

Özel Bir Tür Artıksılık: Makro-Mikro Manipülasyon

Doç. Dr. M. İ. Can Dede

Makine Mühendisliği Bölümü
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

İçerik

1. Robot Manipülatörlerinde Kinematik Artıksılık
2. Makro-Mikro Manipülasyon Kavramı
3. Düzlemsel Lazer Kesim Tezgahı Çalışması
 - A. Motivasyon
 - B. Ana ve Yerel Mekanizma Tasarımı
 - C. Dinamik Dengeleme
 - D. Mafsal Boşluklarının Uç Noktası Hatasına Katkısı
 - E. Yörünge Planlama Algoritmaları
4. Paralel Mekanizmanın Saklı Robotu
5. Yerel Mekanizma Kalibrasyon Çalışmaları
6. Sonuçlar

2

1. Robotlarda Kinematik Artıksılık

Kinematik olarak artıksıl robot ne demektir?

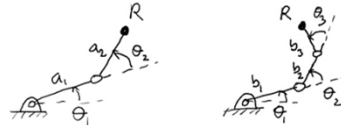
- 1. Tanım: $\bar{p} \in \mathcal{R}^6$ ve $\bar{q} \in \mathcal{R}^n$ için eğer $n > 6 \rightarrow$ Kinematik artıksılık

$$\bar{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}$$



- 2. Tanım: $\bar{p}_t \in \mathcal{R}^{n_t}$ ve $\bar{q} \in \mathcal{R}^n$ için eğer $n > n_t \rightarrow$ Kinematik artıksılık

$$\bar{p}_t = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$



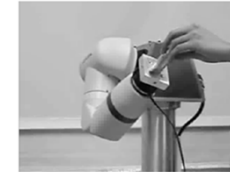
3

1. Robotlarda Kinematik Artıksılık

Artıksılık görev tasarımına, aynı birincil görevi yapmak için sonsuz sayıda olasılık sağlıyor \rightarrow görev tasarımcısı belirlenen kısıtlara göre en iyi çözümü seçebilir

$$\bar{p} = \bar{f}(\bar{q}) \rightarrow \bar{q} = \bar{f}^{-1}(\bar{p})$$

- **Öz hareket (Ing: self motion)** robotun birincil görevini yapmasına engel olmadan ikincil görevin(lerin) gerçekleştirilmesi (Nakamura 1991).

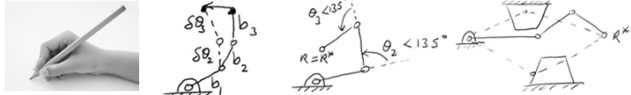


Nakamura's Lab, Uni Tokyo

4

1. Robotlarda Kinematik Artıksılık

Artırılmış Kontrol Kalitesi	Kontrol Ayrışması	Mafsal Kısıtı Aşılması	Engelden Kaçınma
-----------------------------	-------------------	------------------------	------------------



Kinematik artıksılık çözüm algoritmaları:

- Jakobi matrisi temelli çözümüm

$$\dot{p}_{n_t \times 1} = \hat{J}_{n_t \times n}(\dot{q}_{n \times 1}) \rightarrow \hat{J}^{\#}_{n \times n_t} = \hat{J}^T(\hat{J}\hat{J}^T)^{-1} \rightarrow \hat{J}^{\#}_{ağırlıklı} = \hat{W}^{-1}\hat{J}^T(\hat{J}\hat{W}^{-1}\hat{J}^T)^{-1}$$

5

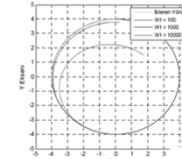
1. Robotlarda Kinematik Artıksılık

$$V_x = V_1 \cdot \sin\theta - V_3 \cdot \sin\theta - V_2 \cdot \cos\theta + V_4 \cdot \cos\theta$$

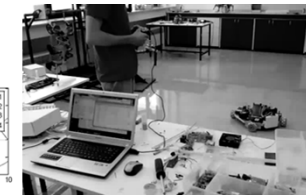
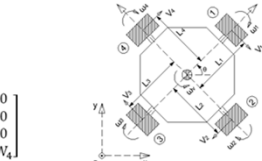
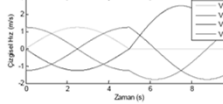
$$V_y = -V_1 \cdot \cos\theta + V_3 \cdot \cos\theta - V_2 \cdot \sin\theta + V_4 \cdot \sin\theta$$

$$\omega_z = -(V_1 + V_2 + V_3 + V_4)/L$$

$$\hat{W} = \begin{bmatrix} W_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_4 \end{bmatrix}$$



O. N. Şahin, M. İ. C. Dede "Dört-Tekerlekli Çok-Yönlü Uzaktan Kontrol Edilen Bir Mobil Robot için Hata Telifisi", 17. Uluslararası Katılımlı Makine Teorisi Sempozyumu, İzmir, pp. 739-745, Haziran 14-17, 2015.



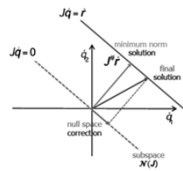
6

1. Artıksılık Çözüm Algoritması

Kinematik artıksılık çözüm algoritmaları:

- Sıfır uzayı (İng: Null space) çözümleri

$$\dot{q} = \hat{J}^{\#}\dot{p} + (\hat{I} - \hat{J}^{\#}\hat{J})\dot{q}_0 \rightarrow \hat{J}\dot{q}_0 = \bar{0}$$



Hız seviyesinde artıksılık çözümünü yaklaşımları kullanarak farklı ikincil görevlerin gerçekleştirilir:

- Tekillikten kaçınma (Yoshikawa 1984)
- Eklem hızlarının en aza indirilmesi (Seraji 1991)
- Engelden kaçınma (Chen et al., 2002)
- Mafsal sınırlarından kaçınma (Taticioğlu et al., 2009)

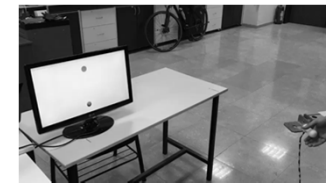
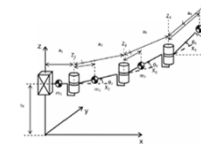
7

1. Artıksılık Çözüm Algoritması

IRL SHAD robotunun artıksılık çözüm algoritmaları:

- Engelden (insandan) kaçınma
- En az sabit kuvvet iletme

M. Kanık, G. Berker, O. W. Maarof, O. E. Uzunoğlu, M. İ. C. Dede "Admittans Yapısında Kinematik Olarak Artıksıl Haptik Ana Sistem Tasarımı", 18. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu, Trabzon, pp. 177-184, Temmuz 5-8, 2017.



8

2. Makro-Mikro Manipülasyon

RoManSy 2014, Moskova, Rusya

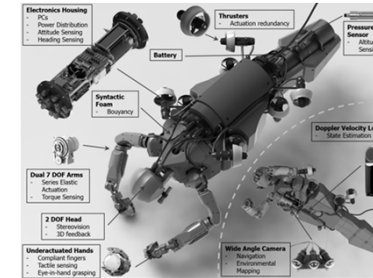
E. Uzunoğlu, M. İ. C. Dede, G. Kiper, E. Mastar, T. Sığirtmacı "Trajectory Planning of Redundant Planar Mechanisms for Reducing Task Completion Duration," *Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators Mechanisms and Machine Science*, Marco Ceccarelli and Victor A. Glazunov (Eds.), Volume 22, pp 215-223 Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2014 (ISBN: 978-3-319-07057-5).



