

Hata tanıma ve hata toleranslı kontrol: Destek vektörü makineleri yaklaşımı

Rana ORTAÇ KABAOĞLU*, **İbrahim EKSİN**

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrol ve Otomasyon Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Geleneksel bir geri-beslemeli kontrol sistemi, bazı arıza durumlarında istenilen başarıyı veya kararlılığı sağlamayabilir. Bu tür zayıflıkların üstesinden gelebilmek için, bir yandan istenen kararlılık ve performans özelliklerini sağlayacak bir yandan da elemanların kayıplarını telafi edecek hata toleranslı kontrol tasarım yöntemleri geliştirilmiştir. Geleneksel hata toleranslı kontrol sistemlerinde önce olası hatalar tespit edilir, sonra kararlılığı ve kabul edilebilen bir başarıyı sağlayacak yenden düzenlemeyi gerçekleştirmesi için akıllı bir karar mekanizması devreye girer. Bununla, tespit edilmiş duruma en uygun olan önceden tasarlanmış kontrolör devreye sokulur. Bu çalışmada önerilen destek vektörü makineleri ile doğrudan hata toleranslı kontrol yöntemi, hatanın etkisini giderecek düzenleme yapması için, hata bulma ve tanıma aşamalarına gereksinim duymaz. Bu çalışmada amaç, sistemde oluşabilecek hatanın etkisini sadece sistem çıkışından alınan verilerle çevrim-içi çalışan bir düzenleme ile ortadan kaldırmaktır. Bu yöntemde bir akıllı kontrolör sistemi kurulur. Çevrim-dışı gerçekleştirilen eğitimde kullanılacak hatalı durumlara ilişkin kontrolör katsayıları genetik algoritma arama yöntemi ile tespit edilir. PID tipi kontrolör katsayılarının her biri için kurulan destek vektörü bağlanım makinesi, toplanan hatalı ve hatasız sistem çıkışları giriş ve ilgili katsayılar çıkış olacak şekilde eğitilir. Sistem çalışırken belli aralıklarla alınan sistem cevabı karar mekanizması tarafından değerlendirilir. Kontrolör katsayıları, sistem cevabına göre çevrim-içi ayarlanır ve sistemin istenen davranışa götürülmesi sağlanır. Hata tanıma birimi, çıkışı hatanın türü olan bir destek vektörü makinesi ile benzer şekilde oluşturulur ve paralel çalıştırılır. Yöntemin, çift tanklı sıvı seviye sisteminde uygulaması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Hata toleranslı kontrol, hata bulma ve tanıma, destek vektörü makineleri, PID kontrolör, çift tanklı sıvı seviye sistemi.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Rana ORTAÇ KABAOĞLU. rana@istanbul.edu.tr; Tel: (212) 473 70 70 - 17908.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrol ve Otomasyon Programında tamamlanmış olan "Destek vektörü makineleri tabanlı hata bulma, tanıma ve hata toleranslı kontrol yöntemleri" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 25.05.2010 tarihinde dergiye ulaşmış, 14.06.2010 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.08.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Ortaç Kabaoğlu, R., Eksin, İ., (2011) 'Hata tanıma ve hata toleranslı kontrol: Destek vektörü makineleri yaklaşımı', İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 10: 3, 71-82" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

Fault diagnosis and fault tolerant control: Support vector machines approach

Extended abstract

Because of increasing need for reliability, safety, maintainability and survivability in technological systems, fault tolerant control system has become extremely important. Fault tolerant control systems have been developed to overcome some weaknesses of the conventional feedback control design, such as instability and unsatisfactory performance in the faulty cases. In complex systems such as aircrafts, nuclear power plants, chemical plants etc., the results of a minor fault in the system can be destructive. Therefore, it is necessary to design control systems that are able to tolerate potential faults in these systems. A control system with this kind of fault tolerance capability is defined as fault tolerant control system. A fault tolerant control system is a closed-loop control system which can tolerate malfunctions while maintaining desirable performance and stability properties. A typical active fault tolerant control system includes three sub-systems: reconfigurable controller, fault detection and diagnosis unit and decision supervisor unit. The reconfigurable controller is placed in control loop, instead of regular controller in traditional closed-loop control system. Since the real time toleration of faults can only be achieved if the control system has an automatic reconfiguration mechanism. This reconfiguration is generally activated after a fault has been detected and isolated. A fault detection and diagnosis system is a unit that obtains the occurrence of faults and determines their features in terms of type, location, size and/or time. The decision supervisor activates reconfiguration action in response, which can be pre-determined for each fault or obtained from real time analysis and optimisation. In active fault tolerant control systems, reconfiguration mechanism can be classified as on-line controller selection and on-line controller calculation techniques. In the on-line controller selection approach, the controllers associated with presumed faulty conditions are computed in an off-line manner in the design stage and they are selected in an on-line manner based on the real time information from fault detection and diagnosis algorithm. In the on-line controller calculation approach, the controller parameters are calculated in an on-line manner after the occurrence of fault. In this study, an active fault tolerant control technique, support vector machines based direct fault

tolerant control system, is presented. In general, reconfiguration mechanism of a fault tolerant control system utilizes the information from fault detection and diagnosis unit at the decision stage. In the presented method, reconfiguration mechanism and diagnosis unit work independently. Both of them use only real time system outputs. A powerful and fast learning algorithm is needed for this purpose. Support vector machines is one of the most popular intelligent machine learning tools. They have become a very good alternative of neural networks with their superior generalization capacity, classification, regression and modeling performance. In this paper, support vector regression machines have been used in fault detection and diagnosis process and also in reconfigurable controller unit. PID type controllers have been used in reconfiguration sub-system. The PID coefficients of faulty and un-faulty cases to be used in training stage are obtained by genetic algorithm approach in an off-line manner. In reconfiguration mechanism, for each PID coefficient one support vector regression machine is set up. Faulty and un-faulty system outputs are collected for different input signals. In training stage, faulty system outputs and corresponding PID parameters are used as support vector regression machines' inputs and outputs, respectively. Thus the training phase of support vector machines is completed in an off-line manner. After completing the training phase, system is run for the reference input signal. The outputs of system are sent to decision unit periodically. Three of support vector regression machines are simultaneously evaluated the data sent by the system, and produce coefficients of the PID controller. The controller of which its coefficients are reconfigured, starts to work to maintain system performance in an on-line manner. In order to determine the type of fault, a similar process is exploited using one support vector regression machine. In training phase, inputs of this support vector regression machine are faulty and un-faulty system outputs but outputs are the features of the faults. This fault diagnosis unit runs parallel with intelligent fault tolerant controller. The performance of this knowledge based fault diagnosis and active fault tolerant control methods is illustrated on simulation example involving a two-tank water level control system under faulty conditions.

Keywords: Fault tolerant control, fault detection and diagnosis, support vector machines, PID controllers, two tank water level system.

