



Robot manipulatörler için akıllı GTGS sistemi An intelligent IBVS system for robot manipulators

Tolga YÜKSEL^{1*}

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye
tolga.yuksel@bilecik.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 27.02.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 25.05.2016

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.98705

Özel Sayı Makalesi/Special Issue Article

Öz

Görsel servolama (GS) yaklaşımları içinde görüntü-tabanlı görsel servolama (GTGS) duruş kestirimi gerektirmediğinden robot manipulatörler için popüler GS yaklaşımlarından biridir. Bu popülerliğin yanında GTGS, uygulanması sırasında ise iki temel sorun ile uğraşır: Etkileşim matrisinin tersinin eldesi ve kontrolör için uygun bir sabit kazanç değeri bulunması. GTGS için etkileşim matrisi her ne kadar yalancı tersi ile beraber kullanılsa da tekilliklerin oluşması durumunda kontrol yasası işleyememektedir. Diğer bir taraftan sabit kazanç değeri yakınsama hızı ile sonlandırıcı hızları arasında bir ödünleşmeye sebep olmaktadır. Bu çalışmada bu sorunları çözmek için akıllı bir GTGS sistemi önerilmiştir. Sistemin ilk aşaması olarak eğitilmiş bir yapay sinir ağı (YSA) etkileşim matrisinin tersinin yerini almakta ve tekillik sorunu çözülmektedir. Ayrıca klasik hız kontrolcüsünün sebep olduğu başlangıç hız süreksizliği yararlanan sürekli hız kontrolcü ile giderilmiştir. İkinci aşama olarak sabit kazanç yerine bulanık kayan kipten esinlenen ve her çevrimde hata ve hata türevinin değerine göre kazanç hesabı yapan bir bulanık mantık birimi kullanılmıştır. Bu uyarlanabilir kazanç yaklaşımıyla yüksek hız ihtiyacı olmadan hızlı yakınsama sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Görüntü-tabanlı görsel servolama, Robot manipulatör, Sinir ağı, Bulanık mantık

Abstract

Image-Based Visual Servoing (IBVS) is one of the popular approaches in visual servoing (VS) for robot manipulators by not requiring pose estimation. Besides this popularity, IBVS has to deal with two common problems in realization: obtaining the inverse of the interaction matrix and finding an appropriate fixed gain value for the controller. Although the interaction matrix for IBVS is used with pseudoinverse, the control law is not applicable in the case of singularities. On the other hand, fixed gain value causes a trade-off between convergence speed and end-effector velocities. In this study, an intelligent IBVS scheme is proposed to solve these problems. As the first stage of the system, the interaction matrix is replaced with a trained neural network and the singularity problem has been solved. Furthermore, the discontinuity of the initial velocities caused by the classical velocity controller are resolved by the used continuous velocity controller. As the second stage, instead of a fixed gain, a fuzzy logic unit inspired by fuzzy sliding mode and computing a gain value according to error and error derivative values in each loop is considered. Fast convergence without high velocity demand is provided by this adaptive gain approach.

Keywords: Image-based visual servoing, Robot manipulator, Neural network, Fuzzy logic

1 Giriş

Robotların günlük hayat içinde gittikçe artan sayıları onların daha insansı özelliklere sahip olması ile sonuçlanmaktadır. Bu özelliklerden en önemlisi ise görmedir. İnsan, görme duyusu sayesinde sadece etrafını görmez, etrafını anlar ve vücut hareketlerini düzenlemeye yardımcı olacak bir kapalı çevrim oluşturur. Bu kapalı çevrim hareketlerin daha düzgün ve daha hızlı olmasını sağlar.

Robotlarda bu kapalı çevrimi tamamlayan görsel geribesleme teriminin yerine geçen ve literatürde kabul gören görsel servolama (GS) terimi ise [1]'de belirtildiği üzere ilk kez Hill ve Park tarafından kullanılmıştır [2]. GS görüntü işleme, robot kinematiki, kontrolü ve kontrol teorisi yöntemlerinin kaynaştırılmasından oluşmaktadır. GS'nin donanımsal yönünü oluşturan kameranın manipulatör sonlandırıcı üzerine takıldığı eldeki-göz konfigürasyonu literatürde en fazla çalışmanın yapıldığı konfigürasyondur. Bu konfigürasyon ayrıca insansız araçlar için GS kullanımına da bir adım oluşturmaktadır.

GS eldeki kamera görüntüsünde tanımlı k öznitelik noktasının belirlenmesi ile oluşan s vektörünün istenen sabit durumda (s^*) olması için hata sinyalinin oluşturulması ve bu hata sinyali ile kontrol yasasını tasarlayarak 3 boyutta istenen doğrusal ve açılal hızları tanımlar. Bu bağlamda GS, görüntüden doğrudan elde edilen s^* 'yi kullanan görüntü-tabanlı görsel servolama (GTGS)

ve görüntü ve robotun duruşundan yararlanılarak bulunan 3 boyutlu parametre kestirimleri ile elde edilen s^* 'yi kullanan konum-tabanlı görsel servolama (KTGS) olarak ikiye ayrılır [3]. Bu çalışmada duruş kestirimine gerek duymadığı ve derinlik kestiriminde hatalara gürbüzlüğünden dolayı GTGS tercih edilmiştir. Burada, bu iki yaklaşımdan yararlanılarak ortaya çıkmış olan $2\frac{1}{2}$ [4], bölümlenmiş kontrol [5] gibi melez yöntemlerin de olduğu, özniteliksiz olarak tanımlanan çekirdek tabanlı ve parlaklık tabanlı GS yöntemlerinin kullanıldığı çalışmaların da dikkat çekici olduğu belirtilmelidir [6],[7]. Ayrıca tüm GS yaklaşımlarında 3 boyutlu uzaydaki bir noktanın 2 boyutlu kamera düzlemine izdüşümü için derinlik bilgisi elde edilemediğinden dolayı bu değer kestirimini kullandığı belirtilmelidir.

