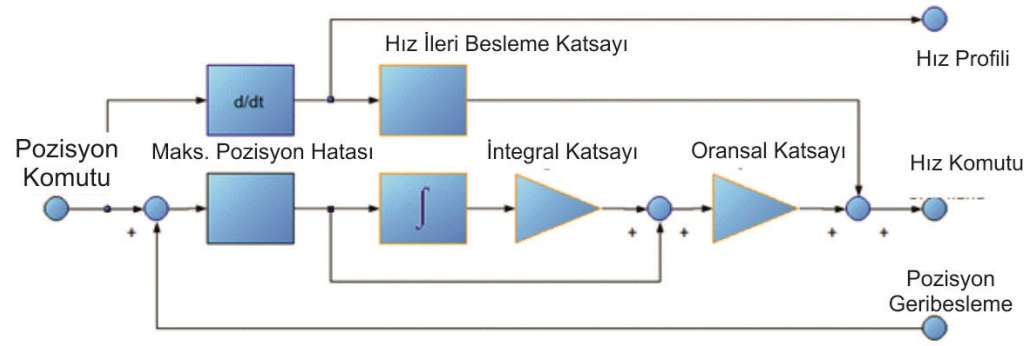
I-kontrol, önceki durumların deneyim bilgilerini kullanarak biriktirilmiş çaba anlamına gelir;

D-kontrol, gelecekteki durumlardaki eğilimler hakkındaki bilgileri yansıtan öngörücü çabayı ifade eder.

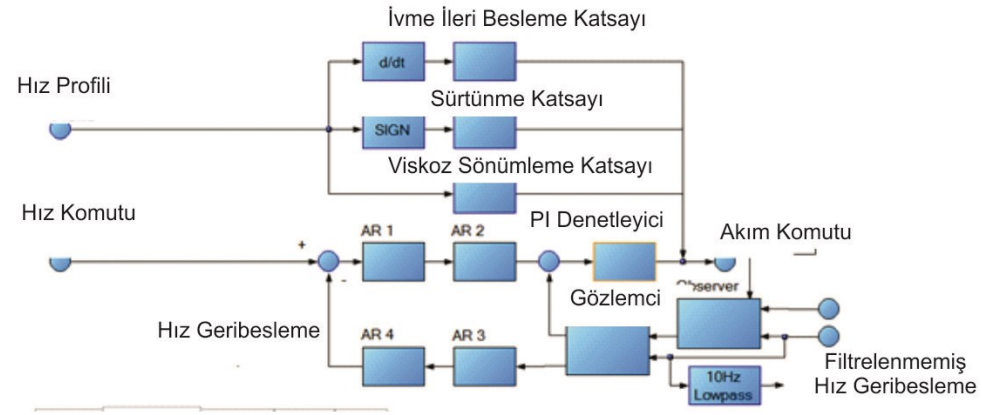


Ne model yapısı ne de model parametreleri hakkında bilgiye ihtiyaç duymaz.

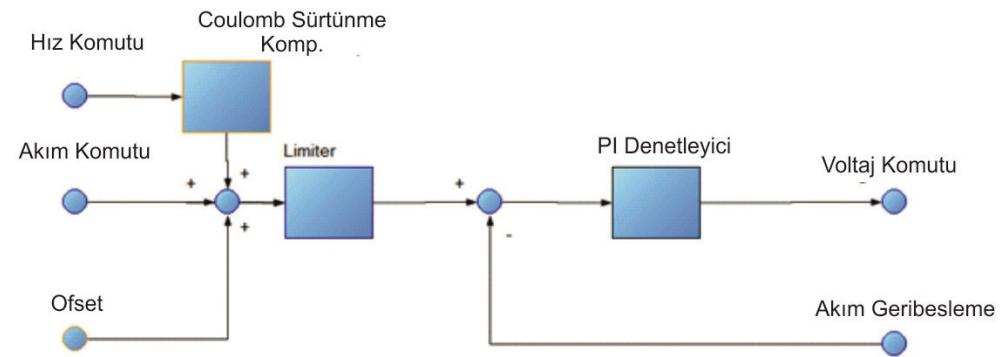
PID kontrolünün Ziegler ve Nichols'un PID ayarlama kuralları 1942'de yayınlandı [12].



(a)



(b)



(c)

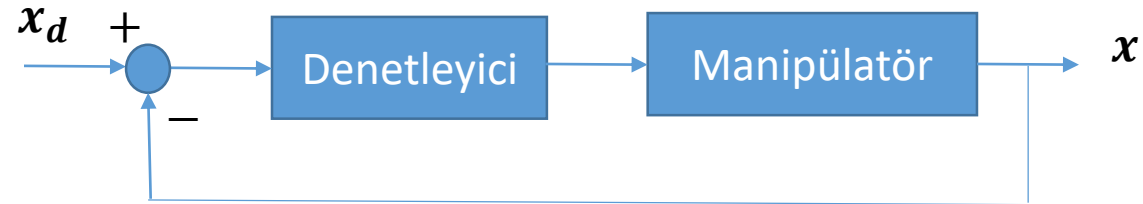
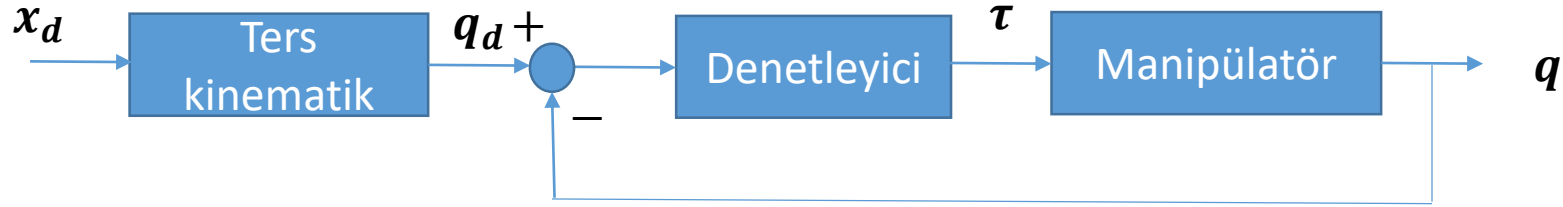
Dinamik Model ile Denetim

- Doğrusal olmayan terimleri iptal etmeye ve her uzuvun dinamiklerini ayırtırmaya dayanmaktadır.
- Bağımsız PID kontrolleri çoğu uygulamada yeterli görülsede, lazerle kesimde veya yüksek hızlı operasyonlar gibi engellerin varlığında etkili yörünge izleme yetenekleri gerektiren birçok görev vardır.[]
- Bu nedenle, yörünge izleme performansını iyileştirmek için denetleyiciler, manipülatör dinamik modelini hesaplanmış tork benzeri bir teknikle dikkate alınmalıdır.

Çalışma ve Mafsal Uzayında Denetim

Görevler genellikle görev alanında, uç noktasının istenen bir yörüngesi olarak belirtilirken, kontrol eylemleri mafsal uzayında gerçekleştirilir.

Bu gerçek, doğal olarak ortak alan kontrolü ve operasyonel alan kontrolü (görev alanı kontrolü) olmak üzere iki tür genel kontrol yöntemine yol açar.



Hesaplmalı Tork Metodu

Ters dinamik denetimi mafsalsal uzayında :

$$\tau = M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)$$

Doğrusal olmayan terimleri kompanse etmek için bir döngü ve kontrol sinyali v olan bir dış döngüden oluşur.

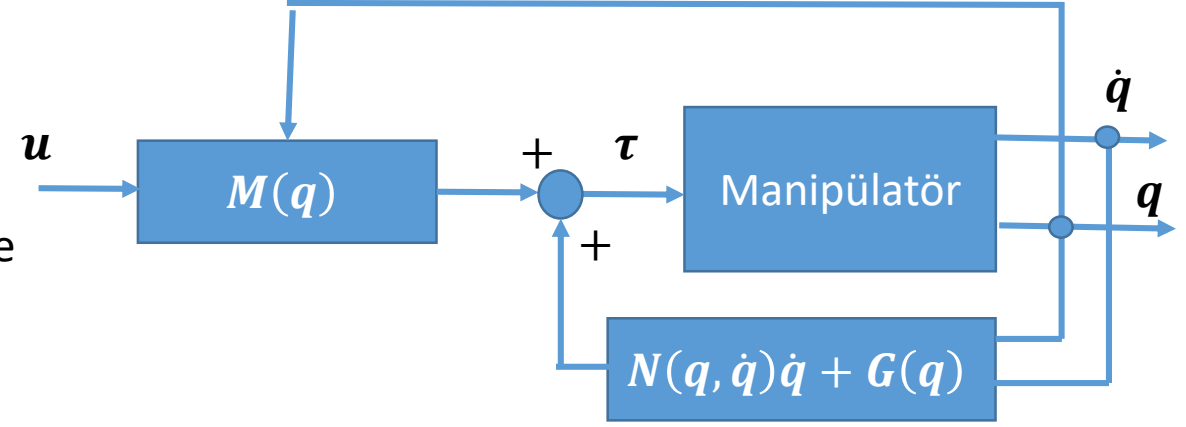
Denetim girdisinin tasarlanması için bir yaklaşım, (PD) geri beslemesidir.

$$u = \ddot{q}_d + K_v \dot{e}_q + K_p e_q$$

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d + K_v \dot{e}_q + K_p e_q) + N(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)$$

Lineer sistem teorisine göre, yörünge izleme hatasının sifira yakınsaması garantilenmektedir.

$$\ddot{e}_q + K_v \dot{e}_q + K_p e_q = 0$$



K_v ve K_p ($n \times n$) diagonal positif kazanç matrisleri ile kararlılık garantilenmektedir.

$$K_v = \text{diag}(k_{v,1}, \dots, k_{v,n}) > \mathbf{0},$$

$$K_p = \text{diag}(k_{p,1}, \dots, k_{p,n}) > \mathbf{0}$$

Operasyon uzayında:

$$\mathbf{F} = \mathbf{\Lambda}(\mathbf{q})(\ddot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}}_x + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_x) + \mathbf{T}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{x}} + \boldsymbol{\eta}(\mathbf{q})$$

$$\mathbf{\Lambda}(\mathbf{q}) = \mathbf{J}^{-T}(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q})\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})$$

$$\mathbf{T}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{J}^{-T}(\mathbf{q})\mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) - \mathbf{\Lambda}(\mathbf{q})\mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})$$

$$\boldsymbol{\eta}(\mathbf{q}) = \mathbf{J}^{-T}(\mathbf{q})\mathbf{G}(\mathbf{q})$$

- Operasyon uzayında denetimin bir avantajı olarak kapalı çevrime doğrudan operasyon hataları dahil olmuş olur.
- Hız seviyesinde kinematiğinin bilinmesi yeterlidir.