Giriş

Modern teknolojik sistemlerde performans artırımını ve güvenilirlik sağlanması amaçlarıyla karmaşık kontrol sistemlerinden faydalanılır. Bir sistemde, sistemin eskiliğinden ve kullanılma sıklığından zamanla hatalar oluşabileceği gibi kullanıcıların sebep olacağı kurulum ve bakımından kaynaklanan hatalar da görülebilir. Ayrıca gürültü, bozucular ve kazalar gibi dış etmenler de hata sebebi olabilir. Geleneksel bir geri-beslemeli kontrol sistemi, eyleyici, algılayıcı veya diğer sistem elemanlarındaki bazı arıza durumlarında istenilen başarıyı veya kararlılığı sağlamayabilir. Bu tür zayıflıkların üstesinden gelebilmek için, bir yandan istenen kararlılık ve performans özelliklerini sağlayacak bir yandan da elemanların kayıplarını telafi edecek yeni kontrol sistem tasarımı yöntemleri geliştirilmiştir. Bu, özellikle uçaklar, uzay araçları, nükleer güç sistemleri ve tehlikeli maddeleri işleyen kimyasal sistemler gibi güvenliğin üst düzeyde olması gereken sistemlerde önemlidir. Bu tür sistemlerde çok küçük bir hatanın doğuracağı sonuçlar çok büyük ve yıkıcı olabilir. Bu sebepten, güvenilirliğe, emniyete ve hatanın toleransına yönelik talepler genellikle yüksektir. Sistemin güvenilirliğini sağlamak için sistemdeki potansiyel hatalara tolerans sağlayacak kontrol sistemini tasarlamak gerekmektedir. Bu tür kontrol sistemlerine Hata Toleranslı Kontrol (HTK) sistemleri denir (Blanke vd., 2001).

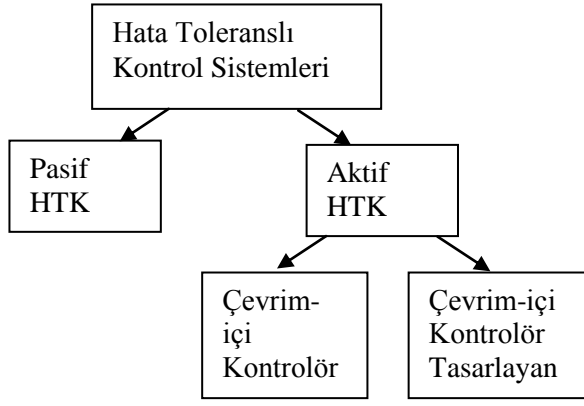
Geleneksel hata toleranslı kontrol sistemlerinde hatanın varlığı tespit edilir (*hata bulma*), yeri ve zamanı belirlenir (*hata tanıma*) ve en son olarak da bu hatanın yarattığı sapmaların etkisini yok ederek sistemi nominal davranışına geri getirecek düzenleme yapılır (*hata toleransı*) (Patton, 1997). Kapalı çevrim düzeneği, gözlenen bir hatayı belirli ölçüde giderme yetisine sahiptir. Ancak kapalı çevrimin hatayı telafi edemediği durumlarda kontrolörün yeniden düzenlenmesi kaçınılmaz olabilir (Yu vd., 2005). Bu sorunların giderilmesi için çeşitli HTK teknikleri geliştirilmiştir. Gelişen teknoloji ve yazılımlar sayesinde, donanım yükünün azaltılmasında önemli ilerlemeler sağlanmıştır (Tortora, 2002, Jiang ve Chowdhury, 2005, Jiang ve Zhang, 2006, Huo ve Fang, 2007, Zhang ve Jiang, 2008). Özellikle sinir ağları, bulanık mantık ve makine öğrenimi

gibi akıllı algoritmalar, bu ilerlemenin en çok kullanılan araçları olmuşlardır. Bu çalışmada destek vektörü makinelerinin yüksek bağlanım kapasitesi ile hata toleranslı kontrol probleminin çözümü için değişik bir yaklaşım önerilmiştir.

Hata toleranslı kontrol sistemleri

Normal çalışma koşullarından sapan bir sistemi kontrol etme fikri pek çok araştırmamanın konusu olmuştur. Bu araştırmalardan doğan hata toleranslı kontrol sistemlerinin tasarımlarının en önemli konusu, sistemin hem geçici hem de sürekli durum başarımını, sadece normal çalışma koşullarında değil, hatalı koşullarda da koruyabilmektir. Bir HTK sisteminden beklenen, hataları çok kısa bir sürede tespit edip uygun kontrolör düzenlemesiyle hatanın etkisini gidermesidir. Bu, sistemin normal çalışmasının devamı demektir ve oldukça önemlidir. HTK sistemleri, pek çok parametreye göre sınıflandırılabilirler. Kullanılan matematiksel tasarım aracına, tasarım yaklaşımına, yeniden yapılandırma mekanizmasına, ilgilendiği sistem türüne göre sınıflandırma yapmak mümkündür. Genel kabul gören en temel sınıflandırma, HTK sistemlerinin *aktif hata toleranslı kontrol* (AHTK) ve *pasif hata toleranslı kontrol* (PHTK) olarak ikiye ayrılmasıdır (Şekil 1). Uygulanacak yaklaşım, sistemi etkileyen hatayı belirleme yeteneğine, hatanın sebep olduğu değişikliklerin etkilerine ve sistemde kullanılan fazlalık türüne bağlıdır (Patton, 1997, Blanke vd., 2003).

Pasif hata toleranslı kontrol sistemleri, gürbüz kontrol yöntemlerini kullanarak kapalı çevrimli sistemi tasarlar ve belli hatalara karşı sistemin duyarsız olmasını sağlar. Bu hatalar kontrolör tasarımından önce bilinmelidir. Kontrolör bir kere tasarlandıktan sonra herhangi bir çevrim-içi hata bilgisi girişi olmaksızın beklenen hataları telafi edebilir (Eterno vd., 1985, Liang vd., 2000). PHTK sistemi hatalara, sanki onlar modelleme belirsizliğinin kaynaklarıymış gibi davranır. Hata tolerans becerisi oldukça sınırlıdır. Çevrim-içi çalışırken pasif bir kontrolör, önceden düşünülen hatalara karşı gürbüzdür. Bazı sistemlerde sadece PHTK'ye güvenmek oldukça riskli olacaktır (Veillette vd., 1992, Blanke vd., 2003).



Şekil 7. Hata toleranslı kontrol sistemlerinin sınıflandırılması

Aktif hata toleranslı kontrol sistemleri ise yeniden yapılandırma mekanizmaları ile kontrol hareketini yeniden şekillendirerek hataların etkisiyle bozulan sistem cevabını tekrar istenen seviyeye getirme ilkesiyle çalışır. AHTK sistemleri, beklenmeyen hataları düzenlemek için mevcut kaynakları, donanım ve analitik fazlalığı kullanarak tasarlanabilir (Blanke vd., 2003). Bir AHTK sistemi, üç işlemi gerçekleştirir; anlamlı miktarda çevrim-içi hata bulma, gerçek zamanlı karar-alma ve kontrolör yeniden yapılandırması (Zhang ve Jiang, 2006). Genel olarak AHTK sistemleri aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- Mevcut donanım fazlalığına ek olarak analitik fazlalığı da kullanır.
- Hata bulma ve tanıma algoritması ile yeniden yapılandırılabilir kontrolör kullanır.
- Hata ile bozulmuş başarımlı alır, kullanır.
- Çok sayıda hata ile başa çıkabilir.