GTGS iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada kameraya ait odak uzaklığı, görüntü düzleminde öznitelik nokta koordinatları ve öznitelik derinlik bilgisi kullanılarak etkileşim matrisi (veya görüntü Jakobyen matrisi) elde edilir. Derinlik bilgisi tam olarak elde edilemediğinden kestirilmiş bir değer kullanılabilir. Bu durumda etkileşim matrisi yaklaşık etkileşim matrisi haline gelir. GTGS için kontrol yasası etkileşim matrisinin yalancı tersine ihtiyaç duyar fakat Chaumette'in çalışmasında belirttiği bazı görüntü hareketleri tekillik oluşturarak yasayı işlemez hale getirir [8]. Bu duruma karşılık bir etkileşim matrisi yakınsayıcısı veya kestirimcisi kullanmak yerinde olacaktır. Kumar ve Behera çalışmalarında stereo

kamerallı ele-karşılık-göz konfigürasyonlu fazlalıklı manipulatör için kendinden düzenlenen haritalar kullanarak etkileşim matris kestirimi yapmışlardır fakat çalışmada GTGS ve eldeki-göz konfigürasyonu kullanılmamıştır [9]. Kosmopoulos 6 eklemli bir manipulator için doğrusal bir öznitelik modeli ve en küçük kareler kestirimci ile bir kestirimci oluşturmaya çalışmıştır fakat kullanılan robot sadece tanımlı tek bir yörüngeyi takip etmek üzere tasarlanmıştır [10]. Sebastian ve diğ., 3 eklemli ele-karşılık-göz konfigürasyonlu bir manipulator için herhangi bir yörünge tanımlı yapmadan Broyden, özyinelemeli en küçük kareler, Kalman filtresini kullanarak kestirim yapmaya çalışmışlardır [11]. Zhong ve diğ. ise görüntü öznitelikleri ve bir önceki etkileşim matris kestirimi giriş olacak şekilde Elman sinir ağı ile çalışan gürbüz Kalman filtresi kullanarak kestirim yapmaya çalışmışlardır [12]. Bu çalışmada gürültüye karşı gürbüzlüğün çok sınırlı olduğu ve hız kontrolcüsü üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmadığı görülmektedir. Başka bir çalışmada ise etkileşim matrisine yakınsamada Kalman filtresinin gürbüzlüğünü artırmak için sinir ağı (SA) destekli Kalman filtresi kullanılmışlardır fakat bu çalışmada da uç işlevcinin hızları gözardı edilmiştir [13]. Goncalves ve diğ. ise ele-karşılık-göz konfigürasyonlu robotlar için robotun eklem açılarını ve özniteliklerdeki değişimleri kullanarak robotun hız değerlerini ters bulanık modelleme ile bulmaya çalışmışlardır [14].

İkinci aşamada ise robot manipulatörün ne kadar hızlı yakınsayacağını belirleyen, bunun yanında manipulatöre ait hız sınırlarının gözönünde bulundurulması gereken bir kazanç değeri (λ) belirlenmelidir. Bu değer belirlenmesinde analitik bir ifade yerine kullanıcı tecrübesi önem kazanmaktadır. Bunun için değişen bir kazanç önerilebilir fakat ani değişen kazanç değerlerinin ani hız değişimlerine sebep olacağından değişimin olabildiğince yumuşak yapılması gerekmektedir. Ayrıca klasik GTGS kontrolcülerini, gerçekleştirilmediği gerekli olan uç işlevcisine ait başlangıç hızlarının sıfır olması gerekliliğini tanımlayan başlangıç hızlarının sürekliliğini ihmal etmektedir. Mansard ve Chaumette çalışmalarında hız sinyali için tanımlı klasik GTGS yerine homojen olmayan bir diferansiyel denklem tanımlayarak geçici ve sürekli çözüm parçaları ile değişken parametrelili bir GTGS sistemi önermişlerdir [15]. Çalışma GS görevlerinde GTGS'den KTGS'ye yumuşak geçişi sağlamak için tasarlanırsa da yakınsama özellikleri ve manipulatör hız sınırları göz ardı edilmiştir. Kermorgant ve Chaumette başka bir çalışmada eldeki-göz ve ele-göz konfigürasyonlu kameralardan ve manipulatör sisteminin kısıtlarından oluşan bir öznitelik setini kullanan bir çoklu-sensör manipulatör sistemi tasarlamıştır [16]. Bu sistemde sistem kısıtlarını göz önüne almak için sistemi yavaşlatan bir uyarlanabilir kazanç hesabı yapılmıştır. İzleyen bölümde de belirtildiği üzere kayan kipli kontrol (KKK) için tanımlı kayma yüzeyi GTGS için kullanılan diferansiyelle aynıdır ve GTGS için kazanç KKK için kayma eğimi olarak adlandırılır [17]. GTGS için sabit kazanç yerine KKK için yüzey tasarımında kullanılan zamanla değişen eğim kullanılabilir. Bu yaklaşımda hata ve hatanın türevinin yüksek olduğu yerlerde kayan kipe dair eğim düşürülerek ile kontrol sınırlarını aşmamaya çalışılır. Ters durumda da eğim büyütülerek hızlı yakınsama sağlanır [18].

Bu çalışmada ise literatürdeki çalışmaların üstünlükleri ve zayıflıkları göz önünde bulundurularak eldeki-göz konfigürasyonlu robot manipulatörler için esnek hesaplama temelli akıllı birimler eklenerek akıllı bir GTGS sistemi önerilmiştir. Sistem, ilk aşama olarak tersi alma problemine sahip kare olmayan etkileşim matrisi yerine eğitilmiş bir YSA

yakınsayıcı kullanılmaktadır. İkinci aşamada sabit kazanç değerinin bulunması yerine ise KKK için tanımlanan zamanla değişen yüzey tasarımından esinlenen bir sürekli hız kontrolcüsü önerilmiştir. Kontrolcü kazancına dair zamanla değişimi bulanık mantık (BM) birimi tarafından yapılan bir kazanç sistemi önerilmiştir.

Çalışmada ayrıca GS sistemlerinin değerlendirilmesi için kullanılacak bazı ölçütler tanımlanmıştır. GS sistemlerinin yorumlanmasında sadece hız ve öznitelik yörüngelerine bakmak yerine tanımlanan bu ölçütleri kullanmak GS sistemlerinin değerlendirmesini daha net ve daha karşılaştırılabilir hale getirecektir.

İzleyen bölümde önerilen sistemin ayrıntılarına yer verilmiş ve GS değerlendirme ölçütleri tanımlanmıştır. Bölüm 3'te sistemin başarımını göstermek amacıyla Puma560 manipulatör ile eldeki-göz konfigürasyonlu bir GS sistemi benzetimi yapılmış ve önerilen GTGS sisteminin klasik GTGS sistemi ile gecikmeli ve gürültülü senaryoları içeren karşılaştırmalı benzetim sonuçları sunulmuştur. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve gelecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

2 Klasik GTGS ve önerilen akıllı GTGS sistemi

Bu çalışmada robot manipulatörler için esnek hesaplama yöntemlerinden yararlanan akıllı bir GTGS sistemi önerilmiştir. Esnek hesaplama denince akla gelen SA, BM ve genetik algoritmalar (GA) farklı amaçlarla kullanılmaktadır. SA ve BM modelleme ve kontrol üzerine odaklanırken GA optimizasyon üzerine odaklanmıştır. Önerilen sistemde YSA ve BM'den yararlanılmıştır.

