

İki Noktada Teğetler Kullanarak Görüntü Tabanlı Görsel Geri Beslemeli Kontrol ile Düzlemsel Şekil Hizalama

Erol Özgür, Mustafa Ünel

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi
Sabancı Üniversitesi, İstanbul

erol@su.sabanciuniv.edu

munnel@sabanciuniv.edu

Özetçe

Bu bildiriye, düzlemsel şekilleri hizalamak için iki noktada teğetlerden (bitangent) faydalanan görsel geri beslemeli kontrol stratejileri sunulmuştur. Bitangentları elde etmek için bir eğrinin dışbükey zarfından (convex-hull) yararlanılmıştır. İmge nitelik vektörü bitangent noktalarından oluşturularak görsel kontrolde kullanılmıştır. 7 serbestlik dereceli Mitsubishi PA10 robotu üzerinde gerçekleştirilen deneyler önerilen metodun geçerliliğini göstermiştir.

1. Giriş

Eğri hizalama şu anki araştırma konuları içinde dikkati çeken bir problem olarak karşımıza çıkmakta ve nesne tanıma [1], [2], takip etme [3] gibi uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır. Görsel geri beslemeli kontrol uygulamalarında, şu anki hizalama sistemlerinin çoğu geometrik yapısı bilinen nesnelere üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu nesnelere genelde endüstriyel parçalardan oluşmakta veya köşe, düz kenar gibi gerçek zamanlı olarak çıkartılması mümkün olan güzel özellikler içermektedir [4]. Bilinmeyen ortamlarda düzgün serbest şekilli nesnelere hizalama, görsel güdümlü montaj görevlerinde en önemli bölümü oluşturmaktadır.

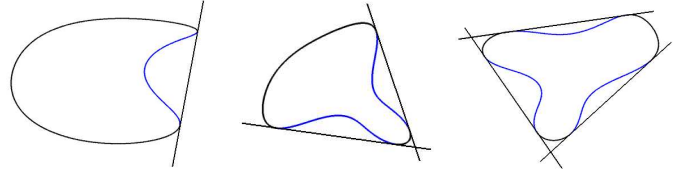
Bu bildiriye eğrileri hizalamak için, kalibre edilmiş [5] ve kalibre edilmemiş [6] görüntü tabanlı görsel geri beslemeli kontrol metodlarında bitangent noktalarını kullanmayı önermekteyiz. Literatürde düzlemsel objeleri tanımak amacıyla, bitangentların afin değişmez (invariant) olarak hizalamada kullanımı ilk kez [7]’de ortaya atılmıştır. Görsel geri beslemeli kontrol maksadıyla ise bitangent doğruları (üstüste konmuş sahne görüntülerinde birbirine karşılık gelen özellikleri birleştiren doğrular) uzayda farklı konumlarda bulunan iki kamera arasındaki oryantasyonu hizalamak için kullanılmıştır [8]. Bitangent noktalarını elde etmek için, eğrinin (convex-hull) dan faydalanılmıştır [9]. Daha sonra bu noktalar görsel özellik vektörünün oluşturulmasında kullanılmıştır.

Bu bildirinin geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2, eğriler için bitangentları tanıtmakta ve nasıl elde edilebileceklerini göstermektedir. Bölüm 3, model tabanlı ve modelden bağımsız görüntü tabanlı görsel geri beslemeli kontrol sistemlerini kalibre edilmiş ve edilmemiş sistemler için incelemektedir. 4. bölüm ise eğri hizalama için deneysel sonuçları ve yapılan tartışmaları sunmaktadır. Son olarak ise bölüm 5

bildiriye bazı yorum ve öneriler ile sonuçlandırır.

2. Eğrilerin İki Noktada Teğetleri

Kendi şekli üzerinde en az bir içbükeye sahip eğri ile bu eğriye iki noktada teğet olacak şekilde geçen doğruya bitangent, kesişiminden elde edilen noktalara ise bitangent noktaları denilmektedir. Bakınız Şekil 1.



Şekil 1: Bazı eğriler ve iki noktada teğetleri.