9

2. Makro-Mikro Manipülasyon

Prof. O. Khatib'in grubu tarafından çalışılan «THE RED SEA ROBOTIC EXPLORATORIUM»



10

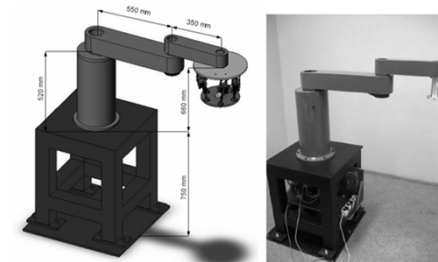
2. Makro-Mikro Manipülasyon

- Makro-Mikro mekanizmalar ile ilgili ilk çalışma 1994'te N. I. Marzwell ve arkadaşları tarafından
 - Makro-mikro robot kollu ameliyat robotu
 - Mikro mekanizma ile yüksek frekans bandında hassas kuvvet denetimi
 - Makro mekanizma ile kaba konumlandırma

11

2. Makro-Mikro Manipülasyon

- Prof. Hira Karagülle (D.E.Ü.) grubu tarafından çalışılan ameliyat robotu



12

3.A. Makine Endüstrisinin İhtiyacı

Genel olarak

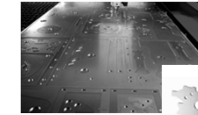
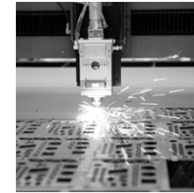
- İş tamamlama hızının sürekli olarak azaltılma ihtiyacı
- Enerji tüketiminin azalması
- Olası çözüm: düzlemsel çalışmalarda iş tamamlama süresini en aza indirmek için kinematik artıksılığı kullanmak
 - Fazladan serbestlik derecelerinin avantajının iş uzayında yüksek ivmeli hareketler elde etmek için kullanılması
 - Yüksek ivmeli hareket eden kütlelerin azaltılması

13



3.A. İşin Tanımı

- Lazer kesim makinalarında en yüksek kesim hızı **lazer gücü** → kesilecek parçanın **malzemesi ve et kalınlığına** bağlı.
- Bununla beraber en yüksek kesme hızına çıkış süresi sabit bir kesme hızı için önem kazanır:
 - Karmaşık ve keskin köşeli kesimlerde, kesim süresi ana olarak konturlar arasındaki geçiş süresi ile belirlenmektedir



14



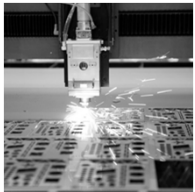
3.A. İşin Tanımı

Cözüm:

Yüksek ivme performansı → keskin köşelerde ve konturlarda zaman kaybı azaltılabilir

Sorun:

Büyük çalışma alanına sahip ve **yüksek ivme** değerleri → eyleyicilerde **yüksek kuvvet/tork** gereksinimleri

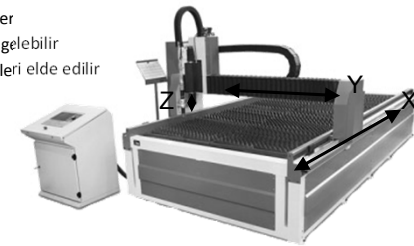


15



3.A. Geleneksel Makinaların Sorunları

- Geleneksel lazer kesim makinalarının dinamik performansları **yüksek ivme** değerlerine ulaşıldığında oluşan **ataletsel kuvvetlere** bağlı **mekanik titreşimler** yüzünden sınırlanmaktadır.
 - Yüksek genlikli titreşimler
 - Fiziksel hasar meydana gelebilir
 - Düşük hassasiyet değerleri elde edilir



16

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.A. Yüksek İvme Değerleri için Makro-Mikro Manipülasyon

- Ana Mekanizma (Makro)
 - Sınırlı ivme kabiliyetine sahip
 - Büyük çalışma alanı
- Yerel Mekanizma (Mikro)
 - Düşük çalışma alanı
 - Ana mekanizma üzerine monte
 - Yüksek ivme kabiliyeti

17

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.A. Yüksek İvme Değerleri için Makro-Mikro Manipülasyon

- İki ayrı mekanizmadan oluşur
 - İki mekanizmanın avantajlarını kullanır
 - Makro mekanizmanın çalışma alanı
 - Mikro mekanizmanın yüksek dinamik performansı

18

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.A. Düzlemsel Makro-Mikro Manipülasyon Tezgahları

- ©Prima Sincrono
- Hareket eksenleri XY+xy
- 6g ivme

©Prima

19

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.A. Düzlemsel Makro-Mikro Manipülasyon Tezgahları

- ©Salvagnini L5
- Hareket eksenleri X+yq
- PRRRP mekanizma tipi
- 5g ivme

©Salvagnini

20

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.A. Kinematik olarak Artıksıl Düzlemsel Lazer Kesim Tezgahları

Yürütücü	: Dr. Mehmet Ismet Can Dede
Araştırmacılar	: Dr. Gökhan Kiper, Emre Uzunoğlu, Dr. Erkin Gezgin (Izmir Katip Çelebi Üniversitesi)
Kurum	: Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Program	: SANTEZ
Numara	:01668.STZ.2012-2
Proje Süresi	: 2012-2014
Proje Ortağı	: Coşkunöz, Bursa
Durum	: Tamamlandı

21

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.A. Çalışmanın Amacı

- Amacımız düzlemsel lazer kesim tezgahlarının kesim süresi performansını makro-mikro manipülasyon sistemi kullanımı ile iyileştirmek
 - En yüksek ivme: >5g
 - Hassasiyet: $\pm 30\mu\text{m/m}$
 - Tekrarlanabilirlik: $\pm 15\mu\text{m/m}$
- Kullanılan kavramın avantaj yaratacak yanları
 - Kinematik artıksılık / Makro-mikro manipülasyon
 - Paralel mekanizma kullanımı

22

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.B. Tasarım Çalışmaları

- Makinanın açılımı:
 - 2 serbestlik dereceli (SD) seri **Kartezyen mekanizma** → **Makro manipülatör**
 - 2-SD **paralel mekanizmalar** → **Mikro manipülatör**: basit dönel ve doğrusal eklemlerden oluşan 5 uzuvlu ve 5 eklemlilik mekanizmalardan birisi

23

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.B. 2-SD Paralel Mekanizma için Tasarım Çalışmaları

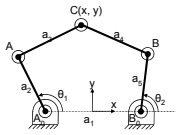
Tasarım kriterleri;

- Eyleyici sabit eklemlerde olmalı
- Eğer varsa, doğrusal eklemlerde eyleyiciler yerleştirilmeli
- Mekanizmaların ayna görüntüleri kullanılmayacak
- Denetim kolaylığı için simetrik tasarımlar tercih edilmeli.