Sistemin ayrıntılarına geçmeden önce klasik GTGS'ye dair kısa bir giriş yapılmalıdır. Tüm GS yöntemleri k öznitelik noktasına ait koordinatlar ile oluşturulan s vektörü ile bu vektörün sabit ve istenen hali olan s^* arasındaki farkın sıfırlanmasını amaçlar. GTGS'nin en büyük üstünlüğü görüntüden elde ettiği öznitelikleri doğrudan kullanmasıdır. Bununla beraber etkileşim matrisi eldesi için kameralara ait parametreler de kullanılır. İğne deliği modeli ile kamera çerçevesine göre 3B bir noktanın koordinatları $P = (X, Y, Z)$ belirtildiğinde noktanın görüntü çerçevesine göre durumu Şekil 1'de verilmiştir. Buradaki λ odak uzaklığını belirtirken u ve v P noktasının görüntü üzerindeki izdüşümü olan p noktasının koordinatlarıdır. P ve p nokta izdüşümü arasındaki dönüşüm yazılırsa:

$$u = \lambda \cdot \frac{X}{Z} \quad v = \lambda \cdot \frac{Y}{Z} \quad (1)$$

Şekil 1. İğne deliği kamera modeli.

Bu dönüşüm üzerinden P noktasının kamera çerçevesine göre hızı, Ω açısal hız, V doğrusal hız olmak üzere yazılırsa etkileşim matrisi (2)'deki gibi elde edilebilir.

$$\dot{P} = -\Omega \times P - V$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\lambda}{Z} & 0 & \frac{u}{Z} & \frac{uv}{\lambda} & -\frac{\lambda^2 + u^2}{\lambda} & v \\ 0 & -\frac{\lambda}{Z} & \frac{v}{Z} & \frac{\lambda^2 + v^2}{\lambda} & -\frac{uv}{\lambda} & -u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} = L_s \cdot v_c \quad (2)$$

Burada tek noktanın izdüşümü yapılmıştır ve $s = [u \ v]^T$ ile tanımlıdır. Z ile gösterilen derinliğin gerçek değerini manipülâtör için elde etmek zor olduğundan yerine kestirim değeri kullanılarak kestirilmiş etkileşim matrisi L_s elde edilir. (2) ile tanımlı eşitlik tek öznitelik noktası için geçerlidir, her bir nokta için ayrı ayrı elde edilmelidir ve $L_s \in \mathbb{R}^{2k \times 6}$ şeklinde tanımlanmalıdır.

$$\dot{s} = L_s \cdot v_c \quad (3)$$

İzleyen adımda GTGS için hata tanımlanmalıdır

$$e(t) = s - s^* \quad (4)$$

(2) ile elde edilen öznitelik noktalarına ait birinci türevin hız ile ilişkisinden (3) elde edilir. Burada $v_c (v_x, w_x)$ kameranın referans koordinat çerçevesinde doğrusal ve açısal hızlarını belirtir. (3) ve (4) kullanılarak hata ve hız arasındaki ilişki belirlenir

$$\dot{e} = L_s \cdot v_c \quad (5)$$

Bir sonraki adımda hız kontrolcüsü tanımlanacaktır fakat bundan önce iki önemli kabul tanımlanmalıdır:

Kabul 1: Uç işlevcisi koordinat çerçevesi (\mathcal{F}_e) ile kamera koordinat çerçevesi (\mathcal{F}_c) arasında herhangi bir dönüşüm yoktur.

$$\mathcal{F}_c = T_e \cdot \mathcal{F}_e, T_e = I^{4 \times 4} \quad (I: \text{Birim matris}) \quad (6)$$

Kabul 2: Tüm öznitelik noktaları 3B uzayda doğrudadır. Bu noktaların derinlik değeri aynıdır ve hepsi A, B, C sabit olmak üzere Tahri ve Chaumette'in çalışmasında tanımlanan doğrudalık kuralına uyar [19].

$$\frac{1}{Z} = A.X + B.Y + C \quad (7)$$

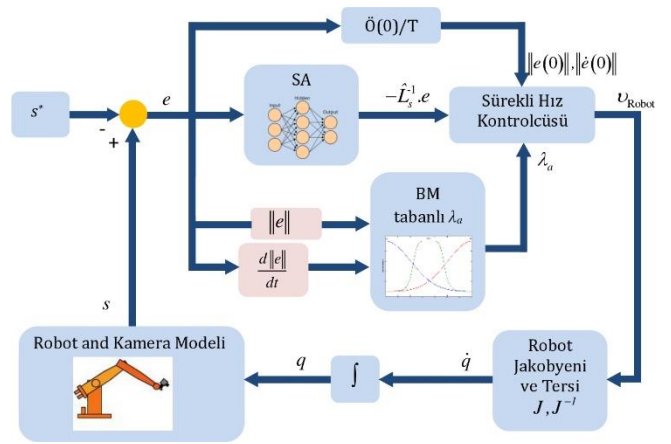
s^* 'nin sabit olması ile birlikte, klasik GTGS hatanın üstel olarak azalması için kestirilmiş etkileşim matrisinin Moore-Penrose yalancı tersiyle (\hat{L}_s) birlikte aşağıdaki tanımını kullanır ve kinematik hız kontrolcüsünü tanımlar:

$$\dot{e} + \lambda.e = 0 \rightarrow \dot{e} = -\lambda.e \rightarrow \hat{L}_s \cdot v_c = -\lambda.e \rightarrow v_c = -\lambda \cdot \hat{L}_s^{-1} \cdot e \quad (8)$$

Burada λ ise kazanç değeridir.