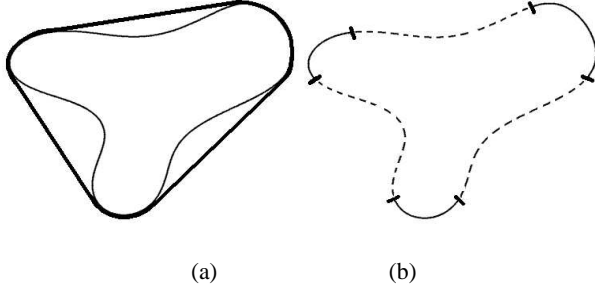
İki noktada teğetlerin değme noktalarının projektif dönüşümler altında değişmez (invariant) oldukları iyi bilinmektedir [10]. Bu noktalar kontak noktaları olarak da adlandırılır.

2.1. İki Noktada Teğetin Kontak Noktalarının Bulunması

Bir eğrinin iki noktada teğetinin kontak noktalarının hesaplanması Şekil 2’deki blok diyagramda gösterilmiştir. Blok-I kameradan gelen bir imge dizisini girdi olarak alır ve belirlenen bir pencere içindeki bölgeyi ESM algoritmasına [11] benzer bir takip algoritması yardımıyla izler. Blok-II, takip edilen bölgeye Canny kenar tespit algoritmasını uygular ve eğrinin sınır verilerini sıralı bir şekilde çıkarır. Son olarak, Blok-III Convex-hull algoritması [9] yardımıyla eğrinin dışbükey zarfını (convex hull) bulur. Şekil 3, üç içbükeyli bir eğriyi göstermektedir. Convex-hull algoritması orjinal veri kümesinin dışbükey parçalarını verir. Elde edilen her bir dışbükey parçasının ilk ve son noktaları eğrinin kontak noktalarıdır.



Şekil 2: Algoritmanın blok diyagram ile gösterimi.



Şekil 3: (a) bir eğri ve convex-hull'i, (b) eğrinin dışbükey parçaları ve kontak noktaları.

3. Görsel Geri Beslemeli Kontrol

3.1. Temel Bilgi

$\theta \in \mathbb{R}^n$, $s \in \mathbb{R}^m$ ve $r \in \mathbb{R}^6$ sırasıyla eklem değişkenleri vektörünü, görüntü algılayıcılarından elde edilen görsel öznitelik vektörünü ve robot elinin duruşunu ifade etmektedir. θ ve r arasındaki ilişki $r = r(\theta)$ şeklindedir. Bu ilişki zamana göre türevlendiğinde şu ifade oluşmaktadır,

$$\dot{r} = J_R(\theta)\dot{\theta} \quad (1)$$

bu eşitlikte $J_R(\theta) = \partial r / \partial \theta \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ kartezyen uzayda robotun eklem hızları ile elinin hızı arasındaki ilişkiyi tanımlayan robot Jakobyan'ı ifade eder. s ve r arasındaki ilişki ise $s = s(r)$ olarak verilmiş ve zamana göre türevlendiğinde aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir,

$$\dot{s} = J_I(r)\dot{r} \quad (2)$$

bu denklemde $J_I(r) = \partial s / \partial r \in \mathbb{R}^{m \times 6}$, görsel özniteliklerle robot elinin duruşu (pose) arasındaki ilişkiyi tanımlayan imge Jakobyan'ı ifade eder. \dot{r} aynı zamanda kamera hız vektörü (camera velocity screw) V_c 'dir. Kompozit Jakobyan ise şöyle tanımlanmaktadır,

$$J = J_I J_R \quad (3)$$

burada $J \in \mathbb{R}^{m \times n}$, imge ve robot Jakobyan'ların çarpımından oluşan bir matristir. Böylece, eklem koordinatları ile görsel öznitelikler arasındaki ilişki şu şekilde verilir,

$$\dot{s} = J\dot{\theta} \quad (4)$$

3.2. Kalibre Edilmiş Görsel Geri Beslemeli Kontrol

$s^* \in \mathbb{R}^m$ sabit istek öznitelik vektörünü ve görüntü üzerinde $e = s - s^*$ ifadesiyle tanımlanan $e \in \mathbb{R}^m$ 'de hata vektörü gösteriyor olsun. Buradaki kontrol probleminin formülasyonu

şu şekilde verilmektedir: Robot eli için öyle bir hız vektörü u tasarlayın ki hata sıfıra ($e \rightarrow 0$) gitsin. Sabit bir kamera kullanılan sistemlerde, tek bir noktadan oluşan öznitelik vektörü $s = [x, y]^T$ için imge Jakobyan'ı şu şekilde verilir:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{Z} & 0 & \frac{-x}{Z} & -xy & (1+x^2) & -y \\ 0 & \frac{1}{Z} & \frac{-y}{Z} & -(1+y^2) & xy & x \end{pmatrix}}_{J_{xy}} V_c \quad (5)$$

bu eşitlikte

$$x = \frac{x_p - x_c}{f_x}, \quad y = \frac{y_p - y_c}{f_y} \quad (6)$$

burada sırasıyla, (x_p, y_p) görüntüdeki piksel koordinatlarını, (x_c, y_c) görüntünün merkez koordinatlarını ve (f_x, f_y) ise görme sensörünün efektif odak uzunluklarını belirtmektedir.