AHTK sistemleri, genel olarak üç ana birimden oluşur: Bunlardan birincisi, klasik kontrol döngüsüdür. İkincisi, çevrim-içi hata bulma ve tanımayı içeren katmandır. Üçüncüsü ise karar veren denetçi bir mekanizmadır (Puig ve Quevedo, 2001). Birinci birimde algılayıcı, eyleyici ve kontrolör içeren geleneksel kontrol döngüsü bulunur. İkincide, hata bulma ve teşhisi yapılır. Üçüncüde, denetçi işlevi gerçekleştirilir. Denetçi, karar mekanizmasıdır ve yeniden yapılandırma (reconfiguration) hareketinde aktiftir. Denetçinin seçeceği kontrolörün parametreleri, her bir hata için önceden ayarlanmış olabileceği gibi

gerçek zamanlı olarak da belirlenebilir (Puig ve Quevedo, 2001). Bu açıdan aktif hata toleranslı kontrol sistemlerinde yeniden yapılandırma mekanizmaları, (i) çevrim-içi kontrolör seçen ve (ii) çevrim-içi kontrolör parametresi hesaplayan teknikler olarak ikiye ayrılabilir (Mahmoud vd., 2003). Çevrim-içi kontrolör seçimi yaklaşımında, önceden belirlenmiş hatalara özel olan kontrolörler, çevrim-dışı tasarlanır ve hata bulma tanıma algoritmasından gelen bilgilere göre çevrim-içi seçilir (Ducard ve Geering, 2006, Ortaç-Kabaoğlu vd., 2009a, Zhang ve Jiang, 2001). Çevrim-içi kontrolör hesaplanması yaklaşımında ise kontrolör parametreleri hatanın tespiti ile birlikte gelen bilgilere göre hesaplanır (Kale ve Chipperfield, 2005, Kim vd., 2003, Napolitano vd., 1995, Ortaç-Kabaoğlu vd., 2009b). Böylece sistemde bir hata oluştuğunda, kapalı çevrim başarımını devam ettirecek uygun bir kontrolör seçilebilir.

Bu çalışmada önerilen destek vektörü makineleri ile doğrudan hata toleranslı kontrol yöntemi, akıllı bir yeniden yapılandırılabilir kontrolör birimi içerir. Yeniden yapılandırma mekanizması çevrim-içi kontrolör parametresi hesaplayan yapıdadır. Amaç, sistemde oluşabilecek hatanın etkisini çevrim-içi çalışan bir düzenleme ile ortadan kaldırmaktır. Önerilen yöntemde, sistemin çıkışları belli aralıklarla gözlenir ve bu çıkışları istenen sistem davranışına getirecek PID tipi kontrolörün katsayıları çevrim-içi belirlenir. Katsayıların belirlenmesi için kullanılacak mekanizmanın hızlı ve genelleştirme becerisi yüksek bir yöntemle çalışması gerekmektedir. Bu amaçla bu özellikleri taşıyan destek vektörü makineleri ile bağlantı (DVM-B) kullanılmıştır. Yöntemin, çift tanklı sıvı seviye sisteminde uygulaması yapılmıştır. Sonuçlar oldukça iyidir.

Destek vektörü makineleri

Vapnik (1995, 1998), 70'lerin sonlarında "Destek Vektörü Makineleri" (DVM) algoritmalarını sunmuştur. İstatistik, makine öğrenimi ve sinir ağlarından pek çok yöntemi birleştiren bu öğrenme algoritması *yapısal riski en aza indirme* ilkesini içermektedir. Çekirdek işlevi eşleştirme (mapping) yönteminin kullanımı ile DVM'ler, küçük veriler üzerinde de iyi bir sınıflandırma veya bağlantı genelleştirme sağlayarak sinir

ağlarına iyi bir alternatif olmuşlardır (Junli ve Licheng, 2000, Smola ve Scholkopf, 1998). Bu çalışmada, yeniden yapılandırma aşamasında kontrolör katsayıları, destek vektörü makinelerinin bağlanım mekanizmasıyla çevrim-içi ayarlanır.

Destek vektörü makineleri ile bağlanım

Destek vektörü makineleri, bağlanım (regresyon) problemlerinde başarıyla kullanılmaktadır (Smola ve Scholkopf, 1998). Giriş-çıkış ilişkisi olan $f(x)$ işlevinin öğrenilmesi için kullanılacak eğitim verileri kümesi aşağıdaki gibi verilmiş olsun,

$$D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_l, y_l)\}, \quad x \in R^n, y \in R \quad (1)$$

Burada, giriş verileri x 'ler, N boyutlu vektörler ve genelde sistem cevabı olan y 'ler de skaler değerlerdir. Destek vektörü makineleri kestirilecek işlevi aşağıdaki biçimde ele alır; Giriş-çıkış ilişkisi nitelik uzayında,

$$f(x, w) = w^T x + b \quad (2)$$

biçiminde doğrusal bir bağlanım modeliyle modellenebilir. Bağlanımda, *yaklaşım yanılğısı* kullanılır. Uygulamada çeşitli kayıp işlevleri bulunmaktadır. Burada kullanılacak kayıp işlevi ε -toleranslı kayıp işlevi;

$$Y_\varepsilon = \begin{cases} 0 & \text{eger } |y - f(x, w)| < \varepsilon \\ |y - f(x, w)| - \varepsilon & \text{diger} \end{cases} \quad (3)$$

DVM ile bağlanımın ana fikri şudur: Kestirim işlevi f 'nin etrafında ε yarıçaplı bir tüp veya band tanımlanır. Eğer f değeri ε tüpünün içinde yer alırsa kayıp yok demektir. Bir diğer deyişle tahmin edilen f ile ölçülen değer y arasındaki fark ε 'dan az ise kayıp sıfırdır. Tüpün dışında yer alan diğer tüm tahmin noktaları için kayıp, tahmin noktası ile ε yarıçapının farkının mutlak değerine eşittir. $\varepsilon=0$ için Vapnik'in kayıp işlevi, mutlak kayıp işlevine eşittir. Bağlanım için DVM algoritmasının formülasyonunda yanılğı toplamını ifade eden görgül (deneysel ve gözlemsel) riskin ve $\|w\|^2$ nin eşzamanlı en küçük-

leme amaçtır. Dolayısıyla doğrusal bir $f(x, w) = w^T x + b$ bağlanım hiperdüzlemi,

$$R(w, \xi, \xi^*) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi + \xi^*) \quad (4)$$

ifadesinin en küçükleme ile ξ ve ξ^* esnek değişkenleri cinsinden bulunur. Kısıtlamalar,

$$\begin{aligned} y_i - w^T x_i - b &\leq \varepsilon + \xi \quad i = 1, \dots, n \\ w^T x_i + b - y_i &\leq \varepsilon + \xi^* \quad i = 1, \dots, n \\ \xi &\geq 0 \quad i = 1, \dots, n \\ \xi^* &\geq 0 \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (5)$$