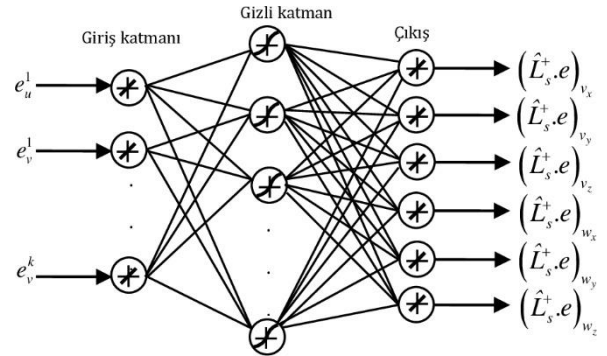
2.1 Önerilen akıllı GTGS sistemi

Klasik GTGS tanımından sonra önerilen akıllı GTGS sistemine dair blok diyagram Şekil 2'de verilmiştir. Önerilen sistemde, ilk adım SA ile etkileşim matrisine yakınsamadır. Ağ girişi (4) ile tanımlı ve her bir özniteliğe dair hata vektörüdür. Ağdan beklenen ise Şekil 2'de belirtildiği üzere kestirilmiş etkileşim matrisi tersi ile hata vektörü çarpımının oluşturduğu fonksiyona yakınsamasıdır. Bu sayede öznitelik nokta sayısı



Şekil 2. Önerilen akıllı GTGS sistemi.

değişen etkileşim matrisi eleman sayısı yerine öznitelik nokta sayısından bağımsız, sadece doğrusal ve açısal etkiyen 6 çıkış bulunacaktır. SA'ya ait giriş-çıkış haritalama gösterilimi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Önerilen sistemde SA giriş-çıkış haritalaması.

SA eğitimi için sabit Z kestiriminde farklı başlangıç eklem açılarıyla yani farklı başlangıç kamera duruşları ile elde edilen giriş-çıkış veri kümesi kullanılmalıdır. Bu eğitim için yeterli veri sayısının tüm çalışma uzayını kapsayacak şekilde olmasına dikkat edilmelidir. Çalışmada SA eğitimi için yakınsama başarımı ilgili çalışmalarda diğer eğitim algoritmalarından üstün kabul edilen Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır [20].

(8) ile tanımlı klasik GTGS hız kontrolcüsü ve bunu kullanan araştırmalar GS'nin gerçek hayat uygulamalarını göz ardı etmektedir. GS ile de kontrol edilse bir robot manipülâtörden istenen üretim hattında daha fazla iş yapabilmelidir. Bunu sağlayabilmek için GS'nin hız limitleri içinde daha hızlı yakınsaması sağlanmalıdır. Ayrıca yine bu klasik kontrolcüler GS sisteminde ilk hız değerinin robot manipülâtöre etkilerini göz ardı etmektedir. Bu tip pratik noktalar sadece iki çalışmada göz önünde bulundurulmuştur [15],[16]. Mansard ve Chaumette çalışmalarında (8) ile tanımlı diferansiyel denklem yerine homojen olmayan birinci dereceden bir diferansiyel denklem tanımlamışlardır [15].

$$\dot{e} = -\lambda.e + \rho(t) \quad (9)$$

Burada $\rho(t)$ zamanın bir fonksiyonudur. Bu fonksiyon, sürekliliği tanımlamak için dikkatli seçilmelidir ve $t \rightarrow \infty$ iken 0'a eşit olacak bir geçici fonksiyon olmalıdır. Bu fonksiyon

$$\rho(t) = (\|\dot{e}(0)\| + \lambda \cdot \|e(0)\|) \cdot e^{-\gamma \cdot t} \quad (10)$$

şeklinde seçilmiştir. Burada γ geçici cevabın zaman sabitidir ve $\gamma = 10.\lambda$ seçilebileceği çalışmada belirtilmiştir [15]. (8),(9) ve (10) kullanılarak GTGS hız kontrolcüsü şu şekilde tanımlanır

$$v = -\lambda.\hat{L}_s^+.e + (\hat{L}_s^+ \|\dot{e}(0)\| + \lambda.\hat{L}_s^+ \|e(0)\|).e^{-\gamma.t} \quad (11)$$

Şekil 2'de gösterildiği üzere $\|\dot{e}(0)\|, \|e(0)\|$ terimlerini elde etmek için başlangıç değerlerini örnekleyici ve sıfırını dereceden tutucu birimi (Ö(0)/T) birimi kullanılmıştır.

Mansard ve Chaumette bu kontrolcüyü farklı VS yöntemleri arasında geçiş için kullanmış ve yakınsama hızı göz ardı edilmiştir. (8) ve (11)'deki sabit λ değeri yakınsama zamanını ve hız profilini belirler ve eğer uyarlanabilir şekilde değişken yapılırsa daha etkin hız profilleriyle daha kısa zamanda yakınsama sağlayabilir. Uyarlanabilir kazanç λ_c hız profilini belirleyen $\|e\|$ ve $d\|e\|/dt$ terimlerine bağımlı olmalıdır. Şekil 2'de gösterildiği üzere uyarlanabilir bir λ_c için BM kullanılmıştır. $\|e\|$ ve $d\|e\|/dt$ terimlerinin etkileri klasik PD kontrolcülerindeki gibi tanımlıdır ve BM kuralları buna göre şekillendirilebilir [21]. Bu tanımlanan adımla beraber kullanılan robot manipülatör ve kamera modeli ile Şekil 2'de önerilen GTGS sistemi tamamlanmış olur.

2.2 GS değerlendirme ölçütleri

GS üzerine çalışmalar yeni yaklaşımlara ve yöntemlere odaklansa da bir GS sistemini karşılaştırılabilir şekilde değerlendirmek zordur. Bu anlamda sadece Chesi ve Hung çalışmalarında taranan görüntü alanı, yörünge uzunluğu ve eğrilik gibi belirgin ölçütleri kendi terimleri cinsinden tanımlamışlardır [22].

Bu çalışmada ise bu eksiliği gidermek adına yörünge planlama, yörünge üretimi ve GS alanındaki terimler birleştirilerek GS değerlendirme ölçütleri oluşturulmuştur.

1) *Yakınsama Zamanı*: Bir GS sisteminin yakınsama zamanı aşağıdaki gibi tanımlanır

$$t_c = \arg \max_{0 \leq t < \infty} (\|e(t)\| < e_{thr}) \quad (12)$$

Burada e_{thr} yakınsama hata eşiğidir ve uygulama doğruluk isteğine göre tanımlanabilir.