Eşitlik (6), yeniden düzenlenip türevlendiğinde ve matris formatında yazıldığında, aşağıdaki şu ifade elde edilir.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 \\ 0 & f_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} \quad (7)$$

ve denklem (5)'i (7)'de yerine koyduğumuzda ise şu eşitlik ortaya çıkar

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} f_x & 0 \\ 0 & f_y \end{pmatrix}}_{J_I} J_{xy} V_c \quad (8)$$

$$\dot{s} = J_I V_c \quad (9)$$

bu denklemde J_I piksel-imge Jakobyan'dır. Gözden-ele (eye-to-hand) durumunda, imge Jakobyan'ı kamera çerçevesinden robotun kontrol çerçevesine olan dönüşümü içermelidir. Bu ilişki robottan-kameraya olan dönüşümle şu şekilde ifade edilir:

$$V_c = T V_R \quad (10)$$

bu ifadede V_R robot kontrol çerçevesinde elin (end-effector) hız vektörünü belirtir. Robottan-kameraya hız dönüşüm matrisi $T \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır

$$T = \begin{pmatrix} R & [t]_x R \\ 0_3 & R \end{pmatrix} \quad (11)$$

bu tanımlamada $[R, t]$, kamera çerçevesini robotun kontrol çerçevesinin üzerine oturtan dönme matrisi ve öteleme vektörünü ifade eder. $[t]_x$ ise t vektörüyle ilişkilendirilmiş ters bakışlı (skew symmetric) matristir.

Eşitlik (10)'u (9)'da yerine koyduğumuzda, görüntüdeki hareketi robot elinin hızıyla ilişkilendiren ifade elde edilir:

$$\dot{s} = \underbrace{J_I T}_{\triangleq \bar{J}_I} V_R = \bar{J}_I V_R \quad (12)$$

bu ifadede \bar{J}_I , robot kontrol çerçevesinde direkt olarak görsel özniteliklerdeki değişimi robot elinin hızıyla ilişkilendiren yeni imge Jakobyan'ı belirtmektedir.

k tane öznitelik noktasının kullanıldığı durumlarda $s = [x_1, y_1 \dots x_k, y_k]^T$, \bar{J}_I aşağıdaki gibi istiflenmiş (stacked) imge Jakobyan formatında verilir

$$\bar{J}_I = \begin{pmatrix} \bar{J}_I^1 \\ \vdots \\ \bar{J}_I^k \end{pmatrix} \quad (13)$$

Sistem $\dot{e} = -\Lambda e$ olacak şekilde ayarlanarak hata fonksiyonunun üstel olarak azalması sağlanmıştır. Eşitlik (12) çözümlenerek, robot elinin hareketi için gerekli kontrol sinyali şu şekilde elde edilir:

$$V_R = -\bar{J}_I^T \Lambda (s - s^*) \quad (14)$$

bu kontrol sinyalinde $\Lambda \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ pozitif kazanç matrisini, \bar{J}_I^T ise imge Jakobyan'ın genel tersini (pseudo-inverse) ifade eder ve $V_R = (V_x \ V_y \ V_z \ \Omega_x \ \Omega_y \ \Omega_z)^T$ olarak tanımlanmıştır.

3.3. Kalibre Edilmemiş Görsel Geri Beslemeli Kontrol

Bu bölümde kompozit Jakobyan'ın bilinmediği varsayılarak, dinamik olarak kestirilmeye çalışılmaktadır. Pozisyonu $s^*(t)$ olan hareketli bir hedef ve $s(\theta)$ konumundaki bir robot eli için görüntü üzerinde tanımlanan hata fonksiyonu şu şekilde tanımlanmıştır,

$$e(\theta, t) = s(\theta) - s^*(t) \quad (15)$$

bu fonksiyonda $s^*(t)$ görüntü üzerinde t anındaki istek görsel öznitelikleri belirtmektedir. Buradaki kontrol probleminin formülasyonu şu şekilde verilmektedir: öyle bir kontrolör tasarlayın ki eklem hızlarını yönlendiren u kontrol sinyali hata sıfıra gidecek ($e \rightarrow 0$) şekilde hesaplanı.