Pasiflik Esaslı Denetleyici Metodu

Bu yöntem açıkça Lagrangian sisteminin pasiflik özelliklerini kullanır [6.31,32].

Ters dinamik yöntemiyle karşılaştırıldığında, pasifliğe dayalı denetleyicilerin daha gürbüz özelliklere sahip olmaları beklenir çünkü manipülatör dinamiklerinin tam olarak iptal edilmesine dayanmazlar.

Pasiflik temelli denetleyici girdisi:

$$\mathbf{q}_r = \dot{\mathbf{q}}_d + \alpha \mathbf{e}_q, \alpha > 0$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}}_q + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_q$$

Alpha değerinin izleme sonucunu çarpıcı biçimde etkilemektedir [13]. Manipülatör, küçük α değerleri için titreşim yapma eğilimindedir. Daha büyük α değerleri daha iyi izleme performansı sağlar ve pozisyon hatası küçük olduğunda hız ölçüm gürültüsüyle bozulmasını önler.

Bir öneri $\mathbf{K}_p = \alpha \mathbf{K}_v$ (ikinci dereceden optimizasyon). [13]

- Kararlılık analizi:

$$\mathbf{H}(q)\dot{s}_q + \mathbf{C}(q, \dot{q})s_q + \mathbf{K}_V\dot{e}_q + \mathbf{K}_Pe_q = \mathbf{0}$$

$$V = \frac{1}{2}\mathbf{y}^T \begin{pmatrix} \alpha\mathbf{K}_V + \mathbf{K}_P + \alpha^2\mathbf{H} & \alpha\mathbf{H} \\ \alpha\mathbf{H} & \mathbf{H} \end{pmatrix} \mathbf{y} = \frac{1}{2}\mathbf{y}^T \mathbf{P}\mathbf{y} \quad \text{ve} \quad \mathbf{y} = (e_q^T, \dot{e}_q^T)^T$$

$$\kappa_m \|\mathbf{y}\|^2 \leq \mathbf{y}^T \mathbf{Q}\mathbf{y} \leq \kappa_M \|\mathbf{y}\|^2, \quad \kappa_M \geq \kappa_m > 0$$

$$\dot{V} \leq -\kappa_m \|\mathbf{y}\|^2 = -2\eta V, \quad \eta = \frac{\kappa_m}{\sigma_M}$$

$$V(t) \leq V(0)e^{-2\eta t}$$

Hesaplmalı Tork Metoduna Dayalı Denetleyiciler

- Dinamik modelin parametrelerinin doğru bir şekilde bilinmesini
- Denetleyici giridlerinin gerçek zamanlı olarak hesaplanmasını

Bu problemleri önlemek için, bu kontrol şemasının bir varyasyonu, uyarlamalı denetleyici metodu önerilmiştir.

Hesaplanmış-tork-benzeri denetleyiciler, hesaplanmış-tork denetleyicisini modifiye ederek elde edilebilir.

$$\boldsymbol{\tau} = \hat{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\mathbf{u} + \hat{\mathbf{N}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) + \mathbf{u}_{aux}$$

Burada $\hat{\cdot}$ hesaplanan veya nominal değeri temsil eder.

Teorik olarak kesin geri besleme doğrusallaştırmasının, sistemlerdeki belirsizlik nedeniyle, uygulamada elde edilemeyeceğini belirtir.

Uyarlamalı Denetleyici Metodu

Kapalı çevrim sistemlerdeki sinyallere dayanarak bu parametreleri çevrimiçi ayarlama mekanizması.

Böyle bir kontrol şeması kullanılarak, sistemde parametrik belirsizlik olsa bile kontrol hedefine ulaşılabilir.

$\ddot{\mathbf{q}}$ ölçülebilir ve $\hat{\mathbf{M}}$ tersi alınabilir olmalı.

$$\mathbf{u} = \hat{\mathbf{M}}(\mathbf{q})(\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}}_q + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_q) + \hat{\mathbf{N}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{G}}(\mathbf{q})$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{e}}_q^T & \dot{\mathbf{e}}_q^T \end{bmatrix}^T = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{e}}_q^T & \mathbf{e}_q^T \end{bmatrix}^T + \mathbf{B} \hat{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \tilde{\boldsymbol{\phi}}$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \hat{\boldsymbol{\phi}} = \hat{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{N}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{G}}(\mathbf{q})$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_n & \mathbf{I}_n \\ -\mathbf{K}_p & -\mathbf{K}_v \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_n \\ \mathbf{I}_n \end{pmatrix}$$

$\mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$ ($n \times r$) regresör matrisi

$\boldsymbol{\phi}$ ($r \times 1$) kestirilen parametreler

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\phi}}} = -\boldsymbol{\Gamma} \mathbf{Y}^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \mathbf{B} \mathbf{P} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{e}}_q^T & \mathbf{e}_q^T \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \hat{\boldsymbol{\phi}} - \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \boldsymbol{\phi} = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{u}$$

$$\mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \tilde{\boldsymbol{\phi}} = \hat{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) (\ddot{\mathbf{e}}_q + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}}_q + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_q)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\phi}} = \hat{\boldsymbol{\phi}} - \boldsymbol{\phi}$$

Tüm iç sinyallerde sınırlılık ile izleme hatasının sıfıra yakınsaması, aşağıdaki Lyapunov benzeri fonksiyon kullanılarak Lyapunov kararlılık teorisi ile gösterilebilir.

Uyarlamalı Denetleyici Metodu

(Tatlıcıoğlu E. vd.,2008)

$$\dot{x} = J\dot{q}$$

$$e \triangleq x_d - x$$

Filtrelenmiş hata sinyali $\alpha \in \mathbb{R}$ ile tasarlanır

$$\dot{e} = Jr - \alpha e \quad r = J^{-1}(\dot{e} + \alpha e)$$

$$\dot{q} = J^{-1}(\dot{x}_d + \alpha e) - r$$

r sıfıra çekilebilirse hata e istenen değere çekilir.

$$\dot{r} = \frac{d}{dt}(J^{-1})(\dot{x}_d + \alpha e) + (J^{-1})(\ddot{x}_d + \alpha \dot{e}) - \ddot{q}$$

$$M\dot{r} = M \frac{d}{dt}(J^{-1})(\dot{x}_d + \alpha e) + M(J^{-1})(\ddot{x}_d + \alpha \dot{e}) - M\ddot{q}$$

$$-M\ddot{q} = N\dot{q} + G - \tau \quad \dot{q} = J^{-1}(\dot{x}_d + \alpha e) - r$$

$$M\dot{r} = M \frac{d}{dt}(J^{-1})(\dot{x}_d + \alpha e) + M(J^{-1})(\ddot{x}_d + \alpha \dot{e}) + N(J^{-1})(\ddot{x}_d + \alpha \dot{e}) - Nr + G - \tau$$

$$W \triangleq M \frac{d}{dt} (J^{-1})(\dot{x}_d + \alpha e) + M(J^{-1})(\ddot{x}_d + \alpha \dot{e}) + N(J^{-1})(\dot{x}_d + \alpha e) + G$$

$$M\dot{r} = W - Nr - \tau$$

$$\tau = W + K_r r + J^T e$$

$$M\dot{r} = -Nr - K_r r - J^T e$$

$$V_{emk} = \frac{1}{2} r^T M r + \frac{1}{2} e^T e$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{emk} &= \frac{1}{2} r^T \dot{M} r + r^T M \dot{r} + e^T \dot{e} \\ &= \frac{1}{2} r^T \dot{M} r + r^T (-Nr - K_r r - J^T e) + e^T (Jr - \alpha e) \\ &= \frac{1}{2} r^T (\dot{M} - 2N) r + r^T K_r r - r^T J^T e - e^T \alpha e + e^T J r \\ &= -r^T K_r r - e^T \alpha e \end{aligned}$$

$$W = Y\phi, \quad \widehat{W} = Y\widehat{\phi}$$

ϕ bilinmeyen parametreleri içerir ve tahmini $\widehat{\phi}$.

$$\tau = Y\widehat{\phi} + K_r r + J^T e$$

$$M\dot{r} = Y\phi - Y\widehat{\phi} - Nr - K_r r - J^T e$$

$$\tilde{\phi} \triangleq \phi - \widehat{\phi}, \quad \dot{\tilde{\phi}} = -\dot{\widehat{\phi}}$$

$$V_{adp} = \frac{1}{2} r^T M r + \frac{1}{2} e^T e + \frac{1}{2} \tilde{\phi}^T \Gamma \tilde{\phi}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{adp} &= \frac{1}{2} r^T \dot{M} r + r^T (Y\tilde{\phi} - Nr - K_r r - J^T e) + e^T (Jr - \alpha e) + \tilde{\phi}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\phi}} \\ &= -r^T K_r r - e^T \alpha e + \tilde{\phi}^T (Y^T r + \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\phi}}) \end{aligned}$$

Güncelleme kuralı:

$$\dot{\widehat{\phi}} = \Gamma Y^T r$$

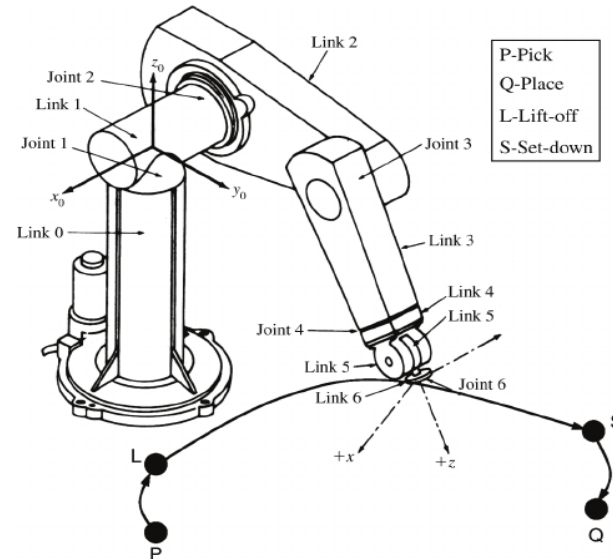
$$\dot{V}_{adp} = -r^T K_r r - e^T \alpha e$$

Yörünge Planlama

Önceden tanımlanmış bazı gereklilikleri dikkate alarak belirli bir geometrik yol boyunca bir hareket yasası oluşturma.