2) *Kamera yörünge uzunluğu*: Bu uzunluk hem kameranın, hem de uç işlevcisinin yörünge uzunluğudur. Eğer izlenen yörünge bir eğri gibi düşünülürse vektör kalkülüsündeki eğri uzunluk formülasyonu kullanılabilir [23]. Her bir GS çevriminde elde edilen uç işlevci koordinat çerçevesi T_r ile tanımlandığında $\dot{d}_r \in \mathbb{R}^3$ yörüngeye teğet vektörü veriyorsa l_c kamera yörünge uzunluğu şu şekildedir

$$T_r = \begin{bmatrix} R_r & d_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$l_c = \int_0^{t_c} \|\dot{d}_r\| . dt \quad (14)$$

3) *Hata maliyetleri*: Klasik kapalı çevrim geribesleme kontrol sistemleri sürekli durum hatası gibi hata değerlerinin yanında hatanın integralini içeren hata tanımlarına göre de değerlendirilir [24]. Bu tanımlar GS sistemleri için de kullanılabilir

$$e_{IAE} = \int_0^{t_c} \|e(t)\| . dt \quad (15)$$

$$e_{ISE} = \int_0^{t_c} \|e(t)\|^2 . dt \quad (16)$$

$$e_{ITAE} = \int_0^{t_c} t . \|e(t)\| . dt \quad (17)$$

4) *Yörünge eğriliği*: GS için yörünge planlaması yapan çalışmalarda belirtildiği üzere GS kamera yörüngesi olabildiğince düz olmalıdır [19]-[22]. Bu anlamda eğrilik bir GS değerlendirme ölçütü olabilir. Ψ birim teğet vektör ve κ eğrilik olmak üzere

$$\Psi = \frac{\dot{d}_r}{\|\dot{d}_r\|} \quad (18)$$

$$\kappa = \left\| \frac{d\Psi}{dl_c} \right\|$$

şekindedir.

3 Benzetim çalışmaları

Çalışmada önerilen sisteminin başarımını test etmek amacıyla MATLAB Simulink, Robotics Toolbox, Machine Vision Toolbox, Fuzzy Logic Toolbox ve Neural Networks Toolbox kullanılarak önerilen GTGS sisteminin benzetimi yapılmıştır [25]. Benzetimde robot manipülatör olarak Puma 560 manipülatör kullanılmıştır. Eldeki-göz konfigürasyonlu robotun kameradan sonlandırıcıya dönüşüme ihtiyaç duymadığı varsayılmıştır. Kameranın çözünürlüğü 1024×1024, merkez noktası (512,512) ve odak uzaklığı 8 mm'dir. Ayrıca kameranın aldığı görüntüler kalibre edilmiştir.

Çalışmada P^* ile tanımlanacak öznitelik noktaları 4 noktalı, kenar uzunluğu 0.5 m olan karenin köşelerinde olacak şekildedir. Bu noktaların 3B uzaydaki koordinatları ve karenin merkezinin kamera merkezi ile kaçışacak şekilde oluşturulan istenen öznitelik nokta koordinat matrisi aşağıda verilmiştir:

$$P^*(X, Y, Z) = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.25 & -0.25 & -0.25 \\ -0.25 & 0.25 & 0.25 & -0.25 \\ 2.5 & 2.5 & 2.5 & 2.5 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$s^*(u, v) = \begin{bmatrix} 612 & 412 & 412 & 612 \\ 412 & 412 & 612 & 612 \end{bmatrix}$$

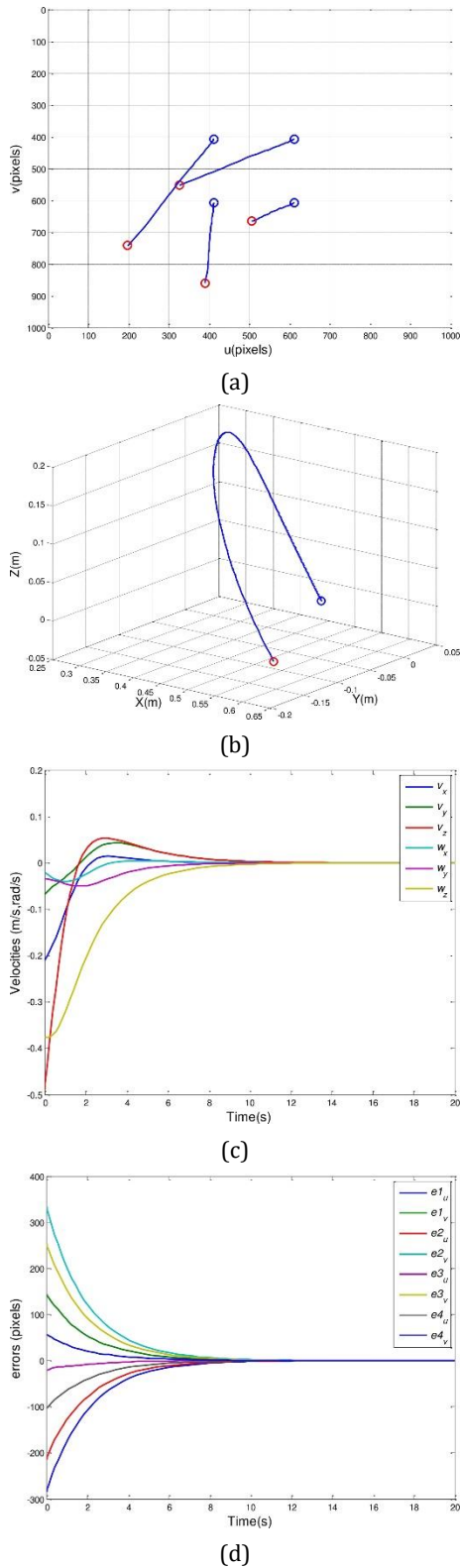
Benzetimde derinlik kestirim değeri (\hat{Z}) 2 m kabul edilmiştir. GTGS kinematik hız kontrolcüsü tasarladığından robot dinamikleri dahil edilmemiş, başlangıç eklem açıları aşağıda verilmiştir:

$$q_0 = [0 \quad \pi/4 \quad \pi \quad \pi/10 \quad \pi/4 \quad -\pi/4] \text{ rad} \quad (20)$$

3.1 Durum 1: Klasik GTGS sistemi

Önerilen sistemi karşılaştırmak amacıyla önce klasik GTGS sisteminin benzetim sonuçları verilmiştir. Burada λ 0.5 olarak seçilmiştir. Şekil 4'te görüntü düzleminde öznitelik hareketleri, kartezyen düzlemde izlenen yörünge, hız sinyalleri ve hata sinyalleri sırasıyla verilmiştir.

Şekil 4a'daki öznitelik hareketlerinde kırmızı daireler başlangıç öznitelik noktalarını mavi daireler ise bitiş öznitelik noktalarını



Şekil 4. Klasik GTGS için a) Öznitelik hareketleri b) İzlenen yörünge c) Hız sinyalleri d) Hata sinyalleri.

göstermektedir. Öznitelik hareketlerinin klasik GTGS'den beklendiği şekilde doğrusal olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 4d incelendiğinde hataların da beklendiği şekilde üstel azaldığı görülmektedir.