C , yanılğı ile $\|w\|$ ağırlık vektörü normu arasındaki ödünleşim (tradeoff) parametresidir ve kullanıcı tarafından seçilir. C gibi kullanıcının seçeceği diğer bir parametre olan ε değeri de ε tüpünün boyutunu belirler. Yukarıdaki kısıtlamalı eniyileme problemi Lagrangian oluşturularak çözülür ve en iyi hiper-düzlem aşağıdaki gibi yazılır:

$$f(x, w) = w^T x + b = \sum_{\text{destek vektörleri}} (\alpha_i^* - \alpha_i) \langle x_i, x \rangle + b \quad (6)$$

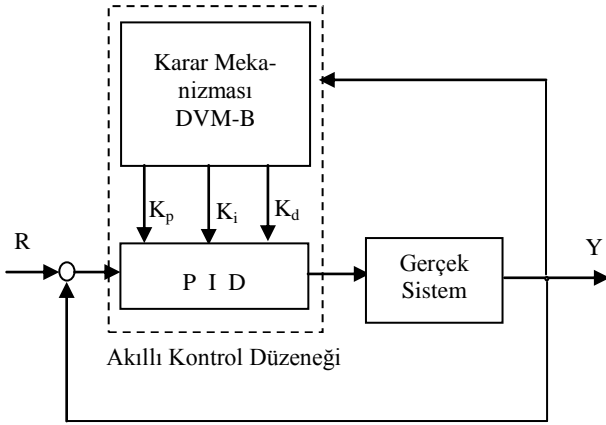
Burada, α ve α^* Lagrange çarpanlarıdır. Kernel fonksiyonu kullanılarak en iyi bağlanım hiperdüzlemi aşağıdaki gibi yazılır;

$$f(x, w) = \sum_{i=1}^{DV} (\alpha_i^* - \alpha_i) K(x_i, x) + b \quad (7)$$

DVM-B ile hata toleranslı kontrol

Hata Toleranslı Kontrol Sistemlerinde (HTKS) ilk aşamada olası hatalar tespit edilir, sonra kararlılığı ve kabul edilebilen bir başarıyı sağlayacak yeniden düzenlemeyi gerçekleştirmesi için akıllı bir karar mekanizması devreye girer. Bununla, tespit edilmiş duruma en uygun olan önceden tasarlanmış kontrolör devreye sokulur. Bu yöntemle hatanın varlığı, yeri ve zamanı hakkında bilgi edinilir, uygulanacak kontrolör önceden düşünülen olası hataların her biri için

tasarlananlardan uygun olanı olur (Ortaç-Kabaoğlu vd., 2009a). Bu çalışmada önerilen destek vektörü makineleri ile doğrudan hata toleranslı kontrol (DHTK) yöntemi, hatanın etkisini giderecek düzenleme yapması için, hata bulma, hata tanıma aşamalarına gereksinim duymaz. Yöntemde bir akıllı kontrolör sistemi kurulur (Şekil 2).



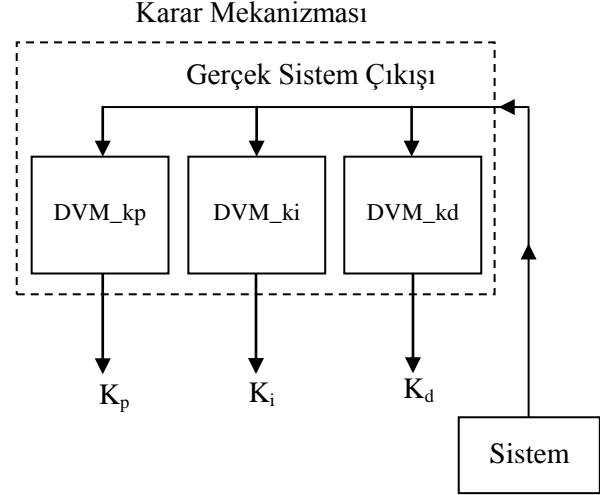
Şekil 2. DVM-B ile DHTK yapısı

Bu yöntemde kontrolör katsayıları, sistem cevabına göre çevrim-içi ayarlanır ve sistemin istenen davranışa götürülmesi sağlanır. PID tipi kontrolör katsayıları, destek vektörleri makineleri ile bağlantı (DVM-B) kullanılarak oluşturulan akıllı bir algoritma ile ayarlanır. Belli aralıklarla alınan sistem cevabı, bu akıllı algoritmanın girişi, uygun kontrolör katsayıları da çıkışıdır. Önceki bölümlerde söz edildiği gibi HTK sistemlerinin uygulamaları farklı amaçlar için farklı olabilir. Bu yöntemde, hatanın varlığının veya türünün belirlenme zorunluluğu bulunmamaktadır. Sistem cevabının istenildiği gibi olması için sadece gerçek sistem çıkışı ile çalışan akıllı bir kontrolör sistemi kullanılır.

Kontrolör katsayılarının belirlenmesi

Bu yöntemde, sistem çıkışına göre kontrolör katsayılarını belirleyecek olan karar mekanizması destek vektörleri makineleri tabanlıdır. Mekanizmanın eğitimi çevrim-dışı gerçekleştirilirken, sistem çıkışına uygun kontrolör parametresi ayarlama aşaması çevrim-içi çalışır. Şekil 2'deki karar mekanizmasına yakından bakalım. Karar mekanizması, her bir PID parametresi için bir tane olmak üzere toplam üç tane DVM-B

içerir (Şekil 3). Üç DVM-B, sistem çıkışından gelen verileri giriş olarak alır ve uygun katsayıları çıkış olarak verir. Aşağıda DVM tabanlı mekanizmanın eğitim ve çalışma aşamaları verilmiştir;



Şekil 3. Karar mekanizması

Eğitim (çevrim-dışı) :

- Sistemin hatasız ve önceden belirlenmiş hatalı durumları için en uygun PID kontrolör katsayıları belirlenir. Bu amaçla genetik algoritma arama yöntemi ve başarımlı ölçütü olarak ITSE kullanılmıştır.
- PID kontrolör katsayılarından her birinin tayini için bir DVM kurulur; yani, DVM_kp, DVM_ki, DVM_kd.
- Sistemin hatasız durumu için belirlenen PID katsayıları kapalı çevrimdeyken, belirlenen hatalı durumların çıkışları çeşitli referans girişler için toplanır. Referans işaretlerinin çeşitliliği, yöntemin geliştirme kapasitesini yükseltecektir.
- Kontrolör katsayılarını bulacak DVM lerin her biri, toplanan hatalı durum sistem cevapları, giriş ve ilgili kontrolör katsayısı, çıkış olacak şekilde farklı giriş işaretleri için çevrim-dışı eğitilir.