Bağlı olabilecek bir fonksiyonun en aza indirilmesine dayanarak

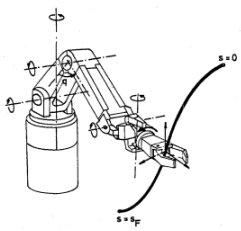
- Operasyon tamamlama süresi
- Eyleyici tork değeri
- Jerk değerinin mutlak değeri
- Veya kombinasyonları



Yörünge Planlama

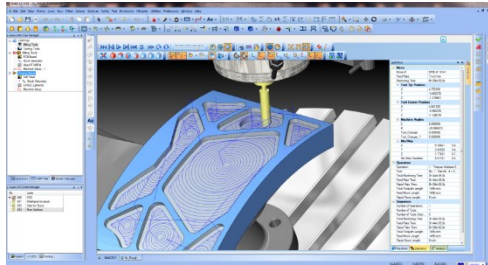
Yörünge

Belirlenmiş
yörüngeler

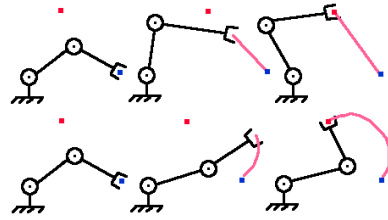


Çalışma

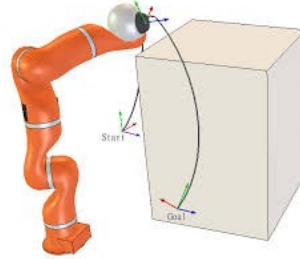
Çevrimdışı



Noktadan Noktaya



Çevrimiçi



Yörünge takibi, içerisinde belirtilen zamana göre değişen manipülatör çalışma alanı içindeki referans yörüngesini izlemeyi amaçlamaktadır.

Genel olarak, bu istenen yörünge, eyleyicilerin kapasitesine uyduğu varsayılmaktadır.

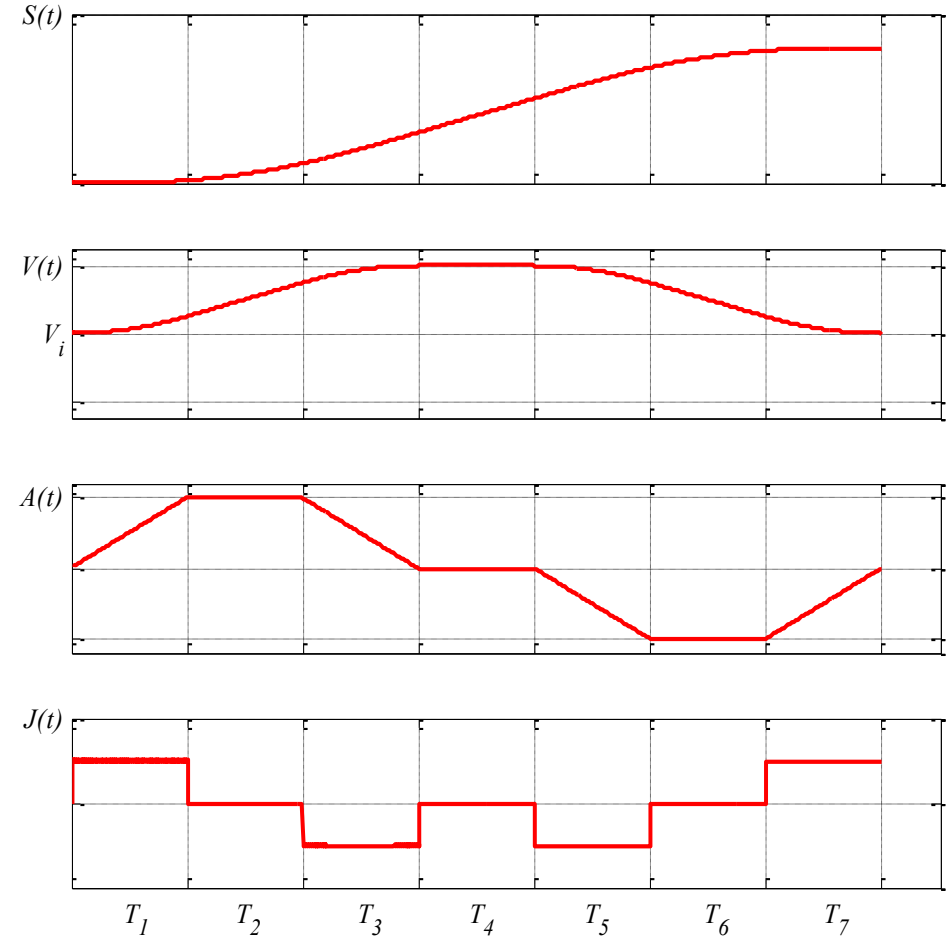
Başka bir deyişle, istenen yörünge ile bağlantılı ortak eyleyici hız ve ivme limiterini aşmamalıdır.

Uygulamada kapasite eyleyicilerin tork ve hız limitleri tarafından belirlenir

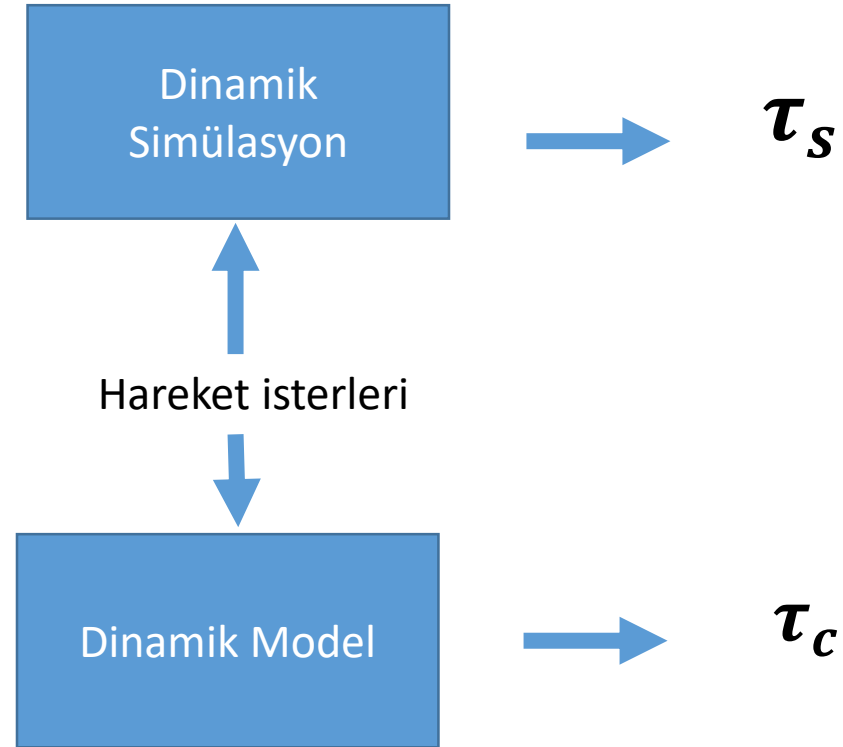
Uç Noktası yörünge planlaması

S : konum V : hız A : ivme J :Jerk

$$S(t) = \begin{cases} V_i \tau_1 + J \tau_1^3 / 6 & 0 \leq t < t_1 \\ S_1 + V_1 \tau_2 + J T_1 \tau_2^2 / 2 & t_1 \leq t < t_2 \\ S_2 + V_2 \tau_3 + J T_2 \tau_3^2 / 2 - J \tau_3^3 / 6 & t_2 \leq t < t_3 \\ S_3 + V_3 \tau_4 & t_3 \leq t < t_4 \\ S_4 + V_4 \tau_5 - J \tau_5^3 / 6 & t_4 \leq t < t_5 \\ S_5 + V_5 \tau_6 + J T_5 \tau_6^2 / 2 & t_5 \leq t < t_6 \\ S_6 + V_6 \tau_7 - J T_5 \tau_7^2 / 2 - J \tau_7^3 / 6 & t_6 \leq t < t_7 \end{cases}$$



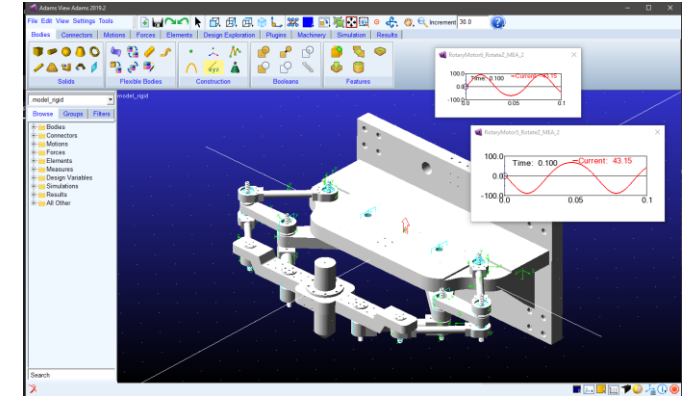
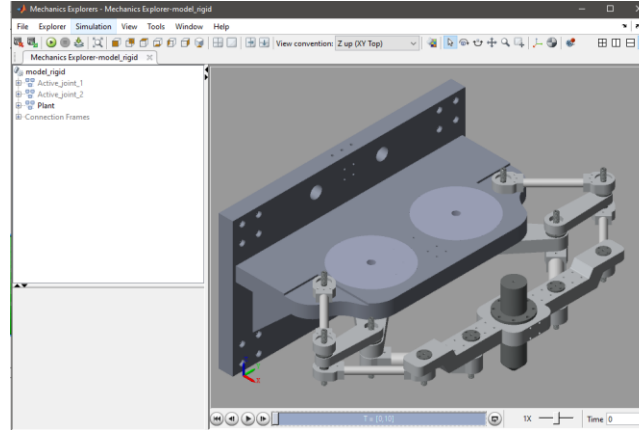
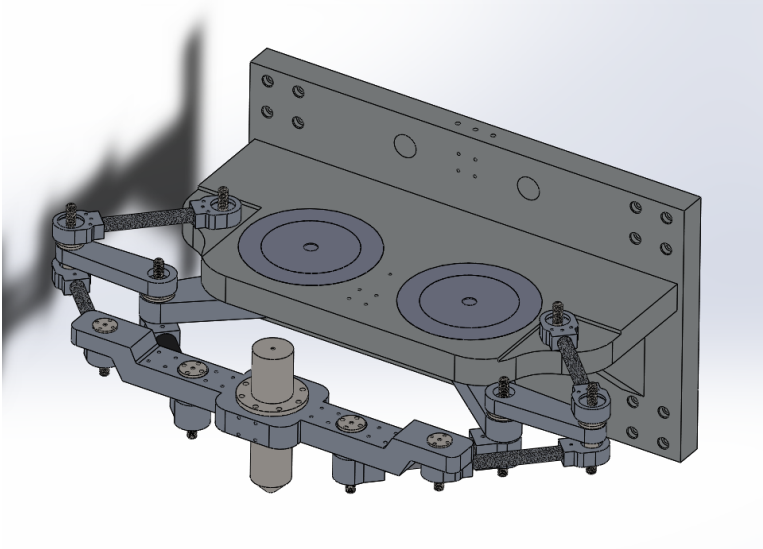
Dinamik Benzetimin Doğrulanması