3.3.1. Dinamik Jakobyan Tahmini

Sistemin modeli bilinmediği varsayıldığından beri, kompozit Jakobyan J 'yi kestirmek için bir özyineli en küçük kareler (RLS) algoritması [6] kullanılmıştır. Bu işlem, afın modeldeki zamana bağlı değişimlerin ağırlıklı toplamı olarak tanımlanan aşağıdaki enerji fonksiyonunun minimize edilmesiyle başarılmıştır,

$$\varepsilon_k = \sum_{i=0}^{k-1} \lambda^{k-i-1} \|\Delta m_{ki}\|^2 \quad (16)$$

burada

$$\Delta m_{ki} = m_k(\theta_i, t_i) - m_i(\theta_i, t_i) \quad (17)$$

$m(\theta, t)$ 'nin k .*inci* nokta etrafında açılmış hali olan $m_k(\theta, t)$, aynı zamanda hata fonksiyonu $e(\theta, t)$ 'nin afın modelidir:

$$m_k(\theta, t) = e(\theta_k, t_k) + \hat{J}_k(\theta - \theta_k) + \frac{\partial e_k}{\partial t}(t - t_k) \quad (18)$$

Eşitlik (18)'in ışığında, (17) aşağıdaki gibi olur,

$$\Delta m_{ki} = e(\theta_k, t_k) - e(\theta_i, t_i) - \frac{\partial e_k}{\partial t}(t_k - t_i) - \hat{J}_k h_{ki}, \quad (19)$$

bu ifadede $h_{ki} = \theta_k - \theta_i$, λ ağırlık çarpanı ise $0 < \lambda < 1$ sağlar, ve bilinmeyen değişkenler \hat{J}_k 'nin elemanlarıdır.

Minimizasyon probleminin çözümü kompozit Jakobyan için aşağıdaki güncelleme kuralını verir:

$$\hat{J}_k = \hat{J}_{k-1} + (\Delta e - \hat{J}_{k-1} h_{\theta} - \frac{\partial e_k}{\partial t} h_t)(\lambda + h_{\theta}^T P_{k-1} h_{\theta})^{-1} h_{\theta}^T P_{k-1} \quad (20)$$

bu denklemde

$$P_k = \frac{1}{\lambda} (P_{k-1} - P_{k-1} h_{\theta} (\lambda + h_{\theta}^T P_{k-1} h_{\theta})^{-1} h_{\theta}^T P_{k-1}) \quad (21)$$

ve $h_{\theta} = \theta_k - \theta_{k-1}$, $h_t = t_k - t_{k-1}$, $\Delta e = e_k - e_{k-1}$, ve $e_k = s_k - s_k^*$, k .*inci* adımdaki robot elinin pozisyonu ile hedefin pozisyonu arasındaki fark olarak tanımlanmıştır. $\frac{\partial e_k}{\partial t}$ terimi hata fonksiyonunda bir sonraki adımda oluşacak değişimi tahmin eder ve sabit kamera kullanıldığı durumlarda bu değişim direkt olarak hedef görüntüdeki öznitelik vektöründen birinci dereceden fark yöntemiyle tahmin edilebilir:

$$\frac{\partial e_k}{\partial t} \cong -\frac{s_k^* - s_{k-1}^*}{h_t} \quad (22)$$

Ağırlık çarpanı $0 < \lambda \leq 1$ arasında ve 1'e yakın değerler alındığında geçmişe ait daha fazla bilgi hesaba katılır. Görsel kontrolörlerde Jakobyan tahmini, hedefi takip etmeye yardımcı olacak eklem değişkenlerini θ_k bulmakta kullanılacaktır.