İşleyiş (çevrim-içi) :

- Sistem istenen referans giriş için çalıştırılır. Belli aralıklarla sistem cevapları karar mekanizmasına gönderilir.
- DVM lerin hepsi gelen verileri aynı anda değerlendirir ve ürettikleri kontrolör kat-

sayılarını çıkış olarak verir. Üç DVM den gelen üç katsayı ile oluşturulan kontrolör sisteme uygulanır.

DVM-B ile hata bulma ve tanıma

Hatanın yerinin belirlenmesi için destek vektörü makinelerinin yüksek genelleştirme kapasitesine sahip bağlanım mekanizması benzer şekilde kullanılabilir. Hatanın yerinin belirlenmesi, bir hata bulma ve tanıma (HBT) işlemidir. Destek vektörü makinelerinin bağlanım mekanizmasıyla farklı türdeki belli sayıda hataların ayırımını yapmak mümkündür. Bunun için her bir hata farklı bir değerle işaretlenir ve DVM-B'nin çıkışı olarak eğitime katılır. Hatalı durumlara ait sistem cevapları, DVM-B'nin girişi olarak alınır. Bir hatanın yeri, bir yerden uzaklığı, boyutu gibi ölçülebilen değerleri varsa bunları da DVM-B'nin kestirim yeteneklerini kullanarak bulmak mümkündür. Bu durumda, hatalı sistem çıkışları DVM-B girişi ve hatanın ölçülen değeri çıkışı olarak alınır ve eğitim gerçekleştirilir (Şekil 4). Burada sadece hatanın belli değerleri için kestirim yapılmaz, ara değerlerdeki hata parametresi de kestirilebilir. Hatanın konumunun belirlenmesi için düzenlenen algoritmanın detayları aşağıda verilmiştir.

Hatanın konumunun belirlenmesi

Algoritmanın eğitim aşaması çevrim-dışı iken işleyişi çevrim-içi olacaktır. Eğitim ve işleyiş mekanizması aşağıda özetlenmiştir;

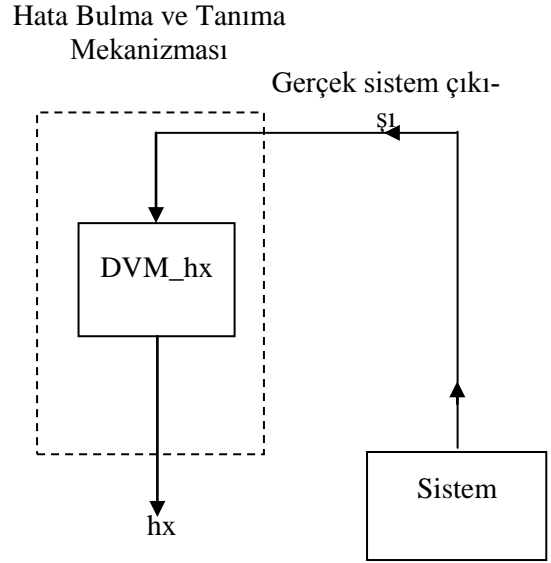
Eğitim (çevrim-dışı) :

- Hatanın yerinin tespiti için bir DVM-B kurulur; DVM_hx.
- Sistemin hatasız durumu için belirlenen kontrolör aktif olduğu durumda iken, eğitim amacıyla seçilmiş olan hatalı konumlara (seviyelere) ilişkin sistem çıkışları çeşitli referans girişler için toplanır.
- Hatanın yerini kestirecek DVM_hx, toplanan hatalı durum sistem çıkışları, giriş ve ilgili hata yeri ise, çıkış olacak şekilde farklı referans giriş işaretleri için çevrim-dışı eğitilir.

İşleyiş (çevrim-içi) :

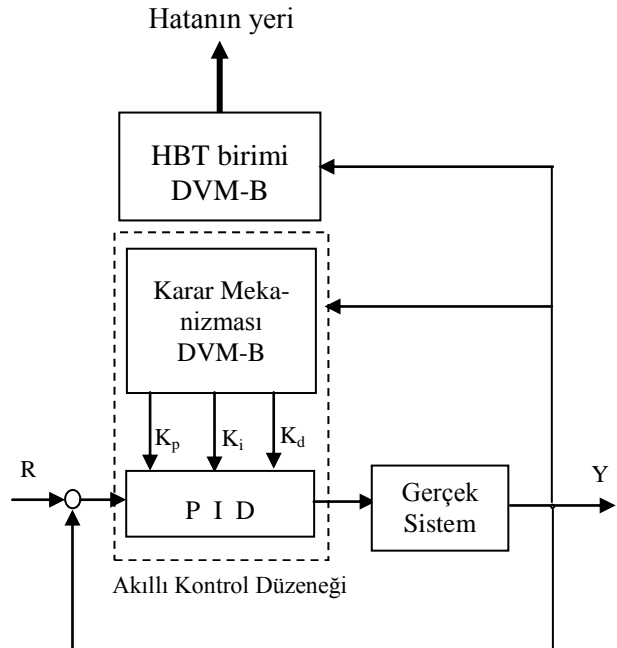
- Sistem istenen referans giriş için çalıştırılır. Belli aralıklarla sistem cevapları karar mekanizmasına gönderilir.

- DVM_hx gelen verileri değerlendirir ve hatanın yerini kestirerek çıkış olarak verir.



Şekil 4. Önerilen DVM ile HBT sisteminin çalışma şeması

Hatanın konumunun belirlenmesi için geliştirilen DVM-B ile hata bulma ve tanıma birimi PID katsayılarının kestirildiği akıllı kontrol biriminden bağımsız çalışır. İstenirse geliştirilen HTK sistemine Şekil 5'deki gibi eklenebilir.



Şekil 5. Önerilen DHTK ve HBT sistemi

Yöntemin çift tanklı sıvı seviye kontrol sisteminde farklı büyüklükteki delik hataları için uygulamaları yapılmıştır.