Bilgisayar Destekli
Tasarım (CAD)

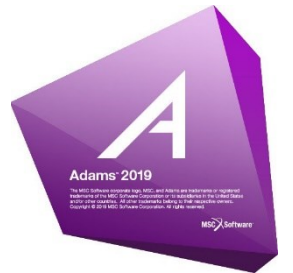


Dinamik
Simülasyon



MATLAB®
& SIMULINK®

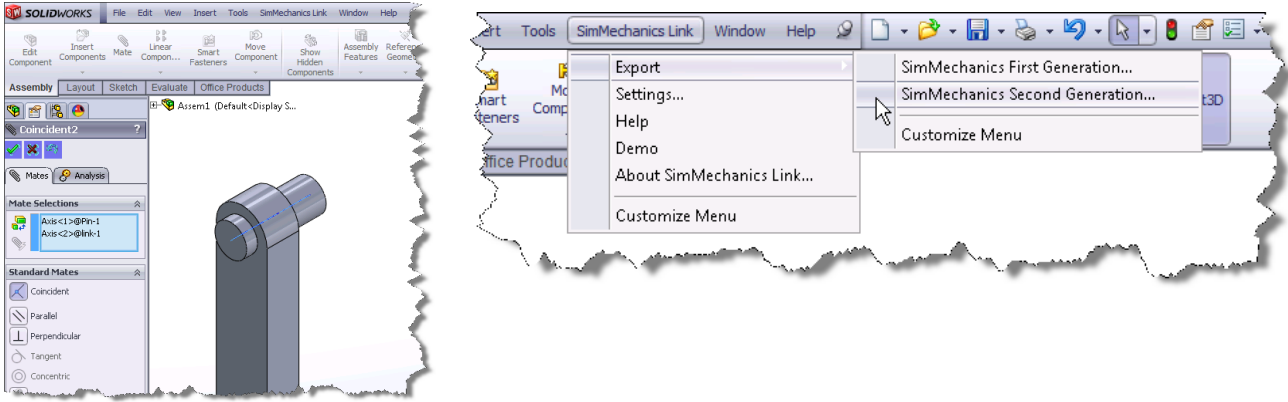
MSC Software®



Autolev, Bullet, DART, DynaMechs, Gazebo, Open Dynamics Engine, Robotics Studio,
Robotics Toolbox, Robotran, SD/FAST, SYMORO, Webots

Solidworks ile Multibody Dynamics Uyumlu Dinamik Model Oluşturulması

- Referans noktaları anlamlı olmalı
- Kütle atalet değerleri
- Desteklenen ilişkiler



Constraint Block	CAD Mate	Entities	Setting
Angle (Perpendicular)			$\theta = 90^\circ$
Angle (Parallel)			$\theta = 0^\circ$
Distance			$d \geq 0$

Joint Block	Mate I	Entities I	Mate II	Entities II	Notes
Cartesian Joint					
Cylindrical Joint					
Planar Joint					
Prismatic Joint					1
					2
					3
Rectangular Joint					
Revolute Joint					4
					5
Spherical Joint					
Universal Joint					

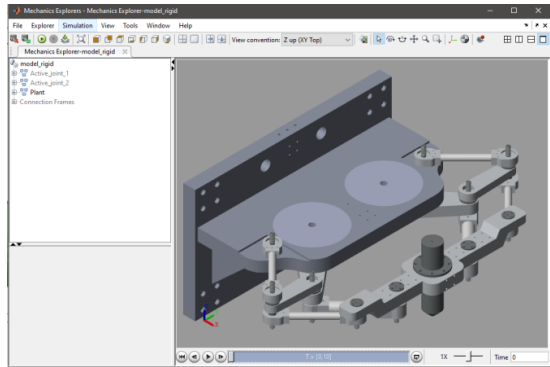
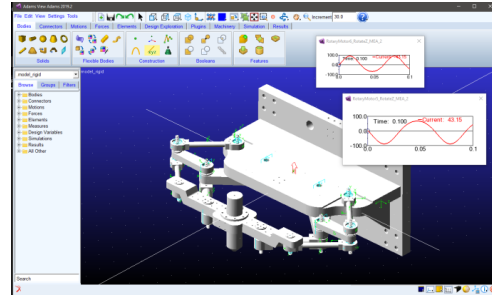
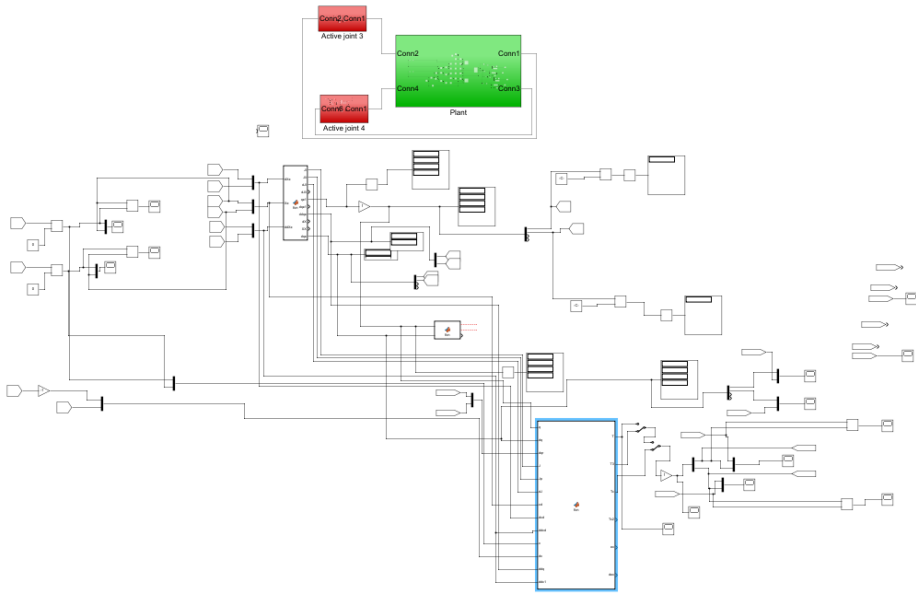
Tasarlanan
Denetleyiciler



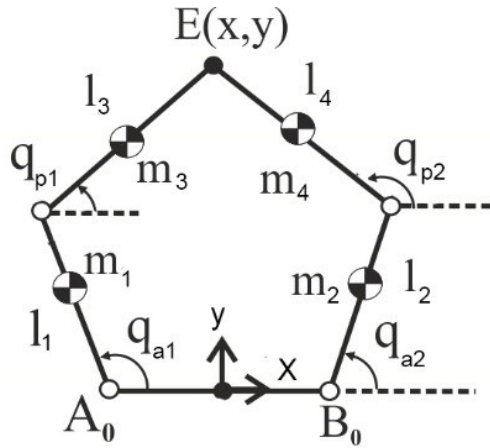
Dinamik
Simülasyon ile
çalışan robot
modeli



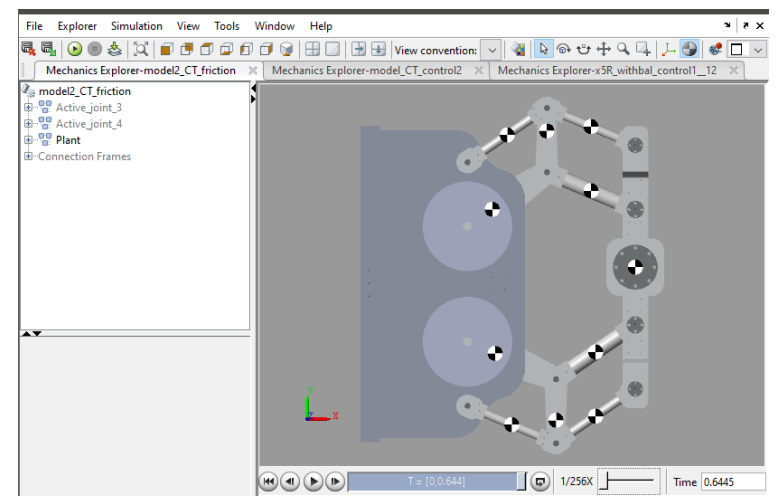
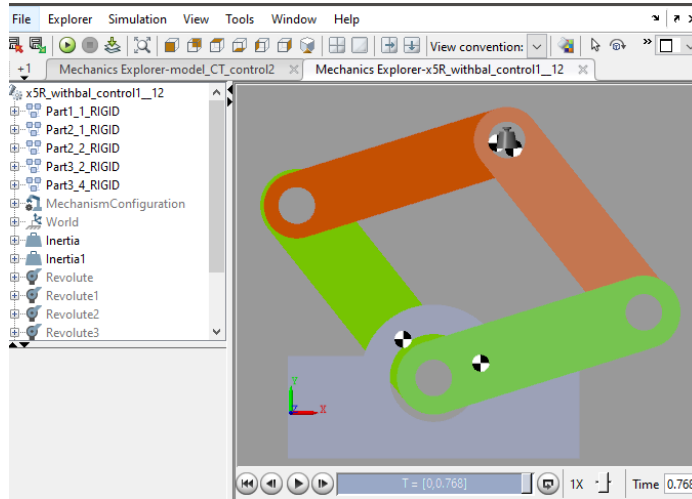
Yörünge takibi
Performansı