3.3.2. Dinamik Gauss-Newton Kontrolörü

Dinamik Gauss-Newton metodu [6] aşağıdaki zamanla değişen enerji fonksiyonu minimize eder,

$$E(\theta, t) = \frac{1}{2} e^T(\theta, t) e(\theta, t) \quad (23)$$

ve eklem değişkenlerini iteratif olarak hesaplar:

$$\theta_{k+1} = \theta_k - (\hat{J}_k^T \hat{J}_k)^{-1} \hat{J}_k^T (e_k + \frac{\partial e_k}{\partial t} h_t) \quad (24)$$

Kontrol yasası ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır,

$$u_{k+1} = \dot{\theta}_{k+1} = -K_p \hat{J}_k^T (e_k + \frac{\partial e_k}{\partial t} h_t) \quad (25)$$

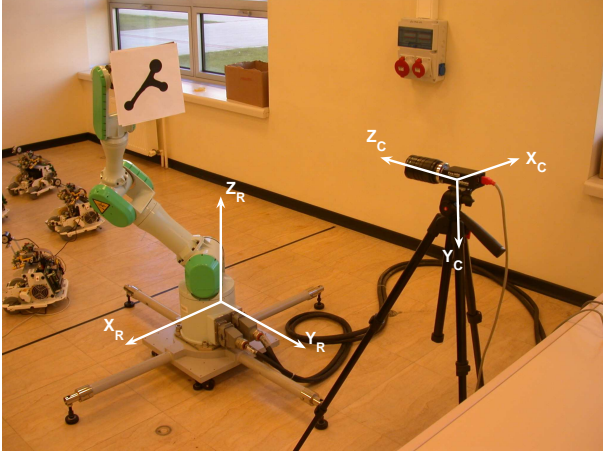
buradaki K_p ve \hat{J}_k^T sırası ile pozitif kazanç katsayısını ve k .*inci* adımdaki tahmini Jakobyan'ın genel tersini ifade eder.

4. Deneysel Sonuçları

Bu bölümde, hem kalibre edilmiş hemde kalibre edilmemiş görsel geri beslemeli kontrol için deneysel sonuçlar sunulacaktır önerilen metodun geçerliliği gösterilmiştir.

Deneysel, 7 serbestlik derecesine sahip Mitsubishi PA10 robot kolu ve bir Unibrain Fire-i400 dijital kamera ile gerçekleştirilmiştir. Kamera bir üç ayaklı sehpa (tripod) üzerine sabitlenerek robotun hareketlerini tam karşıdan izleyecek şekilde yerleştirilmiştir. Kameradan elde edilen görüntüler 320×240 çözünürlüktedir. Çalışma düzeneği Şekil 4'de gösterilmiştir. Görsel kontrol ve görüntü işleme modülleri OpenCV kütüphanesi yardımıyla VC++ 6.0'da kodlanmış ve 1GB Ram'e sahip P4 2.26GHz bir masaüstü bilgisayarda çalıştırılmıştır.

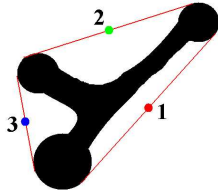
Şekil 5 deneylerde kullanılan test eğrisini gösterir. Bu eğri bir düzlem üzerinde robotun eline oynamaz (rigid) bir şekilde takılmıştır. Bu şeklin iki noktada teğetlerinin kontak noktaları bu bildiride önerilen algoritma ile elde edilmiştir. Görsel geri beslemeli kontrol için, iki noktada teğetlerin kontak noktaları yada onlardan hesaplanan orta noktaları kullanılabilir, Şekil 5'de 1, 2 ve 3 numaralarıyla gösterilen noktalara bakınız. Bu orta noktalar, projektif değişmez olan bitangent noktalarından



Şekil 4: Çalışma düzeneği.

farklı olarak afin değişmez özelliğe sahiptirler. Bakılan manzaranın derinliği kameraya olan uzaklığına göre çok küçük kalıyorsa zayıflatılmış perspektif izdüşüm (weak-perspective projection) varsayımı yapılabilir. Deneylerde zayıflatılmış perspektif izdüşüm varsayımı yapılmış ve görsel öznitelik vektörü s bitangent noktalarının orta noktalarından oluşacak şekilde aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$s = [x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3]^T.$$



Şekil 5: Test eğrisi ve öznitelik noktaları.

Perspektif izdüşümün geçerli olduğu durumlarda yani zayıflatılmış perspektif izdüşüm sağlanmadığında, bitangent noktaları direkt olarak görsel öznitelik vektörünün oluşturulmasında kullanılabilir.

Hizalama görevi için eğrinin istek duruşu, çevrimdışı konumda iken robot kendi kontrol çerçevesinin xz -düzleminde belirli bir zaman aralığı için V_x , V_z ve Ω_y hızları ile hareket ettirilerek elde edilmiştir. Sonuç olarak, istek görsel öznitelik vektörü s^* , bu referans duruştan oluşturulmuştur.