GTGS için yakınsama, (12)'de $e_{thr} = 1$ olarak varsayılmaktadır ve klasik GTGS için yörünge, hız ve hata sinyallerinden elde edilen değerlendirme ölçüt değerleri ise sırasıyla yakınsama zamanı 10.65 s., yörünge uzunluğu 0.6782 m, yörünge eğriliği 0.0073 olarak bulunmuştur. e_{IAE} , e_{ISE} ve e_{ITAE} değerleri ise sırasıyla $3.91e+04$, $1.19e+07$, $7.64e+04$ olarak bulunmuştur.

3.2 Durum 2: Önerilen akıllı GTGS sistemi

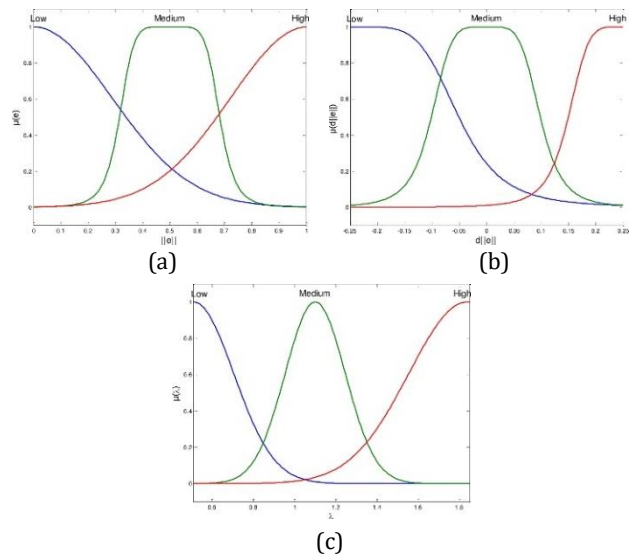
Önerilen akıllı GTGS sisteminde SA üç katmanlı, giriş çıkış sayısına bağlı olarak ve gizli katman giriş ve çıkış katmanından büyük olacak şekilde 8-10-6 nöronlu olarak tasarlanmıştır. Eğitim için 17 farklı başlangıç eklem açılarıyla, 2 m \hat{Z} kestirimiyle ve sabit $\lambda = 0.5$ değeri ile beraber klasik GTGS ile alınan hata (998×8) ve hız (994×6) verileri kullanılmıştır. LM algoritması ile 10^{-5} 'den daha küçük bir MSE elde edilene kadar eğitime devam edilmiştir.

λ_a için kullanılacak olan BM birimi her bir hata ve hata türev değerini giriş olarak alamayacağından bu değerlerin norm değerleri alınıp normalize edilerek BM birimine verilmiştir. BM birimi Mamdani tipindedir. Giriş ve çıkış için tanımlanan üyelik fonksiyonları gauss ve gauss çanı şeklindedir. Giriş-çıkış üyelik fonksiyonları Şekil 5'te, kural tabanı Tablo 1'de verilmiştir.

Önerilen GTGS sisteminin sonuçları ise sırasıyla Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6.a'da öznitelik hareketlerinin SA'nın yakınsama etkisiyle eğikleştiği görülmektedir. Şekil 6.c-d'deki hız sinyallerine, hata sinyallerine ve Şekil 7'deki λ_a 'ya bakıldığında ise hata-hata türevinin belirli genlik değerinin altına inene kadar BM biriminin çıkışının sabit ve düşük olduğu, daha sonra BM biriminin aktifleşerek λ_a değerini ayarladığı görülmektedir. BM'nin sabit kaldığı zaman aralığı 0-3.28 s. arasındadır. BM biriminin kesiksiz λ_a geçişi sayesinde hız

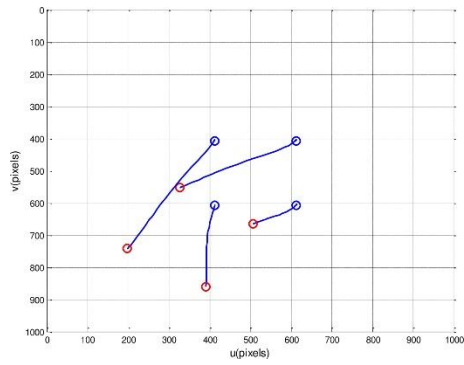
Tablo 1: Bulanık denetleyici için kural tabanı.

$\ e\ / \ de/dt\ $	Düşük	Orta	Yüksek
Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Orta	Yüksek	Orta	Düşük
Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük

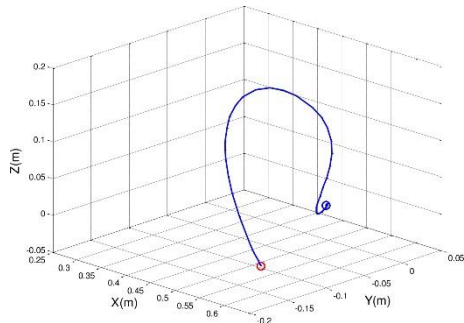


Şekil 5. BM birimi için üyelik fonksiyonları.

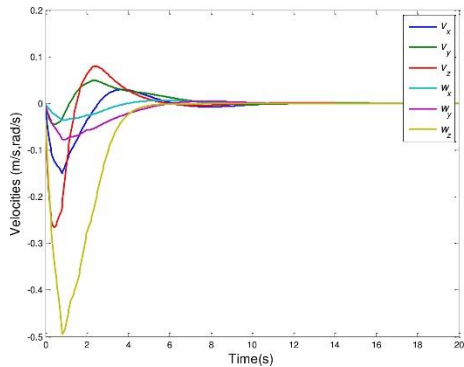
a) $\|e\|$ b) $d\|e\|/dt$ c) λ_a



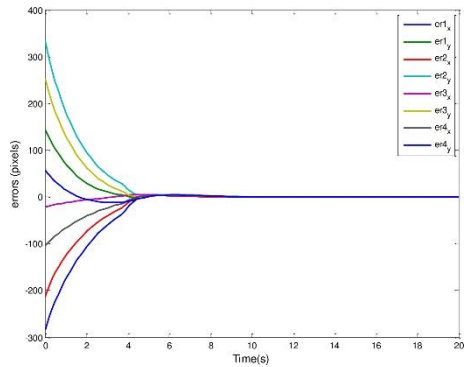
(a)



(b)



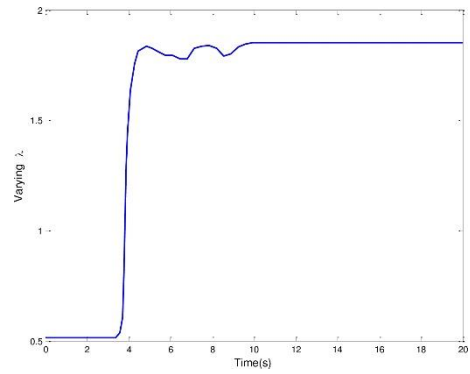
(c)