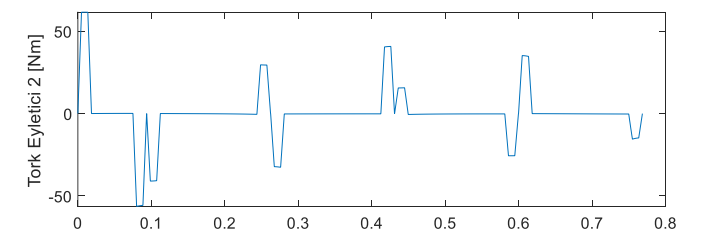
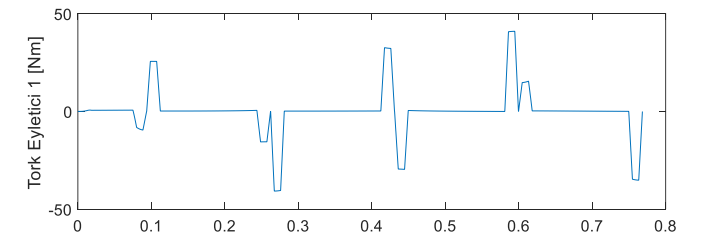
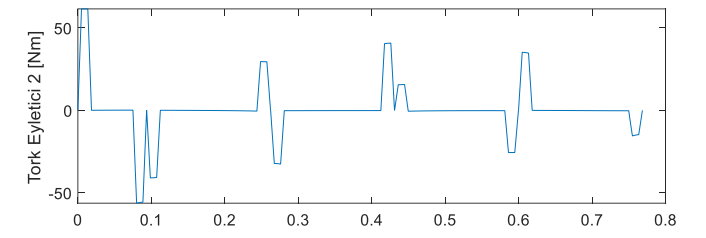
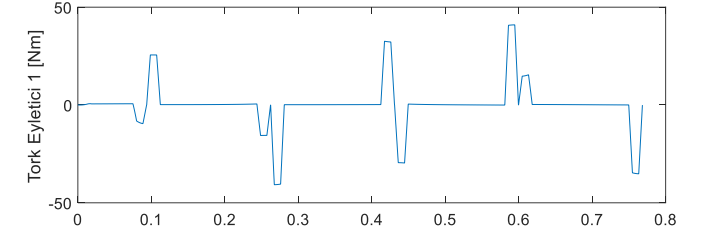
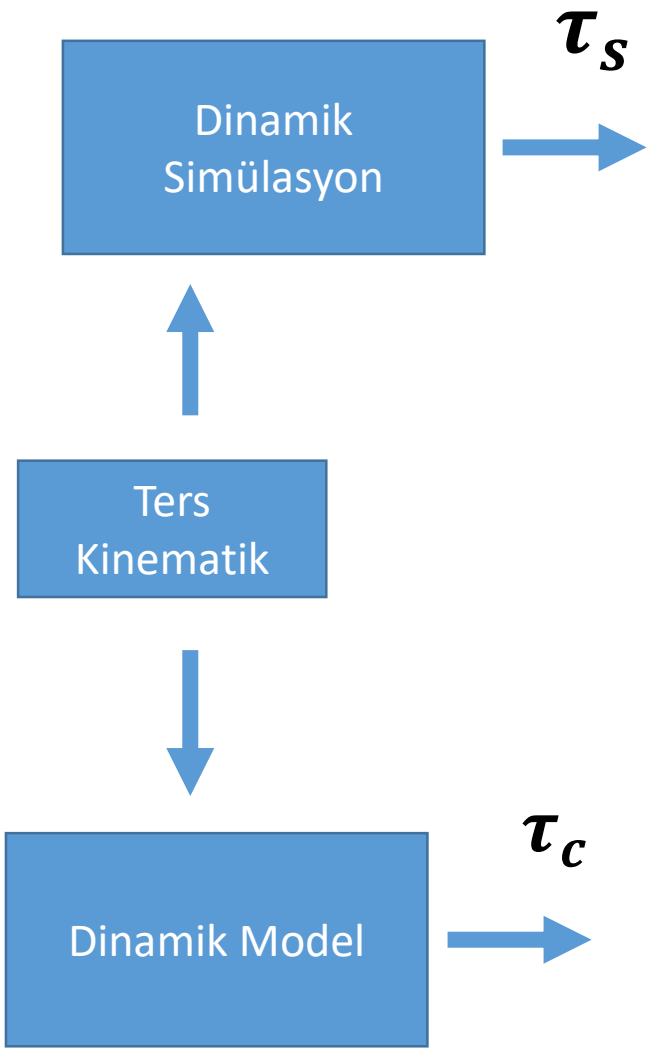
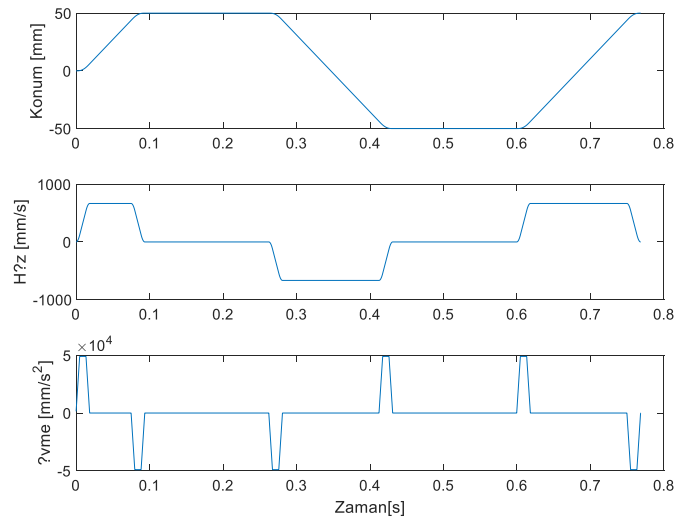
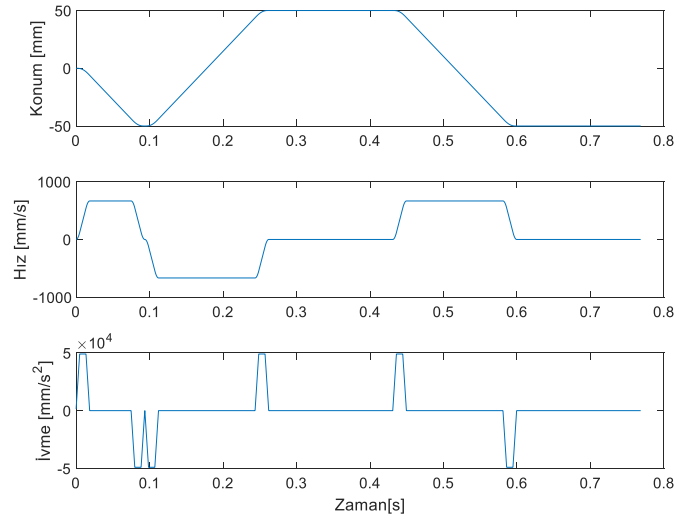


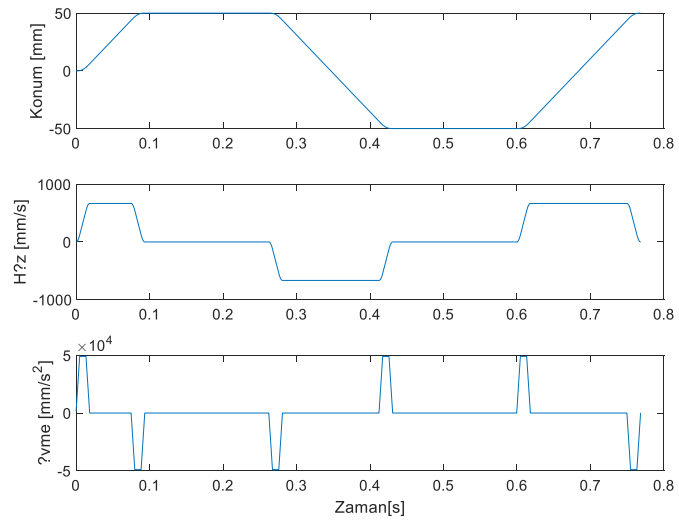
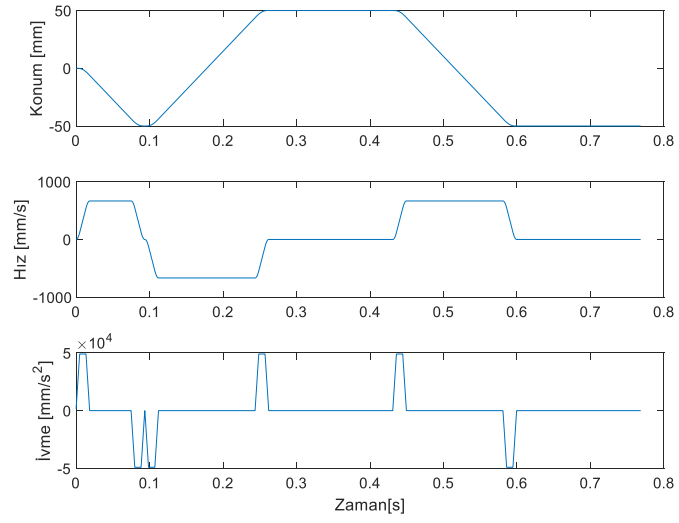
Simülasyon #1 Dinamik modelin karşılaştırılması



$$\tau = M(q)\ddot{q}_a + N(q, \dot{q})\dot{q}_a + G(q)$$





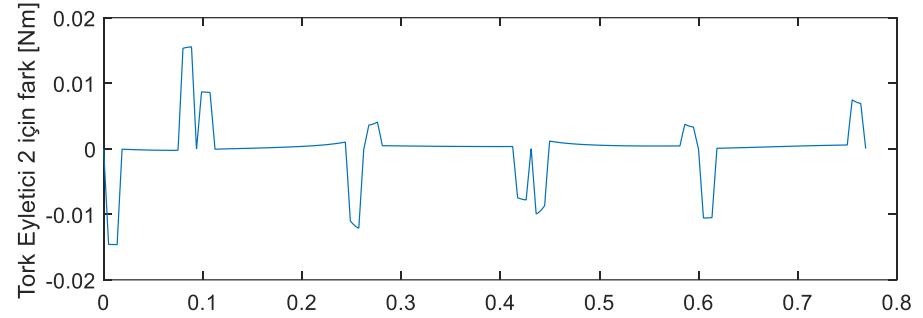
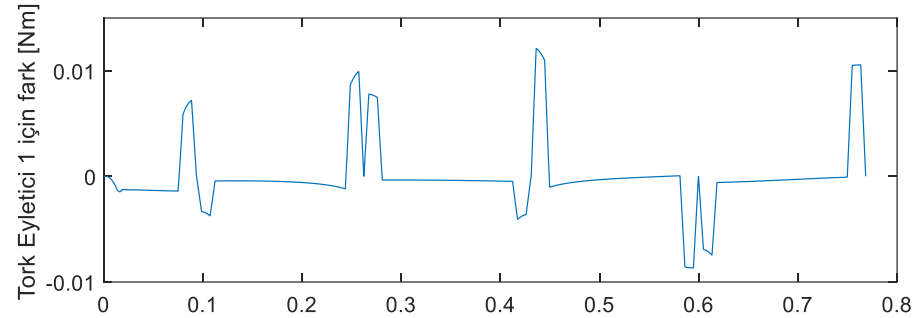