4.1. Kalibre Edilmiş Görsel Geri Beslemeli Kontrol Sonuçları

Kameranin kaba kalibrasyonu sonucunda $f_x = 1000$, $f_y = 1000$, $x_c = 160$, $y_c = 120$ olarak hesaplanmış ve $Z = 2000$ mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Robotun taban çerçevesi kameradan z ekseninde 2000 mm ve y ekseninde 1000 mm uzakta olacak şekilde konumlandırılmıştır. Böylece, aşağıdaki

tanımlamar elde edilmiştir,

$$R = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad t = \begin{pmatrix} 0 \\ 1000 \\ 2000 \end{pmatrix}$$

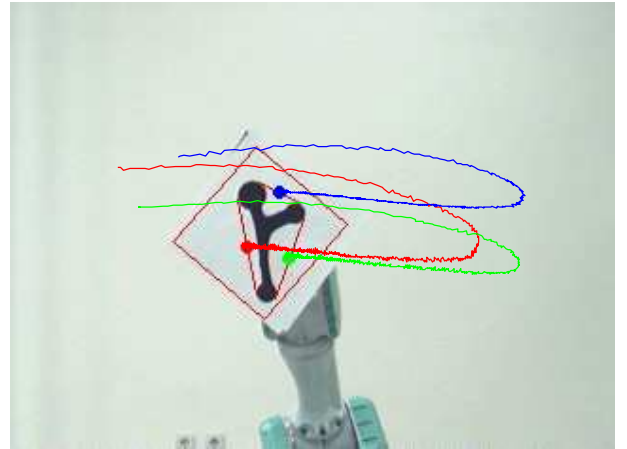
bu tanımlamalarda R dönme matrisini ve t öteleme vektörünü ifade eder. R ve t daha sonra robottan-kameraya olan dönüşüm matrisi T 'yi oluşturmak için kullanılmaktadır. Katsayı matrisi Λ , $i = 1, 2, \dots, 6$ için $\Lambda_i = 0.3$ olacak şekilde düzenlenmiştir. Kontrol girdisi ise şu şekilde tanımlanmıştır,

$$u = (V_x \quad V_z \quad \Omega_y)^T$$

bu ifadede u , xz -düzlemindeki öteleme ve y -ekseni etrafındaki dönme hareketi için sırasıyla V_R 'nin 1., 3. ve 5. elemanlarının birleşiminden oluşturulmuştur. Şekil 6 ilk ve bitiş görüntüleri gösterir. Şekil 7 görsel özniteliklerin görüntü üzerindeki yörüngelerini sunmaktadır. Hizalama hataları ve kontrol sinyalleri ise Şekil 8-9'de çizdirilmiştir. Sonuç olarak hizalama hatasının normunun 1 pikselden az olduğu gözlemlenmiştir.



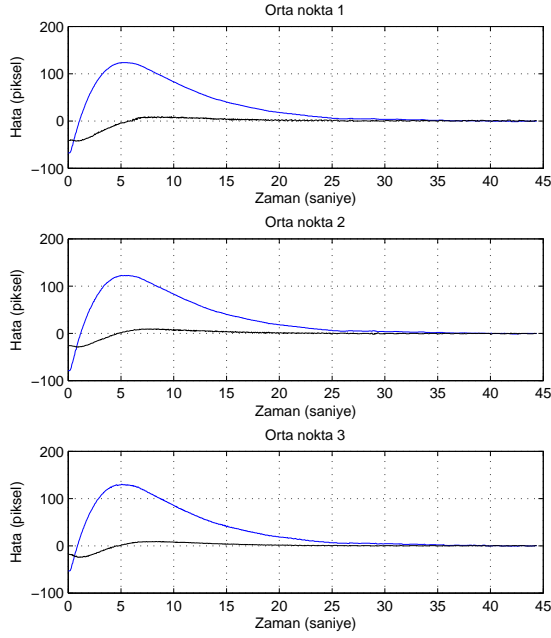
Şekil 6: Başlangıç ve bitiş görüntüleri



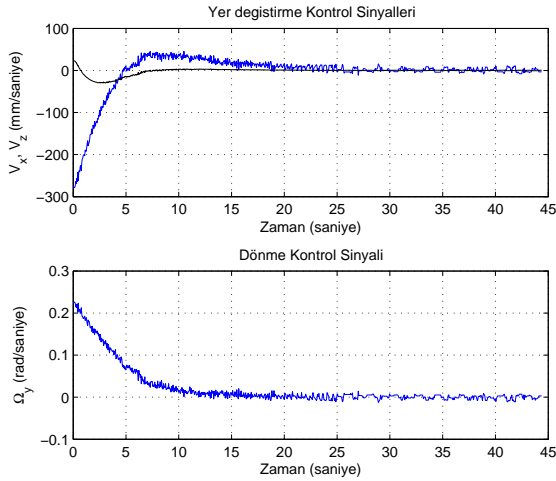
Şekil 7: Görüntü üzerinde özniteliklerin yörüngeleri