24

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.B. Tasarım Çalışmaları-5R Mekanizması



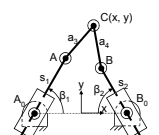
- 5R mekanizması en çok kullanılan düzlemsel paralel 2-SD mekanizmadır [Giberti et al., 2011].
- Uygulandığı alanlar:
 - Montaj robotları [Munakata, 1988],
 - Transport robotları [Shuichi, Shige, 1990],
 - Konumlandırma cihazları [Karidis et al., 1992],
 - Haptik cihaz [Hayward et al., 1994]
 - Tıbbi cihaz [Yoshino et al., 2005].
 - IBM tarafından geliştirilen ve 50g ivmelere çıkan küçük konumlandırma cihazı [Karidis et al., 1992].

- Çalışma alanı daireseldir
- Tekil noktadan geçmeden mekanizma 360 derece döndürülebilir
- Çalışma alanı nispeten geniştir

25

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.B. Tasarım Çalışmaları-PRRRP Mekanizması



- Uygulamaları
 - Battheu, [2011, 2012] PRRRP mekanizmasını ($\beta = 0^\circ$) kinematik olarak artıksıl düzlemsel lazer kesim makinasında kullandı
 - PRRRP mekanizması ($\beta = 45^\circ$) mikro-elektrik üretim hattında paketleme ve montaj cihazı olarak kullanıldı [Li et al.2007]
 - Bir talaşlı üretim cihazında PR kinematik zinciri PRRRP ($\beta = 90^\circ$) mekanizması ile beraber kullanıldı [Wu et al. 2007]

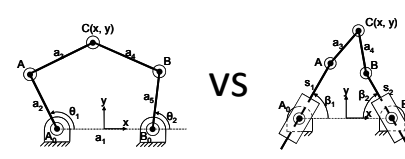
- Çoğu uygulamada, $\beta_1 = \beta_2 = \beta$.

26

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.B. Tasarım Çalışmaları- Karşılaştırma

- Aynı görev (PRRRP mekanizmasına göre) nispeten küçük bir 5R mekanizması gerçekleştirebilir [Sun, Cheung ve Lou, 2007].
- 5R mekanizmasının avantajları
 - düşük ağırlık
 - hassasiyet
 - katılık
 - daha iyi kuvvet iletimi



27

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.B. Tasarım Çalışmaları-5R Mekanizma Kavramsal Tasarımı


- İlk olarak aynı eksenini paylaşan eyleyicili sabit eksenli ve aynı uzuv boyutlu mekanizma seçildi.
- Sorunları
 - Lazer kafasının boyutları yaklaşık uzuv boyutlarına eşit
 - Lazer kafasının yönelimi sabit tutulamıyor

28

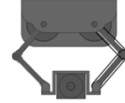
COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.B. Tasarım Çalışmaları-5R Mekanizması Kavramsal Tasarımı


- Sorunları ortadan kaldırmak için alternatif tasarımlar üzerinde çalışıldı



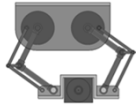
- Lazer kafası 3. eksen eklemine yerleştirilmiş



- Kayış kasnak eklenerek değiştirilmiş 6R



- Lazer kafa ön uzva sabitlenmiş.



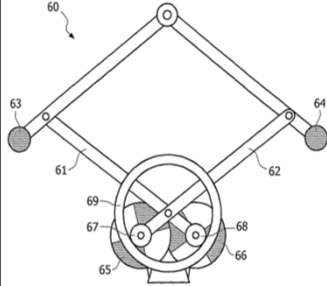
- Paralelkenar devreler eklenerek değiştirilmiş 6R

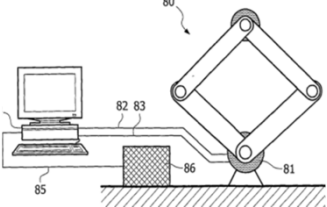
29

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.C. Dinamik Dengeleme

- Dinamik dengeleme aktif veya pasif olarak gerçekleştirilebilir.





30

Menschaar, H. F., Ariens, A. B., Herder, J. L., Bakker, B. M. (2006). Five-Bar Mechanism With Dynamic Balancing Means and Method for Dynamically Balancing a Five-Bar Mechanism. Patent no: WO 2006/080846A1

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.C. Dinamik Dengeleme

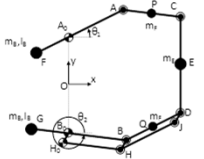
- Sistemimiz için pasif kuvvet/moment dengeleme çözümü
- Hesaplamlarda tamamen dengelenmiş bir sistem için sonlandırıcı ağırlığının 9 katı kadar daha ağırlık eklenmesi gerektiğini gösterdi.
- Dengeleme tüm sistem hassasiyetini iyileştirir \leftrightarrow fazladan ağırlık sistemi dinamikliğini azaltır.

$$m_x \vec{r}_x + m_y \vec{r}_y + m_z \vec{r}_z = m_x \vec{r}_x + m_y \vec{r}_y + \vec{0} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \vec{r}_x &\rightarrow ia/2 + re^{i\theta} + re^{i\theta} - ia/2, \vec{r}_y \rightarrow ia/2 + re^{i\theta} + (r/2)e^{i\theta}, \\ \vec{r}_z &\rightarrow -ia/2 + re^{i\theta} + (r/2)e^{i\theta}, \vec{r}_y \rightarrow ia/2 - be^{i\theta} \text{ and } \vec{r}_z \rightarrow -ia/2 - be^{i\theta} \\ \Rightarrow (m_x + 1.5m_y - bm_y)(e^{i\theta} + e^{i\theta}) &= 0 \quad (2) \end{aligned}$$

$$rm_x + 1.5m_y - bm_y = 0 \quad (3)$$

$$b < r/2, \rightarrow m_b > 2m_x + 1.5m_y \quad (4)$$



$|OA_2| = |OB_2| = |CE| = |DE| = a/2$
 $|A_1A_2| = |B_1B_2| = |AC| = |BD| = r$
 $|A_1F| = |B_1G| = b$
 $|B_1H_1| = |B_1H_2| = |DI|$
 $\angle A_1B_1H_2 = \angle CCD$

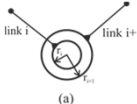
- Dinamik analizler sonucunda tamamen dengelenmiş sistemin motor tork gereksinimlerinin 2~2.5 kat arttığı hesaplanmıştır.
- Kısmi dengeleme de mümkündür sorusunun cevabı \rightarrow **116M272**

31

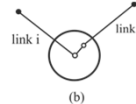
COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.D. Mafsal Boşluklarının Uç Noktası Hatasına Katkısı

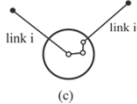
- Mafsal boşluğu modellenmesinde genel bir yaklaşım boşluk miktarı için bir belirli bir yarıçap bırakıp onun içinde çalışacak bir uzuv ile boşluk değişimini modellemektedir.



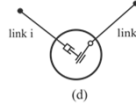
(a)



(b)



(c)



(d)

(a) Mafsal boşluğu; (b) 2R modeli; (c) 3R modeli; (d) PPR model

32

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.D. Mafsal Boşluklarının Uç Noktası Hatasına Katkısı

- Bu modelde, ilk olarak mafsal içi çarpışma anı bulunur, sonra ortaya çıkan tepki kuvvetlerine göre mafsal boşluğu modelindeki prizmatik eksenler hareket ettirilir.