Dinamik Simülasyon

Ters Kinematik

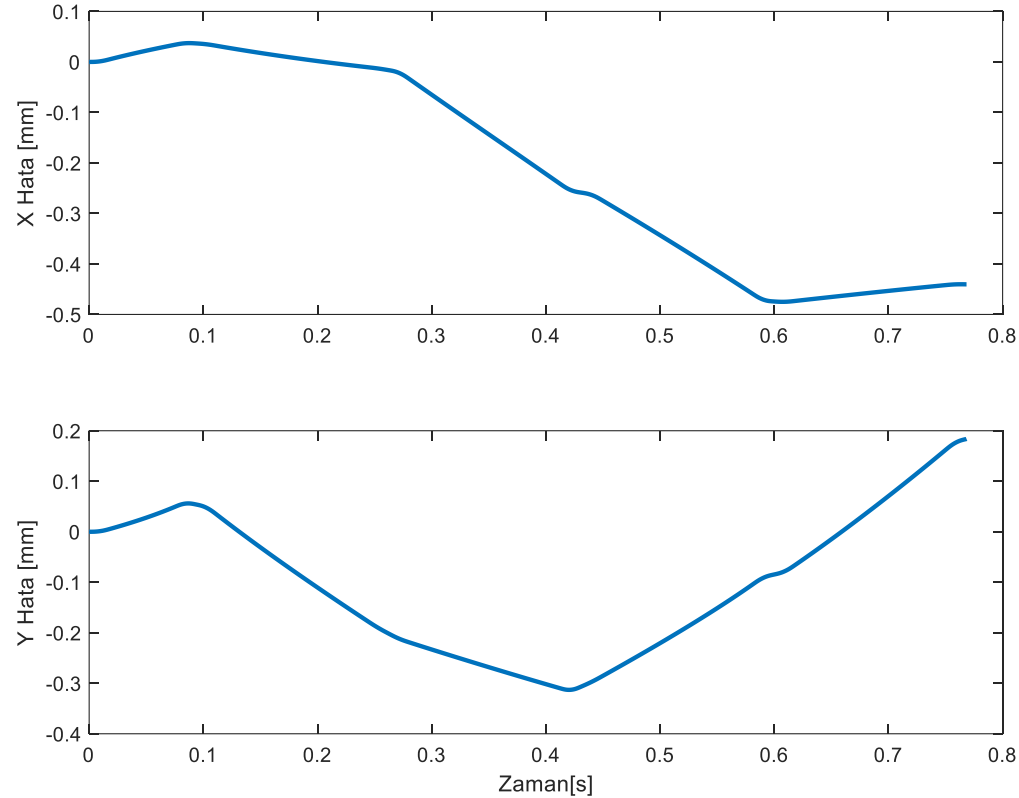
Dinamik Model

τ_s
 $\tau_s - \tau_c$
 τ_c

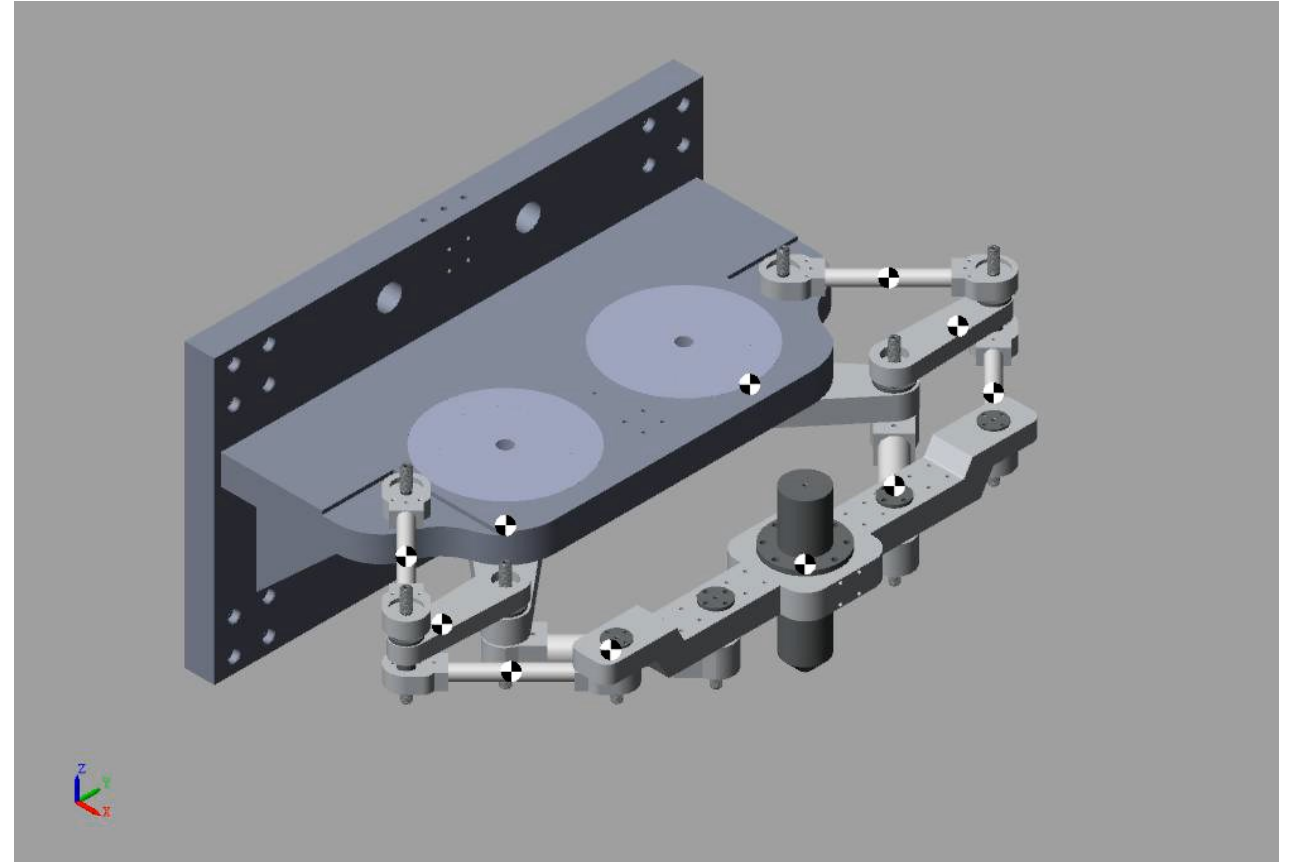
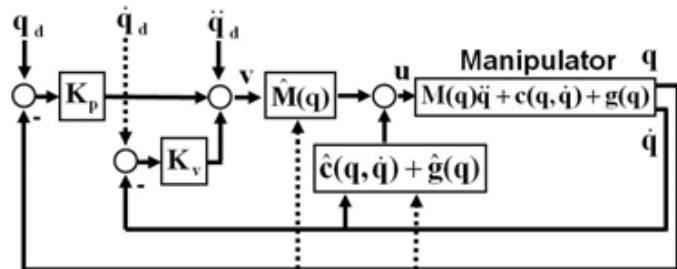
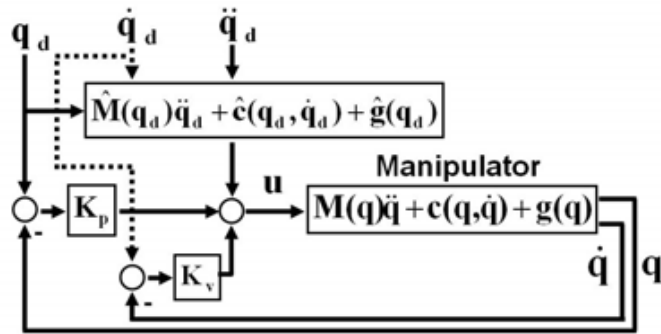
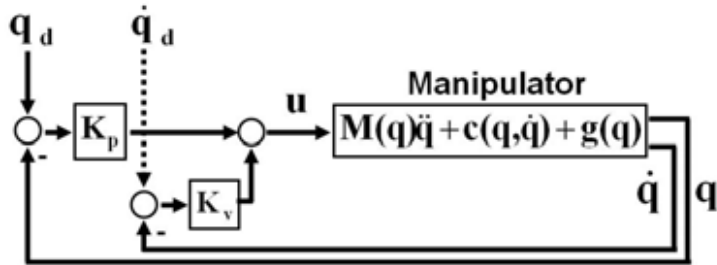


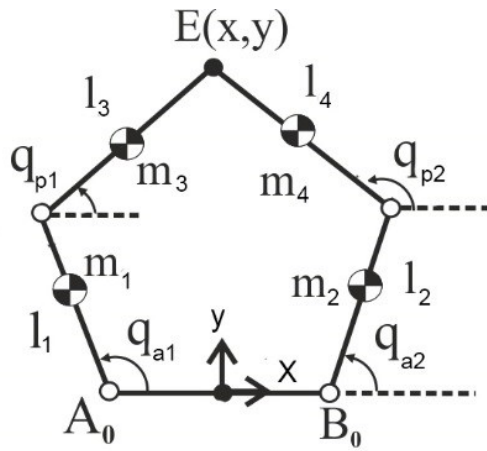
- Simülasyon #2
Ters Dinamik Model ile Açık Çevrim Denetim

$$u = M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)$$



Ters Dinamik Model Bazlı Denetleyiciler





$$\tau = M(q)\ddot{q}_a + N(q, \dot{q})\dot{q}_a + G(q)$$

Modelin bilindiği durum için denetleyici

$$W \triangleq M \frac{d}{dt} (J^{-1})(\dot{x}_d + \alpha e) + M(J^{-1})(\ddot{x}_d + \alpha \dot{e}) + N(J^{-1})(\dot{x}_d + \alpha e) + G$$