4.2. Kalibre Edilmemiş Görsel Geri Beslemeli Kontrol Sonuçları

Burada, komposit Jakobyen $J \in \mathbb{R}^{6 \times 3}$ özyineli olarak kestirilmesi sebebiyle, kalibrasyon parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. PA10 robot kolunun elini hareket ettirmek için



Şekil 8: Hizalama hataları



Şekil 9: V_x , V_z ve Ω_y kontrol sinyalleri

sadece 3 adet eklem (2., 4. ve 6.) kullanılmış geriye kalan 4 eklem kilitlemiştir. Kontrol parametreleri $\lambda = 0.96$ ve $K_p = 0.6$ olarak ayarlanmıştır. Kontrol girdisi ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır,

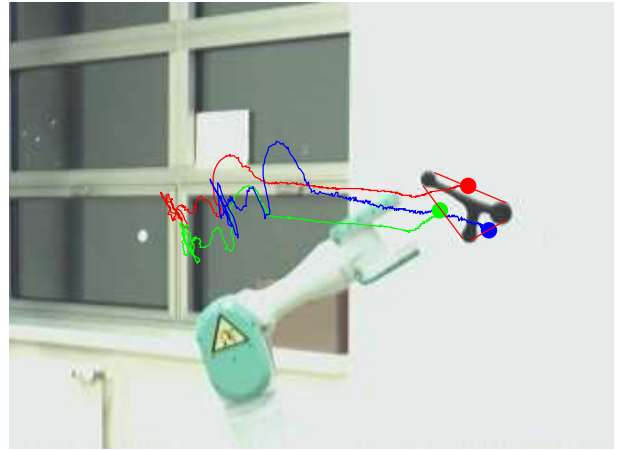
$$\mathbf{u} = \left(\Omega_2 \quad \Omega_4 \quad \Omega_6 \right)^T$$

bu eşitlikte Ω_2 , Ω_4 ve Ω_6 eklem hızlarını ifade etmektedir. Şekil 10 ilk ve bitiş görüntüleri gösterirken, Şekil 11 görüntü

üzerindeki görsel öznitelik yörüngelerini göstermektedir. Hizalama hataları ve kontrol sinyalleri ise sırasıyla Şekil 12-13'de çizdirilmiştir. Sonuç olarak hizalama hatasının normunun 1.5 pikselden az olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 10: Başlangıç ve bitiş görüntüleri



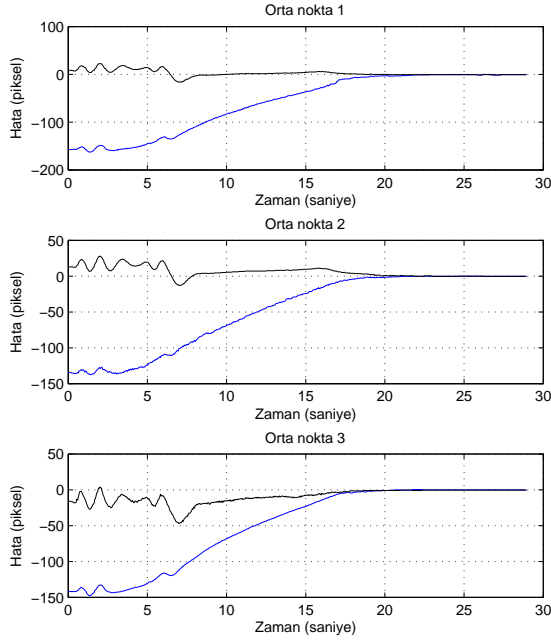
Şekil 11: Görüntü üzerinde özniteliklerin yörüngeleri