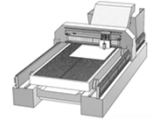
- Mafsal boşlukları 0.01 mm olarak alındı → Benzetim testleri sonucunda uç noktasının istenen yörüngeden sapması en fazla 0.005 mm olarak gerçekleşti.

33

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.E. Yörünge Planlama Algoritması

- Mikro manipülatör (düşük ataletli mekanizma) yüksek ivme + Makro manipülatör düşük ivme
- Mikro manipülatörün çalışma alanı sınırları ihlal edilmemeli



34

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.E. Yörünge Planlama Algoritması

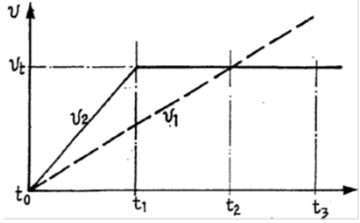
Çevrim-dışı Hareket Planlaması	Yarı Çevrim-içi Hareket Planlaması
<ul style="list-style-type: none"> Algoritma 1 – Hız seviyesinde 	<ul style="list-style-type: none"> Algoritma 2- Geometrik Çıkarım Algoritma 3- Filtreleme ile Çıkarım

35

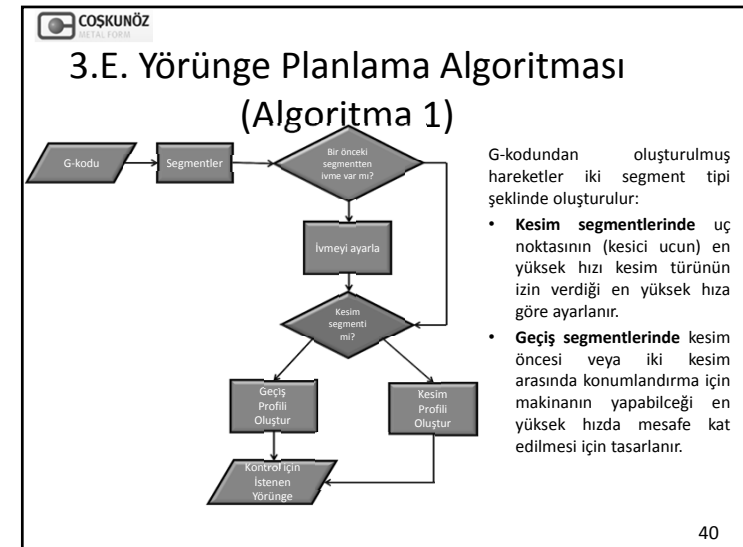
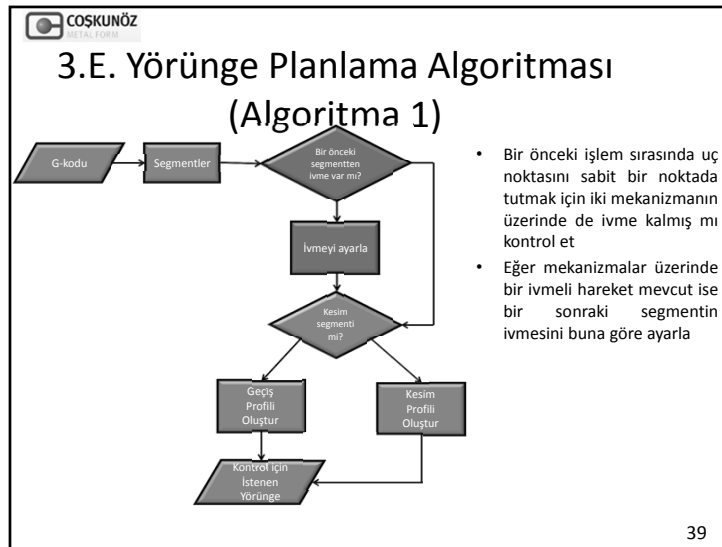
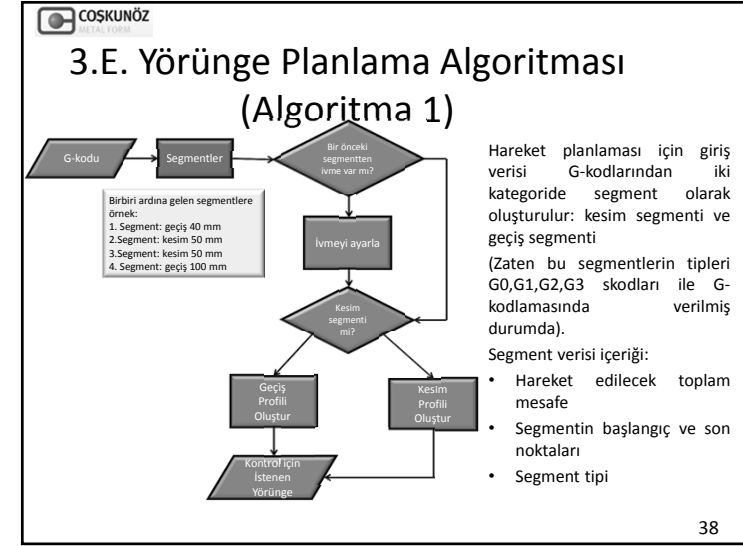
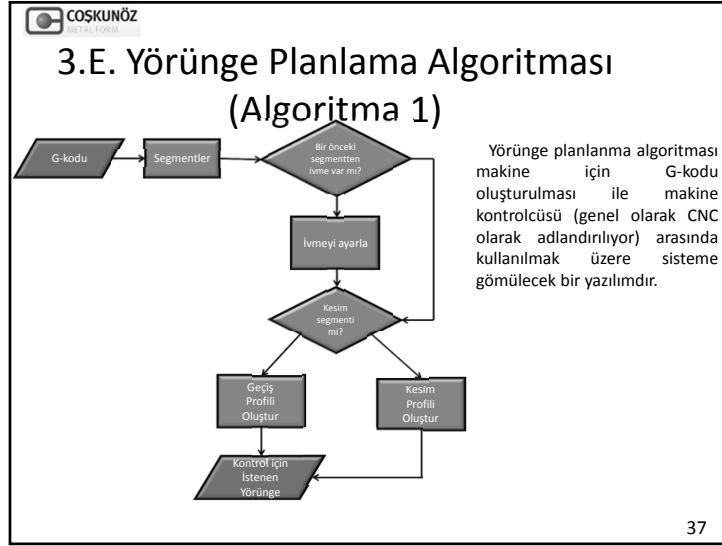
COŞKUNÖZ
METAL FORM