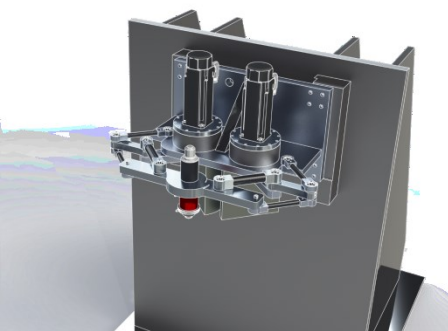
$$\tau = W + K_r r + J^T e$$

Uyarlamalı denetleyici

$$W = Y\phi$$

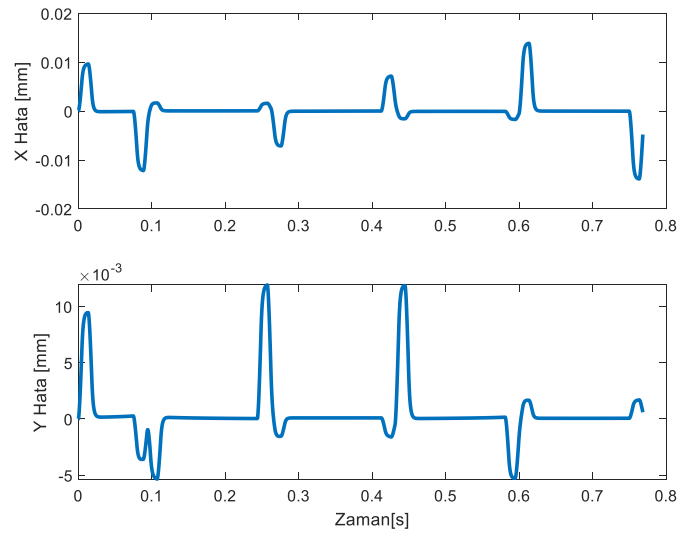
$$\hat{\phi} = [m_1 \quad m_2 \quad m_3 \quad m_4 \quad I_1 \quad I_2 \quad I_3 \quad I_4]$$

$$\tau = Y\hat{\phi} + K_r r + J^T e$$

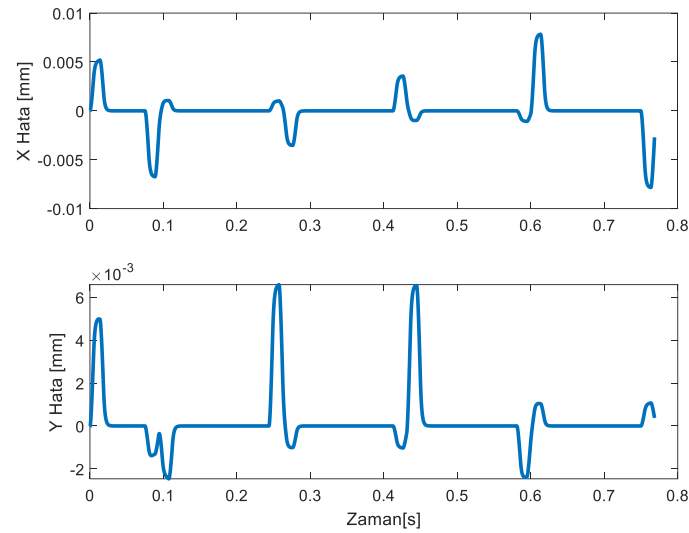


Ters Dinamik Model ile Denetim

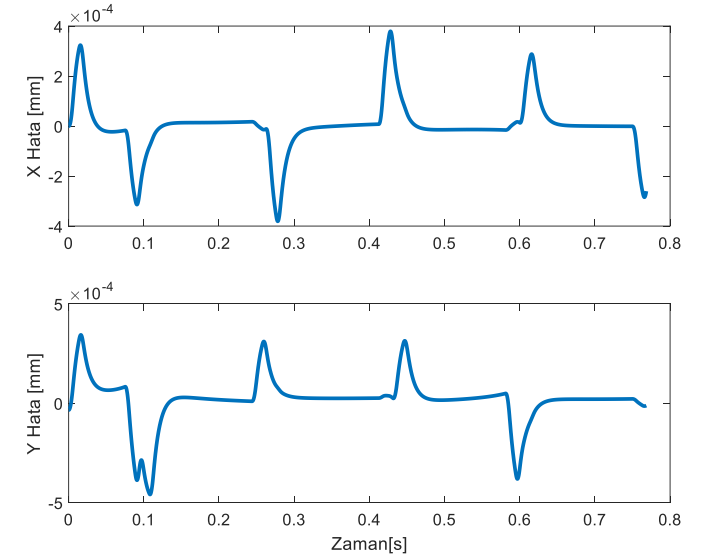
Katmanlı PD



Hesaplamalı tork methodu



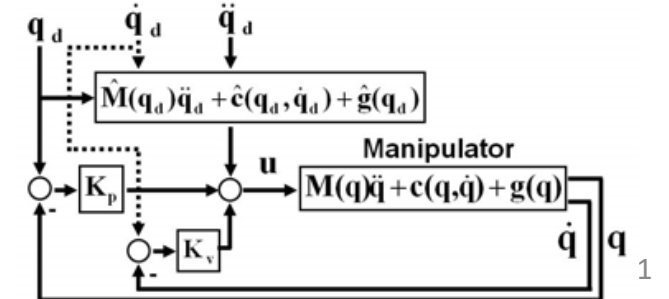
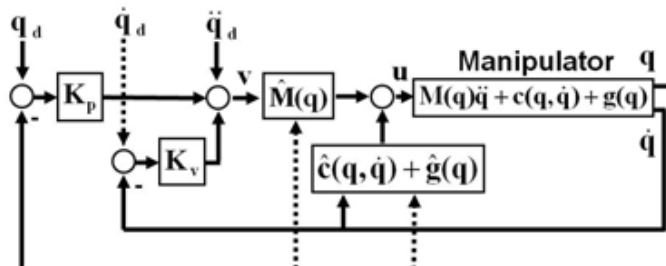
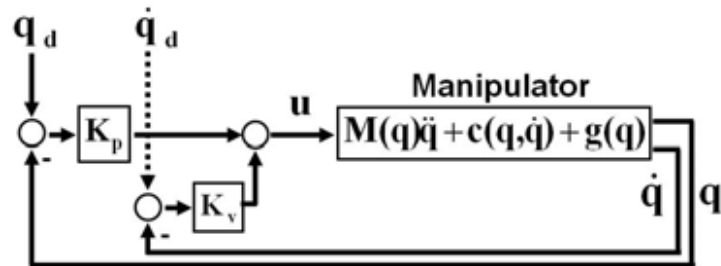
Pasifliğe dayalı



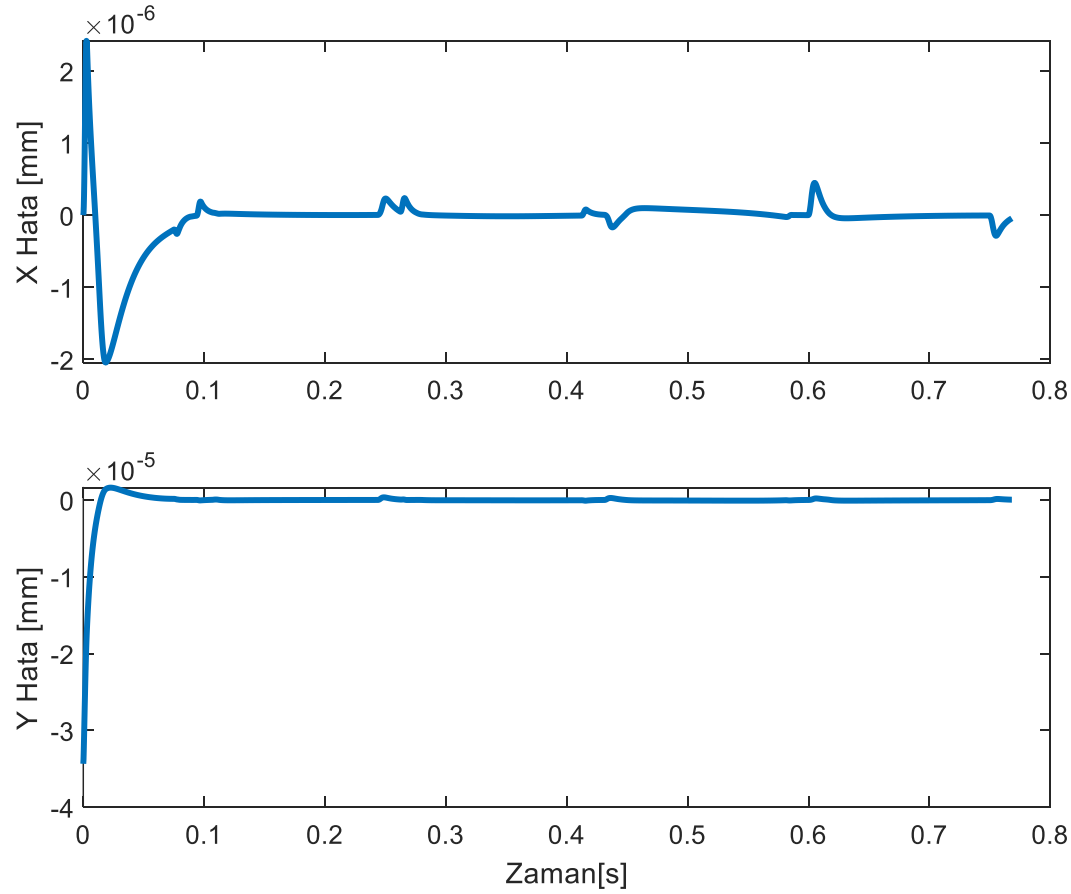
Maksimum hata: 13.9 μm

7.8 μm

0.38 μm



Uyarlamalı Denetleyici ile



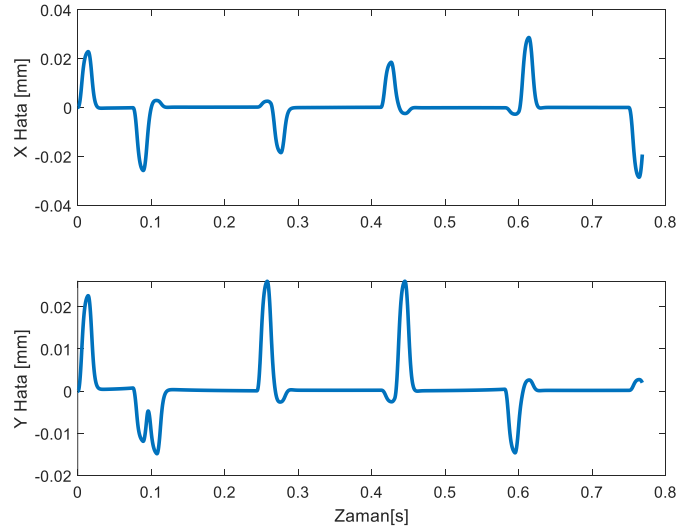
Maksimum hata: 0.0344 μm

$$\hat{\phi}_i = [m_1 \quad m_2 \quad m_3 \quad m_4 \quad I_1 \quad I_2 \quad I_3 \quad I_4]$$