Benzetim örneği

Önerilen DHTK yönteminin uygulaması çift tanklı sıvı seviye sisteminde yapılmıştır (Zhang vd., 2004, Oblak vd., 2007). Sistemin parametreleri Tablo 1’de verildiği gibidir. Sistemin denge denklemleri aşağıdaki gibidir;

$$\dot{h}_1(t) = \frac{1}{A_s} \left(-K_{p1} \text{sign}(h_1(t)-h_2(t)) \sqrt{2g|h_1(t)-h_2(t)|} + q_1(t) \right)$$

$$\dot{h}_2(t) = \frac{1}{A_s} \left(K_{p1} \text{sign}(h_1(t)-h_2(t)) \sqrt{2g|h_1(t)-h_2(t)|} - K_{p2} \sqrt{2gh_2(t)} \right) \quad (8)$$

Burada, $K_{p1} = a_1 S_{p1}$, $K_{p2} = a_2 S_{p2}$ ve $a_1 = a_2 = 1$ alınmıştır. $h_1(t)$ ve $h_2(t)$, tanklardaki sıvı seviyelerini, $q_1(t)$, tanka elektrikli bir pompadan gelen kaynak akışını, $q_2(t)$ de ikinci tanktan çıkış akışını göstermektedir. Sisteme giriş, elektrikli pompa gerilimi olan $u_1(t)$ dir. $u_1(t)$, aşağıdaki giriş akışını üretir.

$$\bar{q}_1(t) = K_u (1 + v_1(t)) u_1(t) \quad (9)$$

$K_u = 8.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{Vs}$, gerilimden akışa çevirme katsayısıdır, burada $v_1(t)$ çevirme hatasını göstermektedir. Gerçek giriş akışı oranı ise aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$q_1(t) = \bar{q}_1(t) + (1 - K_f) \bar{q}_1(t) \quad (10)$$

$\bar{q}_1(t)$, hata olmadığı durumdaki akıştır. $K_f \in [0,1]$ hata katsayısıdır. Modelleme aşamasında bu katsayının sıfır olduğu hatasız durum kullanılacaktır.

Ölçülebilen tek çıkış işareti, ikinci tanktaki sıvı seviyesi olan $h_2(t)$ yi çıkış gerilimi $u_2(t)$ ye aşağıdaki denkleme göre çeviren basınç sensörünün gerilimidir.

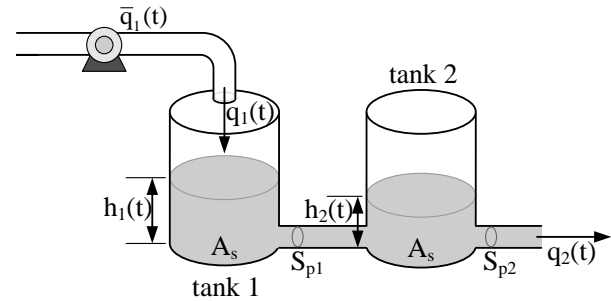
$$u_2(t) = K_h (1 + v_2(t)) h_2(t) \quad (11)$$

Burada $K_h = 16.667 \text{ V/m}$, yükseklikten gerilime çevirme katsayısıdır ve $v_2(t)$ çevirme hatasını ifade etmektedir. Hataların üst sınırları, $\bar{v}_1 = \bar{v}_2 = 0.03$ dür.

Tablo 1. Çift tank sistem parametreleri

Tankların taban alanları [m ²]	$A_s = 0.0154$
Bağlantı borularının alanları [m ²]	$S_{p1} = 3.6 \times 10^{-5}$ $S_{p2} = 3.6 \times 10^{-5}$
Yerçekimi ivmesi [m/s ²]	$g = 9.81$
Su seviyeleri [m]	h_1, h_2
Pompadan tank1’e akış oranı [m ³ /s]	$q_1(t)$
İkinci tanktan sıvı çıkış oranı [m ³ /s]	$q_2(t)$
Çıkış katsayıları	K_{p1}, K_{p2}

Bu örnekte, birinci tankın tabanında r_x yarıçapında bir deliğin olduğu varsayılmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Çift tanklı sıvı seviye kontrol sistemi

Yarıçapı bilinmeyen delik hataları için DHTK yöntemi aşağıdaki gibi işletilir:

- PID kontrolör katsayılarından her birinin tayini için bir DVM kurulur; DVM_kp, DVM_ki, DVM_kd.
- $r_x = 5\text{mm}, 10\text{mm}, 18\text{mm}$. için uygun kontrolörler genetik algoritma (GA) ile belirlenir (Tablo 2). Burada aramalar, ITSE başarımlar ölçütüne göre yapılmıştır.
- Hatasız sistem için belirlenen PID katsayıları döngüye konarak söz konusu hatalı

durumların çıkışları basamak, sinüs ve sözde rasgele seri giriş işaretleri için toplanır.

- Her üç DVM, toplanan hatalı durum sistem cevapları giriş, ilgili kontrolör katsayısı çıkış olacak şekilde eğitilir. Eğitimde DVM parametreleri, $C=200$, $\varepsilon = 0.0001$ ve radyal tabanlı kernel ($\sigma = 1$) olarak seçilmiştir. DVM-B'ler eğitim tamamlandıktan sonra DHTK sisteminde yerleştirilir.
- Sistem istenen referans giriş için çalıştırılır. Belli aralıklarla sistem cevapları karar mekanizmasına gönderilir.
- DVM'lerin üçü de aynı anda gelen verileri değerlendirir ve ürettiği kontrolör katsayısını çıkış olarak verir. Üç DVM den gelen üç katsayı ile oluşturulan kontrolör sisteme uygulanır.

Tablo 2. GA ile bulunan ve eğitimde kullanılacak PID katsayıları

	PID(hatasız)	PID(5mm)	PID(10mm)	PID(18mm)
K_p	29.6752	29.9194	29.9006	27.6250
K_i	0.09439	0.2319	0.8589	3.1832
K_d	9.06868	0.0789	0.0344	0.0002

Bağımsız bir DVM-B ile deliğin yarıçapı da kestirilebilir. Bunun için, toplanan hatalı durum çıkışları, DVM nin girişi ve deliklerin yarıçapları da, çıkışı olarak eğitim yapılır. Gerçek sistem çıkışı ile test yapılır. DVM-B'nin eğitimi ve işleyişinin ayrıntıları aşağıdaki gibidir:

- Bilinmeyen yüksekliğin tayini için bir DVM kurulur; DVM_hx.
- $r_x = 5\text{mm}$, 10mm , 18mm . de delik olan hatalı sistemler çıkışları hatasız sistem için belirlenen PID katsayıları döngüye konarak çeşitli giriş işaretleri için toplanır.
- DVM_rx, toplanan hatalı durum sistem cevapları giriş, ilgili r_x değeri çıkış olacak şekilde eğitilir. Eğitim tamamlandıktan sonra HBT sisteminde yerleştirilir.
- Sistem istenen referans giriş için çalıştırılır. Belli aralıklarla sistem cevapları sınılanır.

- DVM_rx, aynı anda gelen verileri değerlendirir ve hatanın boyutunu kestirerek çıkış olarak verir.