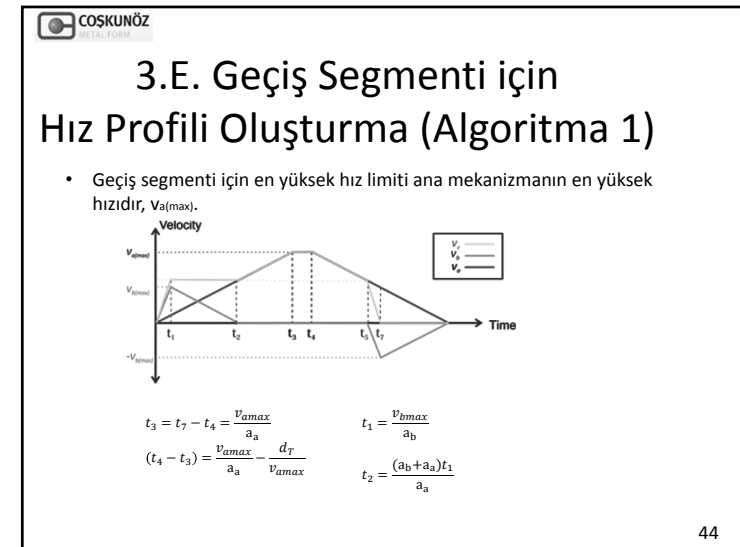
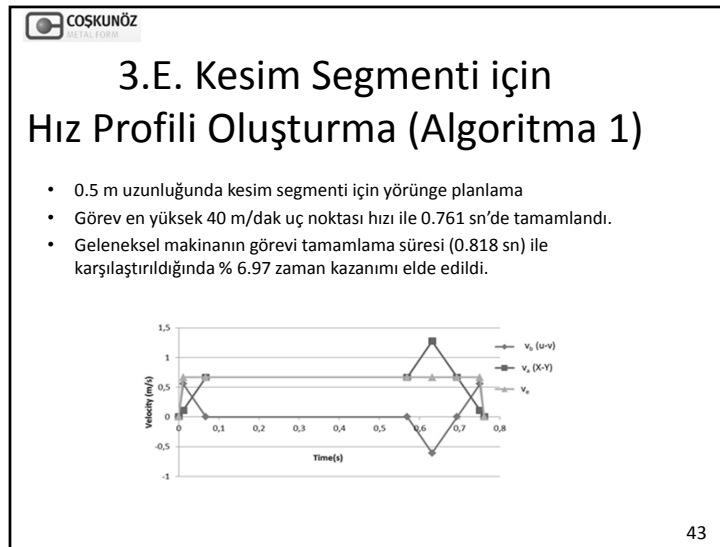
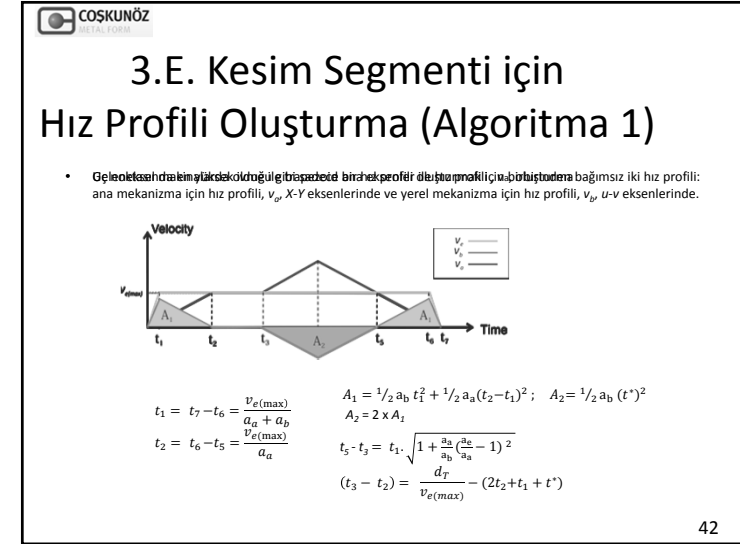
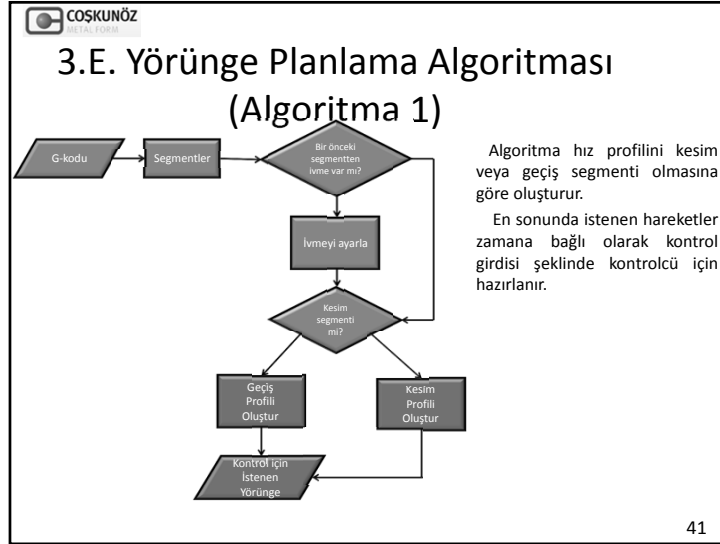
3.E. Yörünge Planlama Algoritması (Algoritma 1)

- Uç noktası hız profili trapezoid hız profilinde olacak ve istenen hıza en hızlı ulaşacak şekilde tasarlanmıştır (Sartorio 2004).



36





3.E. Geçiş Segmenti için Hız Profili Oluşturma (Algoritma 1)

- 0.5 m uzunluğunda geçiş segmenti için yörünge planlama
- Görev en yüksek 132.88 m/dak uç noktası hızı ile 0.4515 sn'de tamamlandı.
- 0.17 sn zaman tasarrufu var. Bu ölü zaman bu segmenti takip eden kesim segmentinde kesime başlama için kullanılabilir.

45

3.E. Yarı Çevrim-içi Hareket Planlaması

- ivme değişimi sınırlanmış son-eyleyici yörüngesi
- Makro manipülatör için minimum ivmeli sürekli hareket
- Mikro manipülatörü hareket istekleri → Çerim-içi olarak hesaplanır → son eyleyici yörüngesi - gerçek zamanlı ölçülen makro manipülatörün konumu

46

3.E. Yarı Çevrim-içi Hareket Planlaması

Makro manipülatörün hareketi son eyleyici yörüngesinden elde edilir

Geometrik Yaklaşımlar

iz planlaması makro ve mikro manipülatörlerin kısıtları ele alınarak hesaplanır

Sayısal Yaklaşımlar

Polinom/eğri uydurma, filtreleme

47

3.E. Yarı Çevrim-içi Hareket Planlaması

Seçim için kritik hususlar:

- Hesaplama verimi ve gerekli hafıza kapasitesi
- Öngörülebilirlik (yaklaşımdan uzaklaşma) ve hassasiyet (son konumuna göre aşma)
- Esneklik (işlemi durdurma-başlatma, delik-açma zamanı,...)
- Hareketin sürekliliği

48

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.E. Kontur Şekillendirme ile Yarı Çevrim-içi Hareket Planlaması

- ➔ Önerilen yöntem mikro manipülâtörün çalışma alanı kısıtlarını göz önüne alır
- ➔ Son-eyleyicinin yörüngesi eniyenir
- ➔ Makro manipülâtör için sürekli hareket elde edilir
- Ramer-Douglas and Pecker algoritması [10], [11]

49

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.E. Kontur Şekillendirme ile Yarı Çevrim-içi Hareket Planlaması