4.3. Tartışma

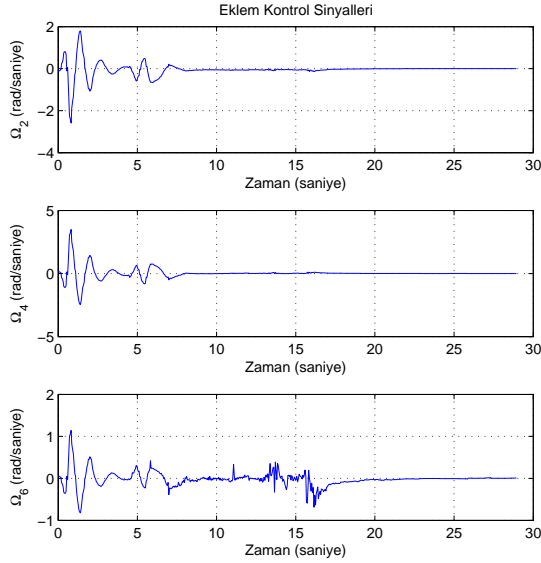
Her iki görsel geri beslemeli kontrol yaklaşımında hizalama görevleri 1.5 pikselden daha az bir hata ile gerçekleştirilmiştir ki, buda robotun çalışma uzayında 5 mm'lik bir hataya denktir. Robot istek duruşa (desired pose) ilerlerken görülebilirki kalibre edilmiş metod daha yumuşak ve düzgün yörüngeler çizmektedir, kalibre edilmemiş olan ise Jakobyan'ı doğru değerine yakınsayana kadar belirsiz ve ani davranışlar göstermektedir. Bölge takibi, eğri tespiti ve kontak noktalarının çıkartılması modülleri hesaplama süresi olarak yaklaşık sırası ile 13 ms, 5 ms ve 4 ms zaman almaktadır.

5. Sonuçlar

Bu bildiride, iki noktada teğetler, kalibre edilmiş ve kalibre edilmemiş görüntü tabanlı görsel geri beslemeli kontrol yöntemlerini dizayn etmek için kullanılmışlardır. Bu tasarlanan kontrol yöntemleri daha sonra sabit bir kamera vasıtasıyla düzlemsel nesnelere hizalamak için çalıştırılmıştır. Ne yazık ki, bu metodun geçerliliği hizalanacak eğrinin şekli en az bir tane içbükey içerdiği durumlarda geçerlidir. Deneysel sonuçlar önerilen yöntemi geçerli kılmıştır. Hizalama görevleri yaklaşık olarak 5 mm doğrulukla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 12: Hızlama hataları



Şekil 13: Ω_2 , Ω_4 ve Ω_6 kontrol sinyalleri

6. Teşekkür

Bu çalışma 106E040 numaralı proje kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir.

7. Kaynakça

- [1] N.J. Ayache and O.D. Faugeras, HYPER: A new approach for the recognition and positioning of two-dimensional objects, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 8, no. 1, pp. 44-54, 1986.
- [2] C. A. Rothwell, A. Zisserman, D. A. Forsyth and J. L. Mundy, Planar Object Recognition using Projective Shape Representation, *International J. of Computer Vision*, vol. 16, pp. 57-59, 1995.
- [3] Hemant D. Tagare, Shape-based non-rigid correspondence with application to heart motion analysis, *IEEE Trans. Medical Imaging*, vol. 18, no. 7, pp. 570-578, 1999.
- [4] G. D. Hager. A modular system for robust positioning using feedback from stereo vision. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 4, pp. 582-595, 1997.
- [5] S. Hutchinson, G. D. Hager, and P. I. Corke, A tutorial on visual servo control, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5, pp. 651-670, 1996.
- [6] J. A. Piepmeyer, H. Lipkin, Uncalibrated Eye-in-Hand Visual Servoing, *The International Journal of Robotics Research*, 2003.
- [7] Y.Lamdan, J.T.Schwartz, and H.J. Wolfson. Object recognition by affine invariant matching. *In Proc. CVPR*, pages pp. 335-344, 1988.
- [8] Jacopo Piazzi, Domenico Prattichizzo, Noah J. Cowan, Auto-epipolar Visual Servoing, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2004.
- [9] J.Sklansky.Measuring concavity on a rectangular mosaic. *IEEE Trans Comput.* vol. 21, pp. 1355-1364, 1972.
- [10] J. L. Mundy, Andrew Zisserman, *Geometric invariance in computer vision*, The MIT Press, 1992.
- [11] S. Benhimane and E. Malis, Real-time image-based tracking of planes using efficient second-order minimization, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots Systems*, Sendai, Japan, October 2004.