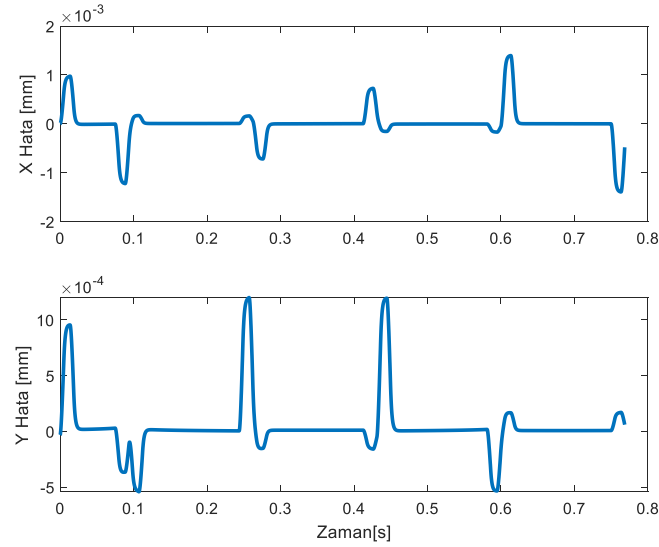
Ters Dinamik Model ile Denetim

Bozucu etken olarak $[m_1 \ m_2 \ m_3 \ m_4 \ I_1 \ I_2 \ I_3 \ I_4]*0.9$

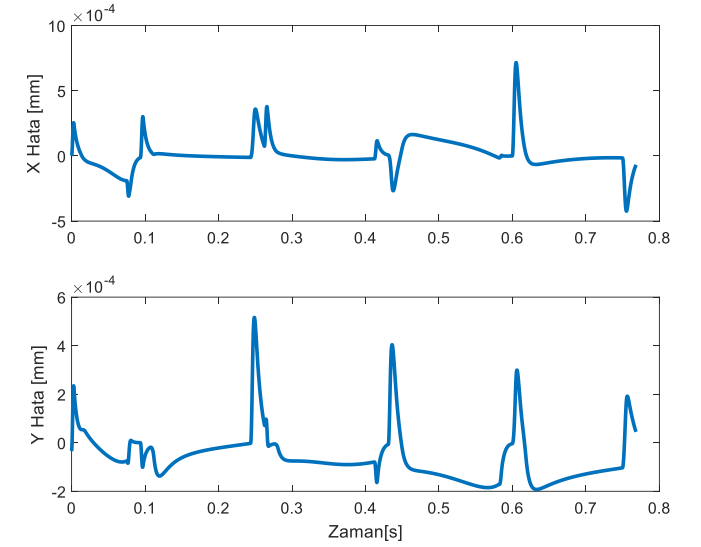
Hesaplamalı tork methodu



Pasifliğe dayalı



Uyarlamalı denetleyici



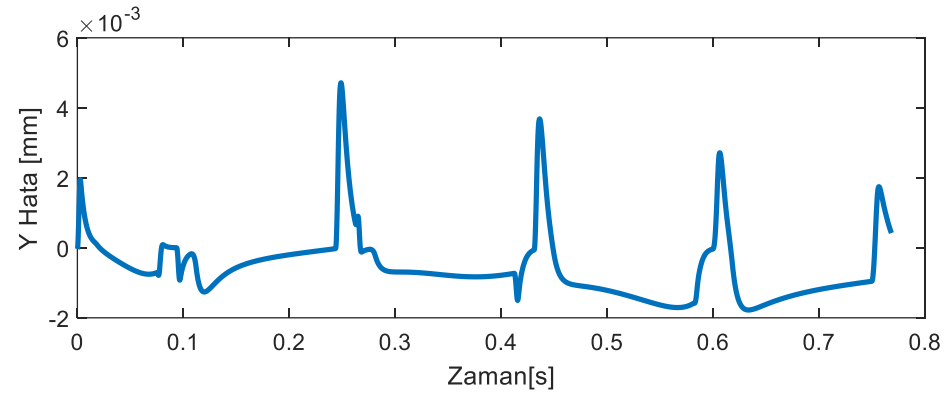
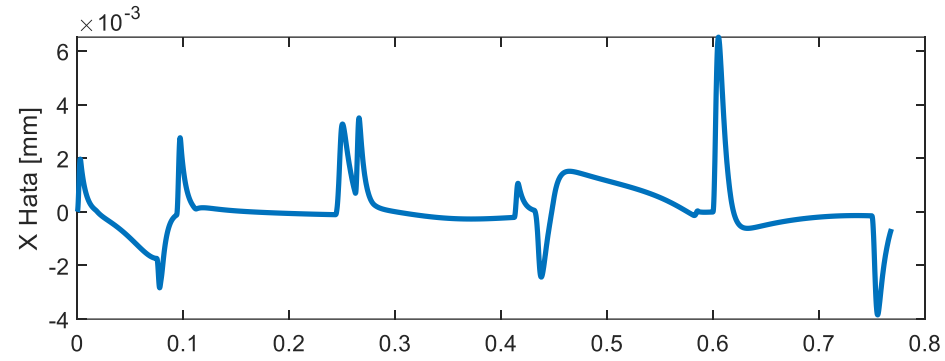
Maksimum hata: 28.6 μm

1.4 μm

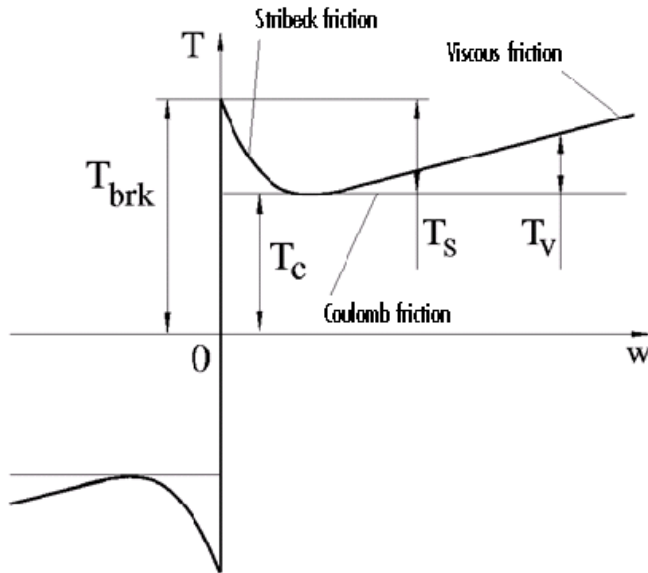
0.7165 μm

Uyarlamalı Denetleyici ile Platform yükünün bilinmediği durum

- Maksimum hata $6.5 \mu\text{m}$



Ters Dinamik Model ile Denetim Bozucu etken olarak mafsal sürtünmeleri



$$T = \sqrt{2}e \left(T_{brk} - T_c \right) \cdot \exp \left(- \left(\frac{\omega}{\omega_{St}} \right)^2 \right) \cdot \frac{\omega}{\omega_{St}} + T_c \cdot \tanh \left(\frac{\omega}{\omega_{Coul}} \right) + f\omega$$

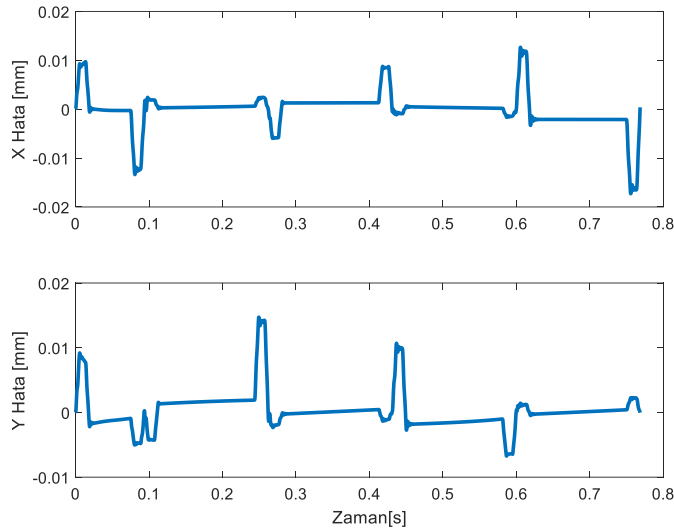
$$\omega_{St} = \omega_{brk} \sqrt{2}$$

$$\omega_{Coul} = \omega_{brk} / 10$$

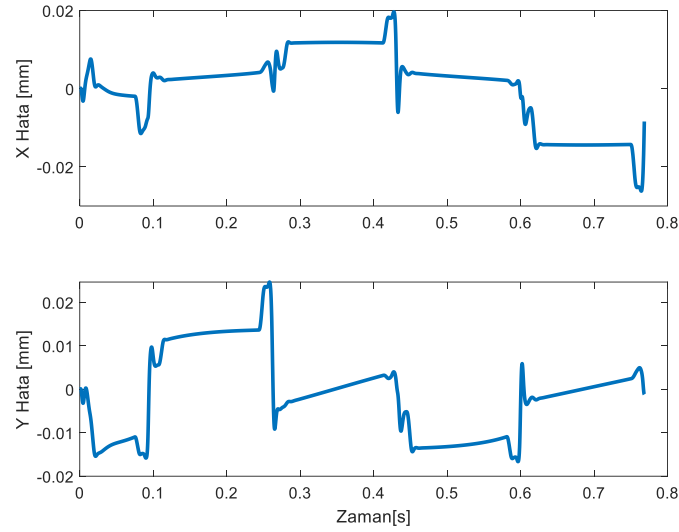
$$\omega = \omega_R - \omega_C$$

Ters Dinamik Model ile Denetim

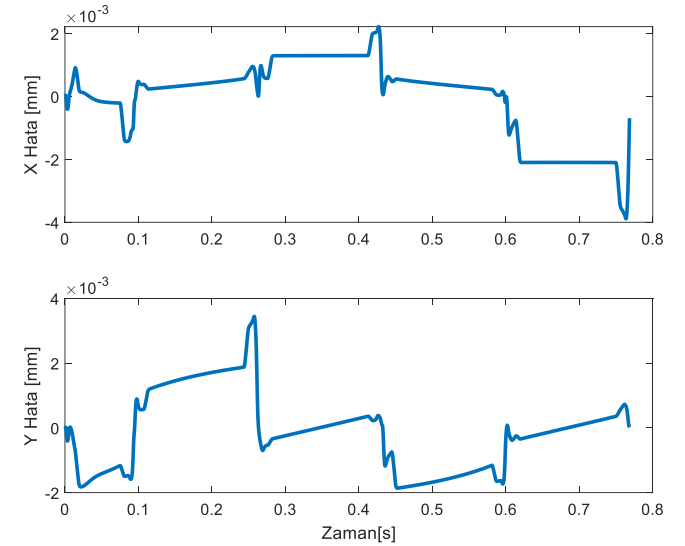
Katmanlı PD



Hesaplamalı tork methodu



Pasifliğe dayalı



Maksimum hata: 17.3 μm

24.7 μm

3.9 μm