- a) Son-eyleyici için yörünge
- b) Başlangıç ve son noktalar birleştirilir ➔ d_{max} hesaplanır
- c) Algoritma P_5 noktasını dışarı atar ve P_1, P_2 and P_3 noktalarına olan mesafeleri ölçer
- d) Algoritma P_4 noktasını dışarı atar ve P_1 and P_2 noktalarına olan mesafeleri ölçer
- e) P_1 noktasının $\overline{P_0P_2}$ doğrusuna mesafesi belirlenen çalışma alanı toleransının altında ➔ İlk eksiltme P_1 noktası ile yapılır
- f) $P_2 - P_5$ arası noktalar $\overline{P_2P_5}$ doğrusuna mesafesi bakımından incelenir
- g) Köşe yumuşatması çalışma alanı sınırlarına uygun şekilde yapılır ➔ $P_0P_2P_5$
- h) G-kodları ile yaratılacak segmentler mavi renkle işaretli

50

COŞKUNÖZ
METAL FORM

3.E. Örnek Çalışma (Algoritma 2)

- Makro manipülâtörün ivme sınırı: 9.81 m/s^2
- Son-eyleyici ivme sınırı: 49.05 m/s^2
- Son-eyleyici hız sınırı: 40 m/min

51

COŞKUNÖZ
METAL FORM

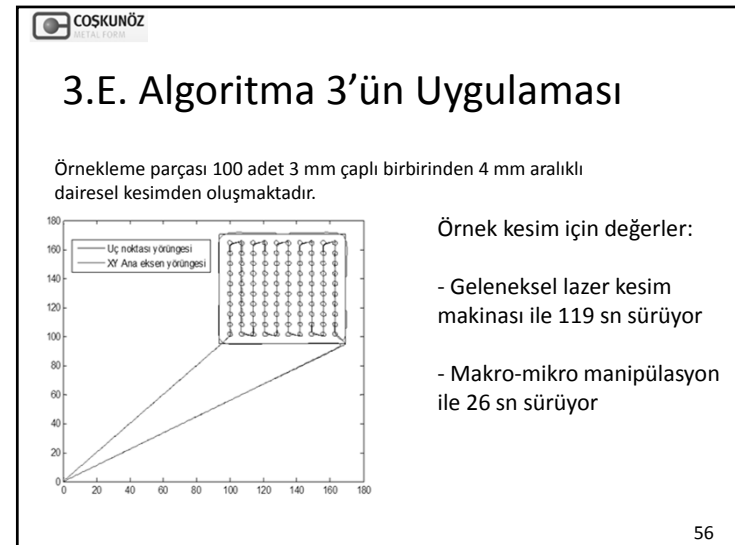
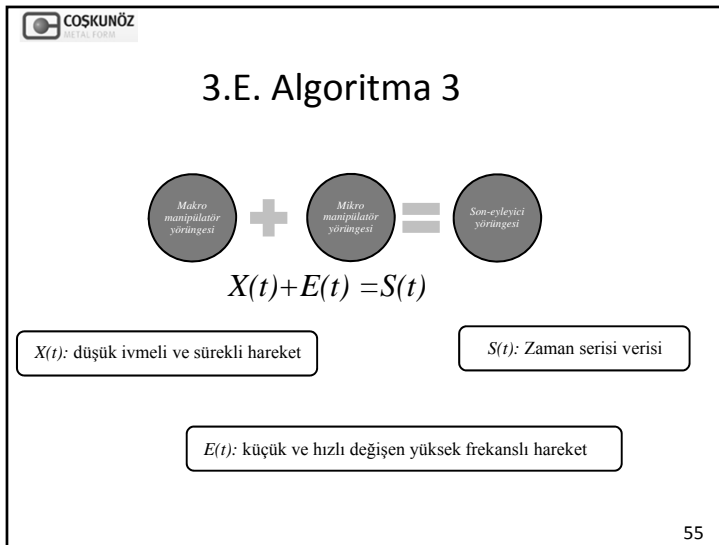
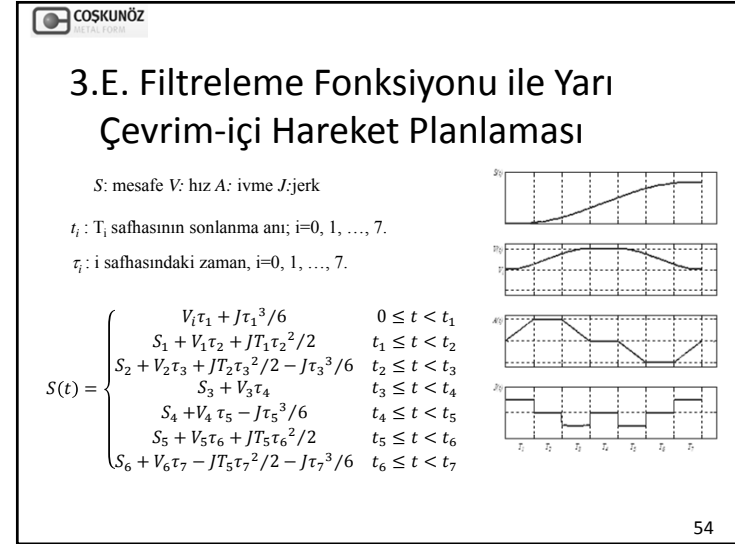
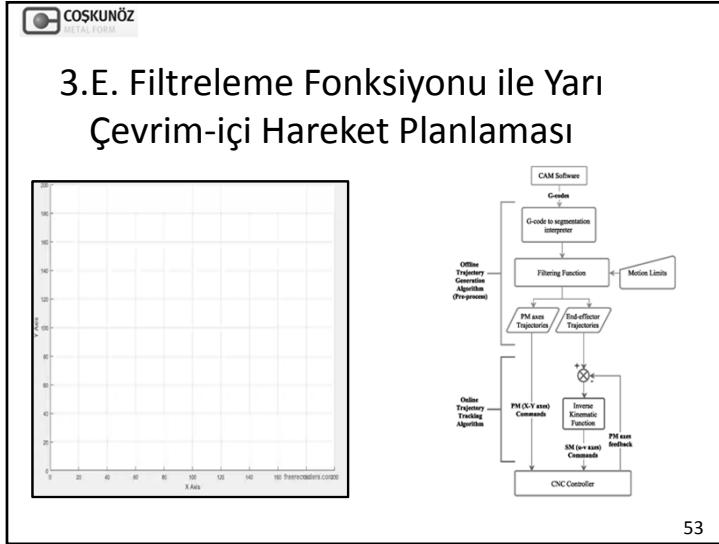
3.E. Algoritma 2 Sonuçları

- Örnek çalışma için görev tamamlama süresi %20.41 azaltılmış (son-eyleyicinin 9.81 m/s^2 ivme sınırı ile çalıştığı duruma göre)
- Mikro manipülâtörün hareketinin çevrim-içi hesaplanması işlemin hassasiyetini artırabilir

Sorunlar

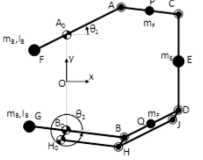
- Yüksek hesaplama yükü
- Şekle bağlı ➔ iki yörüngenin senkronize olmasında zorluk var

52



4. Saklı Robot Kavramı

- **Saklı robot:** Gerçek robotun kinematığından daha **basit / analitik denklemlerle** ifade edilebilir bir kinematik yapıya sahip sanal bir robot yapısının gerçek robotun denetim algoritması içerisinde çalıştırılması hedeflendi
- Bütün hareketli **uzuv boyutları eşit** uzunlukta
- Mobil platform ve sabit platform uzuv boyutları da birbiri ile eşit uzunlukta