Tablo 3. Eğitim dışı farklı yarıçaplardaki deliklere yöntemin atadığı PID katsayılar

Gerçek yarıçap (mm)	Kestirilen yarıçap (mm)	K_p	K_i	K_d
8	8.2361	29.365	0.5564	0.0537
15	15.591	28.811	2.3510	0.0054
20	19.192	26.872	3.4141	0.0013

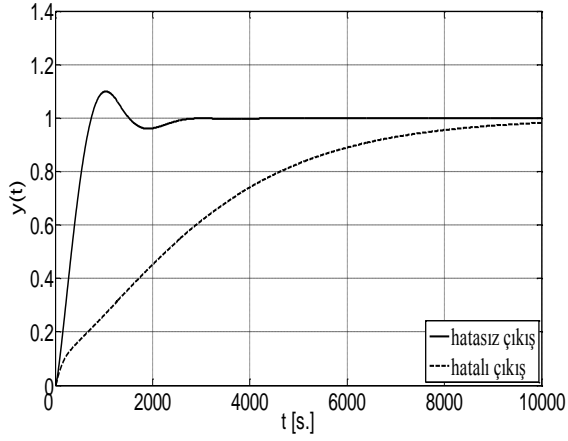
Tablo 3'de birinci tankta sırasıyla 8mm., 15mm., 20mm., yarıçapında açılan deliklere sistemin çevrim-içi atadığı kontrolör katsayıları verilmiştir. Sistem, açılan deliğin yarıçapını yani hatanın büyüklüğünü de kestirecek şekilde tasarlanmıştır. Tablo 4, aynı yarıçaptaki delikler için genetik algoritma ile karşılaştırma amacıyla bulunan katsayıları göstermektedir.

Tablo 4. Eğitim dışı farklı yarıçaplardaki deliklere ilişkin GA ile bulunan PID katsayılar

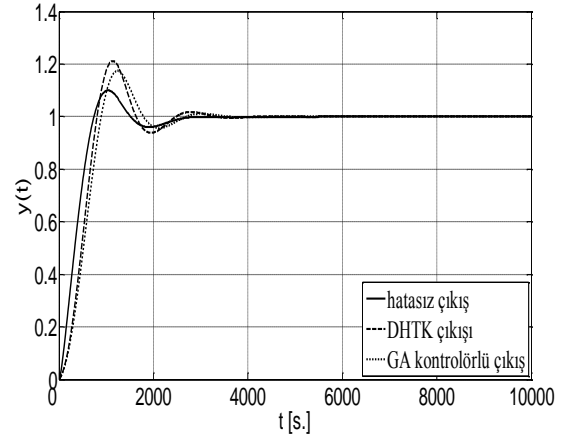
Delik yarıçapı(mm)	K_p	K_i	K_d
8	29.50	0.61	0.0611
15	29.8638	2.0767	0.3816
20	29.9136	3.7599	0.9538

Hatalı ve düzeltilmiş durumlara ait benzetim sonuçları ve genetik algoritma sonuçlarıyla karşılaştırmalar aşağıda verildiği gibidir. Şekil 7, test için kullanılan 8mm. yarıçaplı delik için hatalı ve hatsız çıkışları göstermektedir. Şekil 8'de, DHTK yöntemi ve genetik algoritmayla bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

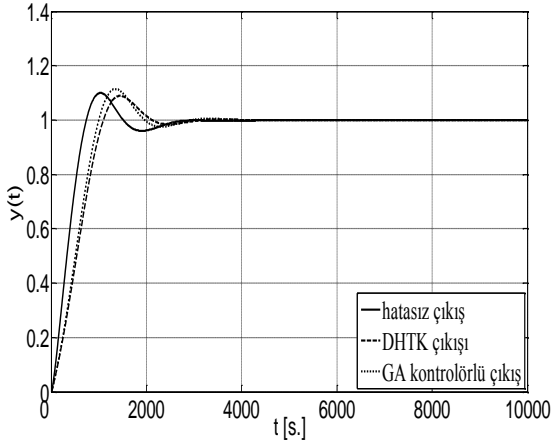
Şekil 9, test amaçlı kullanılan 15mm. yarıçaplı delik için hatalı ve hatasız çıkışları göstermektedir. Şekil 10'de, DHTK yöntemi ve genetik algoritmayla bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Benzer inceleme 20mm. yarıçaplı delik için de yapılmıştır. Şekil 11 ve Şekil 12'de verilmiştir.



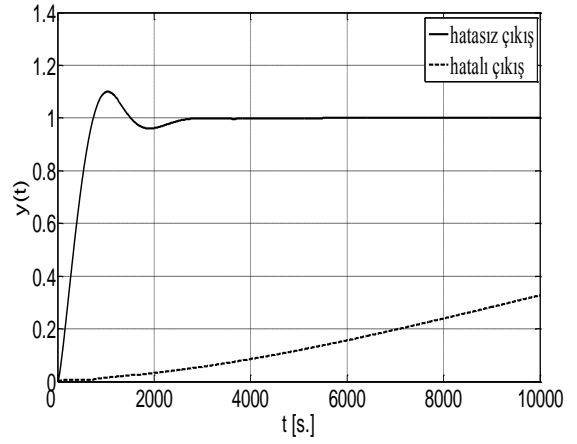
Şekil 7. Delik yarıçapı 8mm. için hatasız ve hatalı sistem çıkışları



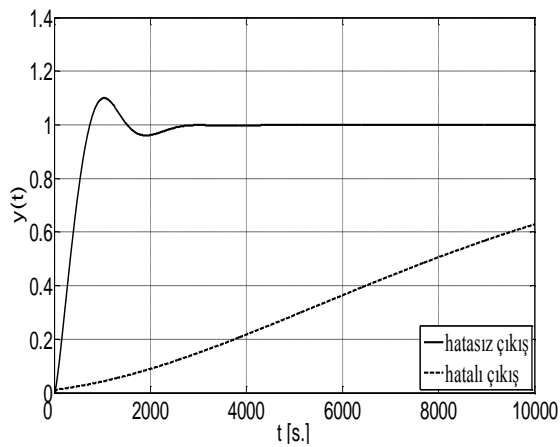
Şekil 10. $r_x=15mm.$ için hatasız, DHTK ile düzeltilmiş, GA ile elde edilen kontrolörle düzeltilmiş sistem çıkışları



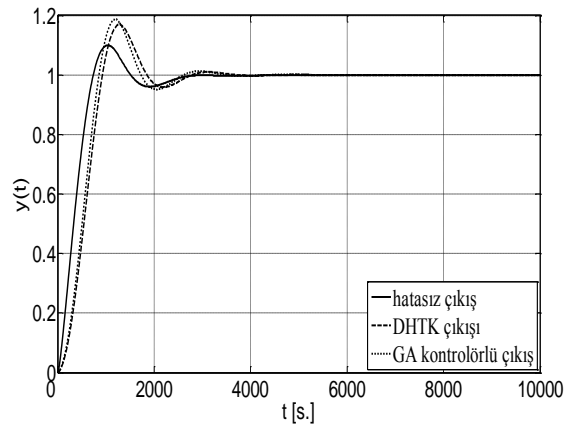
Şekil 8. $r_x=8mm.$ için hatasız, DHTK ile düzeltilmiş, GA ile elde edilen kontrolörle düzeltilmiş sistem çıkışları