(d)

Şekil 6. Önerilen sistem için a) Öznitelik hareketleri b) İzlenen yörünge c) Hız sinyalleri d) Hata sinyalleri.

sinyallerinde bir süreksizlik görülmemekte, ayrıca kullanılan kontrolcü sayesinde başlangıç hız değerleri sıfır olarak tutulmaktadır. Geçici durumdan sonra λ_a 'nın değişimindeki küçük değişimler SA'nın yakınsama hatalarından kaynaklanmaktadır. λ_a 'nın artışı ile gelen hız artışları λ_a 'nın



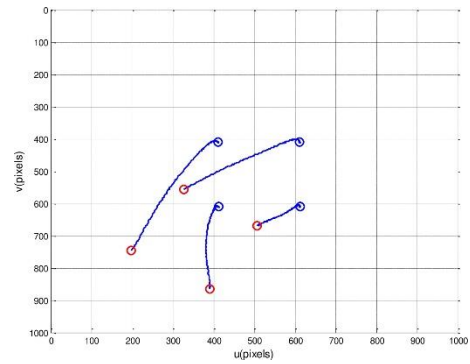
Şekil 7. λ_a 'nın değişimi.

sabit kaldığı zaman aralığına bakarak hız sınırları içindedir.

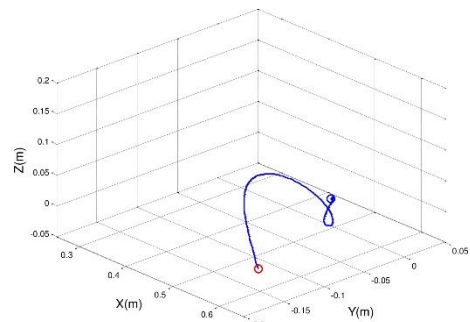
Önerilen akıllı GTGS sistemi için yörünge, hız ve hata sinyallerinden elde edilen değerlendirme ölçüt değerleri ise sırasıyla yakınsama zamanı 8.79 s, yörünge uzunluğu 0.6193 m, yörünge eğriliği 0.0153 olarak bulunmuştur. e_{IAE} , e_{ISE} ve e_{ITAE} değerleri ise sırasıyla $3.12e+04$, $1.1e+07$, $4.03e+04$ olarak bulunmuştur. Bu sonuçlardan ve Şekil 6.b'den yola çıkarak önerilen sistemin klasik GTGS'ye göre daha kısa bir yörünge izleyerek daha hızlı yakınsadığı, bununla birlikte daha eğrisel bir yörüngeyi daha küçük hatalarla takip edebildiği söylenebilir.

3.3 Durum 3: Önerilen akıllı GTGS sisteminin gürültüye karşı başarımı

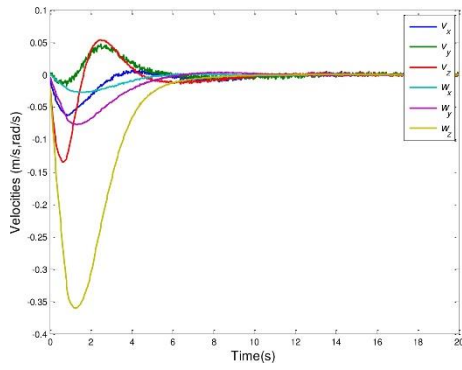
Gerçeklenen tüm GS sistemleri görüntü gürültüsünden etkilenmektedir. Önerilen sistemin başarımı göstermek adına kullanılan her bir öznitelik nokta koordinatına eklenen $-1 < w < 1$ arasında sıfır ortalamalı gürültü eklenmiştir. Bu bozucunun varlığında sistem başarımı sırasıyla Şekil 8'de gösterilmiştir.



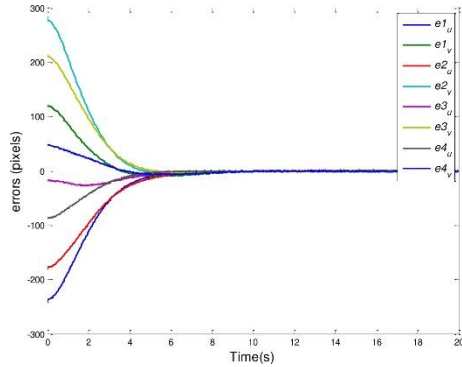
(a)



(b)

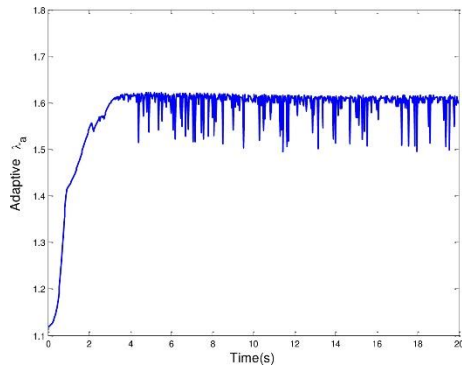


(c)



(d)

Şekil 8. Gürültü altında a) Öznitelik hareketleri b) İzlenen yörünge c) Hız sinyalleri d) Hata sinyalleri.



Şekil 9. λ_a 'nın gürültü altında değişimi.

Gürültünün etkileri ise tüm şekillerde açıkça görülmektedir. Gürültünün hataya göre oranı hareketin yakınsaması sırasında küçük kalırken sistemi etkilememekte, daha sonra sifıra yaklaşan hatayı bozan gürültü Şekil 9'da görüldüğü üzere hata-hata türevindeki ani değişimlerden dolayı λ_a 'nın ani değişmesine sebep olmaktadır. Daha sonra sifıra yakınsayan sistem sadece gürültünün anlık değerlerinden etkilenmektedir.

Bu tip gürültü içeren sistemlerde yakınsama zamanı tam olarak belirtilemez. Bununla birlikte yörünge uzunluğu 0.62 m, yörünge eğriligi 0.02 olarak bulunmuştur. Önerilen sistemde bu değerler gürültünün etkisiyle büyümüştür. Hata değerlerine bakıldığında ise e_{IAE} , e_{ISE} ve e_{ITAE} değerleri sırasıyla $3.15e+04$, $0.97e+06$, $4.63e+04$ olarak bulunmuştur.

4 Sonuç ve gelecek çalışmalar

Bu çalışmada klasik GTGS sisteminin başlıca sorunlarından olan etkileşim matrisi tekillikleri ve sabit kazanç ile gelen yakınsama hızı sorunlarını çözmek adına SA ve BM'den yararlanan akıllı bir GTGS sistemi önerilmiştir.