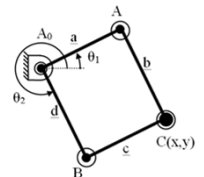


$$\begin{aligned} |OA_0| &= |OB_0| = |CE| = |DE| = a/2 \\ |A_0A| &= |B_0B| = |AC| = |BD| = r \\ |A_0F| &= |B_0G| = b \\ |B_0H_0| &= |BH| = |DI| \\ \angle A_0B_0H_0 &= \angle CDJ \end{aligned}$$

57


4. Saklı Robot Kavramı

- Seçilen mekanizma aşırı-kısıtlı bir mekanizma olduğu için analitik ters kinematik çözümü mevcut değil
 - iki sabit eksen arası uzaklık ve mobil platformun iki eksen arası uzaklık sıfır olarak kabul edildi
 - paralelkenar devreleri çıkarıldığında C noktasının konumu değişmiyor



58


5. Kalibrasyon Gereksinimi



- Mekanizma parçaları üretildi
- Uzuv boylarının ölçümleri alındı
- Mekanizma montajı tamamlandı ve yeniden CMM ölçümleri yapıldı

59

5. Kalibrasyon Gereksinimi



- Uzuvların montaj öncesi ve sonrası ölçümleri farklı
- Ortalama bir değere göre kinematik hesaplama yapıldığında çalışma alanında yapılan hatalar da farklı
- Uzuv boyutlarındaki hatalar 0.1 mm'den küçük → Uç noktası hataları 1.5 mm civarında ???

60

5. Kalibrasyon Çalışmaları

- İlk ölçümler FARO ION (hassasiyet $\pm 20 \mu\text{m}$) lazer interferometre ile ölçümler yapıldı
 - Sıfır noktasını ayarla
 - İstenen noktayı gir
 - Ters kinematığı çalıştır
 - Motorları sür
 - Ölçümü al
- Elde edilen ölçümlere göre uzuv boyutları iterasyona sokuldu
 - Bütün çalışma alanında test edildi
 - Elde edilen en iyi değer maksimum 0.7 mm konum hatası



61

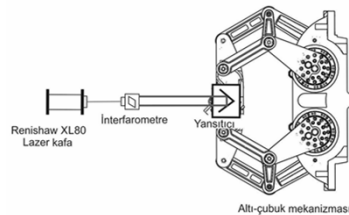
5. Kalibrasyon Çalışmaları

- Sadece uzuv boyutlarının değiştirilmesi yeterli değil
- Çalışma alanında uzuvların esneme değerleri farklı
 - Çalışma alanında 5 mm aralıklarla ölçümler alınıp hata matrisi tablosu oluşturuldu
 - Hata ters kinematikten bulunan açı değerine Jacobian matrisinin tersi kullanılarak eklendi ($\Delta\theta = \hat{j}^{-1}\Delta\vec{x}$)
 - Ölçüm noktaları arasındaki istekler için ise doğrusal yakınsama yapıldı

62

5. Kalibrasyon Çalışmaları

- Ölçümler bu sefer daha yüksek hassasiyette ölçüm yapabilen RENISHAW XL 80 cihazı ile bütün sistem için tekrarlandı



63


5. Kalibrasyon Çalışmaları



64

6. Sonuçlar

- **Türk Sanayisinde ilk defa** «Kinematik olarak artıksız düzlemsel bir lazer kesim tezgahı» üretildi
- Bilindiği kadarı ile **dünyada ilk kez** fazla-kısıtlı 6R mekanizması bir sanayi ürününde kullanıldı
- Fazla-kısıtlı mekanizmanın kontrolü ve kalibrasyonu için saklı robot yöntemini kullanan bir yöntem geliştirildi
- Yapılan kalibrasyon çalışması sonucunda toplam sistemin değerleri:
 - Maksimum ivme: 3.5 g
 - Hassasiyet: $\pm 37 \mu\text{m}/\text{m}$
 - Tekrarlanabilirlik: $\pm 26 \mu\text{m}$

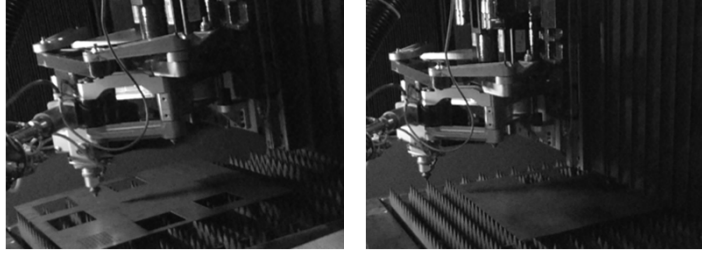


65

6. Çalışma Videoları

Geleneksel Makine Çalışması
(Sadece makro manipülatör çalışıyor)

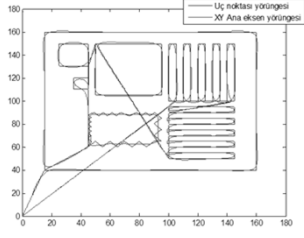

Makro-Mikro Manipülasyon Çalışması



66

6. Çalışma Videoları

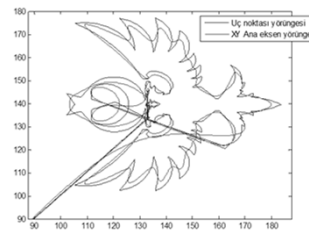
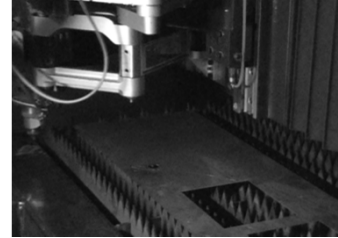
Keskin köşeli karmaşık kesimler

67

6. Çalışma Videoları

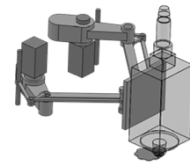
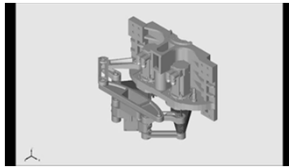
Keskin köşeli karmaşık kesimler

68

Teşekkürler

Çalışma 01668.STZ.2012-2 numaralı SanTez projesi kapsamında Coşkunöz Metal Form Endüstri ve Ticaret A.Ş. Firması ile beraber gerçekleştirilmiştir.



69

Teşekkürler

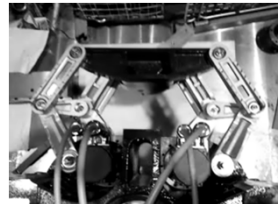
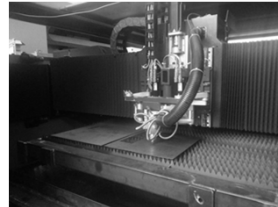
Proje Takımı

- Doç. Dr. Gökhan Kiper (YTE)
- Dr. Emre Uzunoglu (YTE)
- Ercan Mastar (Coşkunöz)



70

Dinlediğiniz için Teşekkürler




71



Kaynaklar

- Asada, H., Youcef-Toumi, K. (1984), "Analysis and Design of a Direct-Drive Arm With a Five-Bar-Link Parallel Drive Mechanism", *J. Dyn. Syst. Meas. Contr.*, Vol.106, pp 255-230.
- Alici, G., Shirinzadeh, B. (2003), "Constrained Structural Optimisation of a Revolute-Jointed Planar Parallel Manipulator", *Proceedings of IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics*, Kobe, pp 1244-1249.
- Alici, G., Shirinzadeh, B. (2004), "Optimum Synthesis of Planar Parallel Manipulators Based on Kinematic Isotropy and Force Balancing", *Robotica*, Vol.22, pp 97-108.
- Battheu, C. (2011), Manipulator of Low Inertia for Laser Cutting Machines for Flat Sheet Metals, Patent no: US201110017714.
- Battheu, C. (2012), Combined Machine for Punching and Laser Cutting of Flat Sheet Metal, Patent no: US20120097652.
- Briot, S., Bonev, L. A. (2007), "Are Parallel Robots More Accurate Than Serial Robots?", *Trans. CSM*, Vol.31, No.4, pp 445-456.
- Cervantes-Sánchez, J. J., Rendón-Sánchez, J. G. (1999), "A Simplified Approach for Obtaining the Workspace of a Class of 2-dof Planar Parallel Manipulators", *Mech. Mach. Theory*, Vol.34, pp 1057-1073.
- Feng, G., Xiao-Qiu, Z., Yong-Sheng, Z., Hong-Rui, W. (1996), "A Physical Model of the Solution Space and the Atlas of the Reachable Workspace for 2-dof Parallel Planar Manipulators", *Mech. Mach. Theory*, Vol.31, No.2, pp 173-184.
- Gattiglio, M., Sartorio, F., Chirico, M. (2008), Laser Machine Tool, Patent no: US20080197118.
- Gattiglio, M., Chirico, M. (2011), Laser Punching Machine, Patent no: US20110610.
- Giberti, H., Cinquemani, S., Ambrosetti, S. (2011), "A Geometrical Index to evaluate the Kinematical Properties of a 2 dof Parallel Kinematic Manipulator", *Proceedings of 4th Int. Multi Conf. Engineering and Technological Innovation*, Orlando, Florida, pp 1-6.
- Gonçalves, R. S., dos Santos, R. R., Carvalho, J. C. M. (2008), "On the Performance of Strategies for the Path Planning of a 5R Symmetrical Parallel Manipulator", *Proceedings of 7th Brazilian Conf. on Dynamics, Control and Applications*, Sao Paulo.
- Hanaki, T. R., Zirn, O., Ruoff, W. (2002), "2 DOF Dynamic Accuracy Monitoring for Robot and Machine Tool Manipulators", *ASPE's 17th Annual Meeting*.
- Hayward, V., Choksy, J., Larwin, G., Ramstein, C. (1994), "Design and Multi-Objective Optimization of a Linkage for a Haptic Interface", In: Lenarčić, A. J., Ravani, B. (Eds.), *Advances in Robot Kinematics and Computational Geometry*, Kluwer Academic Publishers, pp 359-368.
- He, G., Lu, Z. (2006), "Optimum Motion Planning of Parallel Redundant Mechanisms with Shaking Force Reduction", *Proceedings of IMACS Multi-conference on Computational Engineering in Systems Applications*, Beijing, pp 1132-1139.
- Isaakson, M. (2011), "A Family of Planar Parallel Manipulators", *Proceedings of 2011 IRRR Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp 2737-2744.
- Karidis, J. P., McVicker, G., Pawletko, J. P., Zai, L. C., Goldowsky, M., Brown, R. E., Comulada, R. R. (1992), "The Hummingbird Mminipositioner - Providing Three-Axis Motion at 50 g's With Low Reactions", *Proceedings of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Nice, pp 685-692.
- Leibinger, P., Rausser, T., Zeygerman, L. (2004), Laser Cutting Machine with Multiple Drives, Patent no: US20040378181.
- Li, J., Liu, Y., Sun, L. (2007), "A Novel 2-DOF Planar Parallel Robot with High Accelerate-High Precision", *Proceedings of 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, Sanya, pp 2189-2193.

72

 **COSKUNÖZ**
METAL FORM

Kaynaklar

Li, J., Liu, Y., Sun, L. (2007), "A Novel 2-DOF Planar Parallel Robot with High Accelerate-High Precision", Proceedings of 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, Sanya, pp 2189-2193.

Liu, X.J., Wang, J., Zheng, H.J. (2006), "Optimum Design of the 5R Symmetrical Parallel Manipulator with a Surrounded and Good-Condition Workspace", Rob. Auton. Syst., Vol.54, pp 221-233.

Masakata, M. (2006), Punching and Laser Composite Machine, Patent no: JP2006088214.

Morikatsu, M. (2007), Laser-Punch Composite Processing Machine, Patent no: JP2007038286.

Munakata, T. (1988), Industrial Robot, Patent no: US4730975.

Ouyang, P. R., Li, Q., Zhang, W. J. (2003), "Integrated Design of Robotic Mechanisms for Force Balancing and Trajectory Tracking", Mechatronics, Vol.13, pp 887-905.

Parenti-Castelli, V., Venanzi, S. (2005), "Clearance Influence Analysis on Mechanisms", Mech. Mach. Theory, Vol. 40, pp. 1316-1329.

Sartorio, F. (2004), Machine Tool and Manipulator Device Adapted to be Mounted on Such Machine, Patent no: US20040025761.

Schulz, W., Niessen, M., Eppelt, U., Kowalick, K. (2009), "Simulation of Laser Cutting", in: Dowden (Ed.), The Theory of Laser Materials Processing: Heat and Mass Transfer in Modern Technology, Vol.2, pp. 21-69.

Shiller, Z., Sundar, S. (1993), "Design of Multi-Degree-of-Freedom Mechanisms for Optimal Dynamic Performance", J. Mech. Des., Vol.115, 199-206.

Shulchi, T., Shige, M. (1990), Parallel Link Robot Arm, Patent no: US4946337.

Söylemez, E., (2009), Mechanisms, METU Press, 3rd Ed., Ankara.

Sun, S., Cheung, J. W. F., Lou, Y. (2007), "A Study on Five-Bar Manipulators for Semiconductor Packaging Applications", Proceedings of IEEE Int. Conf. Mechatronics and Automation, Harbin, pp 1811-1816.

Taisuke, H. (2009), Combined Processing Machine for Laser Beam-Punch Machining, Patent no: JP2009018334.

Tsal, M.-J., Lai, T.-H. (2004), "Kinematic Sensitivity Analysis of Linkage with Joint Clearance Based on Transmission Quality", Mech. Mach. Theory, Vol. 39, pp 1189-1206.

Tsal, M.-J., Lai, T.-H. (2008), "Accuracy Analysis of a Multi-loop Linkage with Joint Clearances", Mech. Mach. Theory, Vol. 43, pp 1141-1157.

Ting, K.L., Zhu, J., Watkins D. (2000), "The Effects of Joint Clearance on Position and Orientation Deviation of Linkages and Manipulators", Mech. Mach. Theory, Vol. 35, pp 391-401.

73