Önerilen sistem SA'yı kullanarak etkileşim matrisiyle hatanın çarpımına yakınsamakta ve kazançla çarpılabilecek halde çıkışlar üretmektedir. SA'nın eğitimi sırasında klasik GTGS ile elde edilen sinyaller kullanılmıştır. Sistemin başarımı yeterli sayılsa da ANFIS, radyal tabanlı ağlar gibi farklı yakınsayıcılarla da sistem denenebilir.

Klasik GTGS sistemleri sabit kazanç ile birlikte uzun yakınsama zamanlarına sebep olmaktadır. Önerilen sistem hata-hata türevinin durumuna göre değişen kazanç sayesinde düşük hızlarla başlayıp yüksek hızlara geçerek daha hızlı yakınsama sağlamaktadır. Elde edilen bu başarıyı gerçek bir manipülatörün yapacağı görevi daha hızlı bitirmesini sağlayabilecektir.

Çalışmada ayrıca GS sistemlerinin değerlendirilmesinde kullanılabilecek ölçütler tanımlanmış ve önerilen GTGS sistemi ile klasik GTGS bu ölçütlere göre karşılaştırılmıştır. Bu ölçütler ışığında önerilen sistemin tanımlı aynı GS görevi için daha kısa bir yörüngeyi daha düşük hatalarla takip ettiği, bunun yanında izlediği yörüngeyi daha eğrisel olduğu gözlemlenmiştir.

Önerilen sistemin başarımı benzetim çalışmaları ile ortaya konmuş, gürültü gibi bozucu durumu karşıda başarımının benzer olduğu gözlemlenmiştir.

Önerilen sistem sadece nokta özniteliklere uygulanmıştır. Şekil veya çizgi halindeki öznitelik uygulamalarda daha popüler hale gelmektedir ve ilerleyen çalışmalarda sistemin bu tip özniteliklere uyarlanması hedeflenmektedir. Ayrıca önerilen sistem robot manipülatörler için uygun olsa da insansız hava araçları gibi eksik tahrikli sistemler için geliştirilmesi gerekmektedir. İlerleyen çalışmalarda bu gibi sistemler için farklı akıllı GS sistemlerinin önerilmesi hedeflenmektedir.

5 Kaynaklar

- [1] Hutchinson S, Hager G, Corke P. "A Tutorial On Visual Servo Control". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12 (5), 651-670, 1996.
- [2] Hill J, Park WT. "Real Time Control Of A Robot With A Mobile Camera". *Proceedings of the 9th ISIR*, 233-246, 1979.
- [3] Chaumette F, Hutchinson S. "Visual Servo Control, Part I: Basic Approaches". *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 13 (4), 82-90, 2006.
- [4] Malis E, Chaumette F, Boudet S. "2-1/2 D Visual Servoing". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15, 238-250, 1999.
- [5] Corke P, Hutchinson S. "A New Partitioned Approach To Image-Based Visual Servo Control". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17, 507-515, 2001.
- [6] Kallem V, Swensen JP, Hager GD, Cowan NJ. "Kernel-Based Visual Servoing". *IEEE/RSJ International Conference of Intelligent Robotic Systems*, 1975-1980, 2007.
- [7] Collewet C, Marchand E, Chaumette F. "Visual Servoing Set Free From Image Processing". *IEEE International Conference of Robotics and Automation*, 81-86, 2008.

- [8] Chaumette F. *Potential Problems Of Stability And Convergence In Image-Based And Position-Based Visual Servoing*. Lecture Notes on Control Information Science, 66-78, Berlin, Springer-Verlag, 1998.
- [9] Kumar PP, Behera L. "Visual Servoing Of Redundant Manipulator With Jacobian Matrix Estimation Using Self-Organizing Map". *Robotics and Autonomous Systems*, 58, 978-990, 2010.
- [10] Kosmopoulos DI. "Robust Jacobian Matrix Estimation For Image-Based Visual Servoing", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27, 82-87, 2011.
- [11] Sebastián JM, Pari L, Angel L, Traslosheros A. "Uncalibrated Visual Servoing Using The Fundamental Matrix", *Robotics and Autonomous Systems*, 57, 1-10, 2009.
- [12] Zhong X, Zhong X, Peng X. "Robust Kalman Filtering Cooperated Elman Neural Network Learning For Vision-Sensing-Based Robotic Manipulation With Global Stability", *Sensors*, 13(10), 13464-13486, 2013.
- [13] Zhong X, Zhong X, Peng X. "Robots Visual Servo Control With Features Constraint Employing Kalman-Neural-Network Filtering Scheme", *Neurocomputing*, 151, 268-277, 2015.
- [14] Gonçalves PJS, Mendonça LF, Sousa JMC, Pinto JRC, "Uncalibrated Eye-to-Hand Visual Servoing Using Inverse Fuzzy Models", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 16 (2), 341-353, 2008.
- [15] Mansard N, Chaumette F. "Task Sequencing For High-Level Sensor-Based Control", *IEEE Transactions On Robotics*, 23 (1), 60-72, 2007.
- [16] Kermorgant O, Chaumette F. "Dealing With Constraints In Sensor-Based Robot Control", *IEEE Transactions on Robotics*, 30, 244-257, 2014.
- [17] Slotine JJ, Weiping L., *Applied Nonlinear Control*, Upper Saddle River, Prentice Hall, 1991.
- [18] Kaynak O, Erbatur K, Ertuğrul M. "The Fusion Of Computationally Intelligent Methodologies And Sliding-Mode Control-A Survey". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48 (1), 4-17, 2001.
- [19] Tahri O, Chaumette F. "Point-Based And Region-Based Image Moments For Visual Servoing Of Planar Objects", *IEEE Transactions on Robotics*, 21, 1116-1127, 2005.
- [20] Haykin S., *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Upper Saddle River, Prentice-Hall, 1998.
- [21] Jang SR, Sun CT., *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Upper Saddle River, Prentice-Hall, 1997.
- [22] Chesi G, Hung YS. "Global Path-Planning For Constrained And Optimal Visual Servoing", *IEEE Transactions on Robotics*, 23, 1050-1060, 2007.
- [23] Colley SJ., *Vector Calculus*, Upper Saddle River, Pearson, 2012.
- [24] Aström KJ, Hagglund T., *Advanced PID Control*, Research Triangle Park, ISA Publishing, 2006.
- [25] Corke P., *Robotics, Vision & Control*, Berlin, Springer, 2011.