Şekil 11. Delik yarıçapı 20mm. için hatasız ve hatalı sistem çıkışları



Şekil 9. Delik yarıçapı 15mm. için hatasız ve hatalı sistem çıkışları



Şekil 12. $r_x=20mm.$ için hatasız, DHTK ile düzeltilmiş, GA ile elde edilen kontrolörle düzeltilmiş sistem çıkışları

Sonuçlar

Bu çalışmada önerilen DVM-B ile Doğrudan Hata Toleranslı Kontrol (DHTK) yönteminde kontrolör katsayılarının çevrim-içi ayarlanması destek vektörü makineleri tabanlı akıllı bir sistemle yapılmaktadır. Kapalı çevrimli sistemin basedemediği hatalarda da yöntemin başarıyla uygulandığı görülmüştür. Bu yöntem ile hatanın etkilerini en aza indirme işlemi, hata bulma-tanıma işlemlerinden bağımsız olarak gerçekleştirir. Yöntem, sistemi nominal davranışına geri getirecek düzenlemeyi yapmak için öncelikle hatanın yerinin belirlenmesini gerektirmez. Öte yandan, bu yöntemin yan ürün olarak, hatanın yerinin de çok büyük bir yakınlıkla tespit edildiği görülmüştür. Hatanın ve yerinin tespiti, sistemlerdeki arızanın giderilmesinde çok önemli bir unsurdur. Hata tespiti ve tanınmasından bağımsız olarak çalışan DVM-B ile DHTK sistemi, sadece sistem çıkışı gözleyerek uygun PID kontrolör katsayılarını çevrim-içi olarak üretir. Yöntemin bulunduğu çevrim-içi kontrolör katsayılarının, genetik arama algoritmasıyla çevrim-dışı elde edilen katsayılarla, neredeyse çakışması, optimal sonuca çok yaklaşıldığını göstermektedir. Tüm bu algoritmanın temeli olan destek vektörü makinelerinin çok küçük bir veri kümesi ile eğitildiği halde oldukça geniş bir bölgeyi doğru taraması, karmaşık işlemlere gerek duymaması ve hızlı olması yöntemin diğer olumlu tarafları olarak söylenebilir. Ayrıca, çevrim-içi kontrolör seçen yöntemlerde karşılaşılabilecek olan sıçramalı geçiş sorununa önlem alınmasının gerekmemesi ve önceden belirlenmiş hatalarla sınırlı olmaması da yöntemin diğer olumlu yönleri olarak belirtilebilir.

Kaynaklar

Blanke, M., Marcel, S., Wu, E. N., (2001). Concept and methods in fault tolerant control. *Proceeding of the American Control Conference*, 2606-2620.

Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, I., Staroswecki, M., (2003). *Diagnosis and Fault Tolerant Control*, Springer.

Ducard, G., Geering, H. P., (2006). A reconfigurable flight control system based on the EMMAE method, American Control Conference, USA, 5499-5504.

Eterno, J. S., Weiss, J. L., Looze, D. P., Willsky, A. S., (1985). Design issues for fault tolerant-restructurable aircraft control. *In proceedings of the 24th IEEE conference on decision and control*. 900-905.

Huo, Z., Fang, H., (2007). Research on robust fault tolerant control for networked control system with packet dropout. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, **18**, 1, 76-82.

Jiang, B., Chowdhury, F. N., (2005). Fault estimation and accomodation for linear MIMO discrete-time systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **13**, 3, 493-499.

Jiang, J., Zhang, Y. M., (2006). Accepting performance degradation in fault tolerant control system design. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **14**, 2, 284-292.

Junli, C., Licheng, J., (2000). Classification Mechanism of Support Vector Machines”, *IEEE Proceedings of ICSP*, 1556-1559.

Kale, M. M., Chipperfield, A. J., (2005). Stabilized mpc formulations for robust reconfigurable flight control, *Control Engineering Practise*, **13**, 6, 771-788.

Kim, K. S., Lee, K. J., Kim, Y., (2003). Reconfigurable flight control system using direct adaptive method, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **26**, 4, 543-550.

Liang, Y. W., Liaw, D.C., Lee, T. C., (2000). Reliable control of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **45**, 4, 706-710.

Mahmoud, M., Jiang, J., Zhang, Y., (2003). *Active fault tolerant control systems: Stochastic analysis and synthesis. Lecture Notes in Control and Information Science*, Berlin, Springer.

Napolitano, M. R., Naylor, S., Neppah, C., Casdorff, V., (1995). On-line learning nonlinear direct neurocontrollers for restructurable control systems, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **18**, 1, 170-176.

Oblak, S., Skrjanc, I., Blazic, S., (2007) Fault detection for nonlinear systems with uncertain parameters based on the interval fuzzy model. *Engineering App. of Artificial Intelligent* **20**, 503-510.

Ortaç-Kabaoğlu, R., Eksin, İ., Yeşil, E., ve Güzelkaya, M., (2009a). Fault Tolerant Control Systems: A Support Vector Machine Approach, *IFAC International Conferenceon DECOM' 09*, Ohrid, Macedonia.

Ortaç-Kabaoğlu, R., Eksin, İ., Güzelkaya, M., ve Yeşil, E., (2009b). Destek vektörü makineleri ile doğrudan hata toleranslı kontrol, *TOK' 09. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, İstanbul*.

- Patton, R. J., (1997). Fault-tolerant control: the 1997 situation. In *Proceeding of 3rd IFAC Symposium SAFEPROCESS'97*, Hull,UK, 1033-1055.
- Puig, V., Quevedo, J., (2001). Fault-tolerant PID controllers using a passive robust fault diagnosis approach, *Control Engineering Practice*. **9**, 1221-1234.
- Smola, A., Scholkopf, B., (1998). A Tutorial on Support Vector Regression. *NeuroCOLT2 Technical Report NC-TR-98-30*.
- Tortora, G., (2002). Fault-tolerant control and intelligent instrumentation. *Computer and Control Engineering Journal*, **13**, 5, 259-262.
- Vapnik, V. N., (1995). *The Nature of Statistical Learning Theory*, Springer-Verlag. New York.
- Vapnik, V. N., (1998). *Statistical Learning Theory*, John Wiley and Sons, New York.
- Veillette, R. J., Medanic, L. V., Porking, W. R., (1992). Design of reliable control systems. *IEEE Transactions Automatic Control*. **32**, 3, 290-304.
- Yu, D.L., Chang, T., Yu, D. W., (2005). Fault tolerant control of multivariable process using auto-tuning PID controller. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, **35**, 1, 32-43.
- Zhang, X., Parisini, T., Polycarpou, M. M., (2004). Adaptive fault-tolerant control of nonlinear uncertain systems: An information-based diagnostic approach, *IEEE Transactions on Automatic Cont.* **49**, 8, 1259-1274.
- Zhang, Y. M., Jiang, J., (2001). Integrated design of reconfigurable fault tolerant control systems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **24**, 1, 133-136.
- Zhang, Y. M., Jiang, J., (2006). Issues on integration of fault diagnosis and reconfigurable control in active fault tolerant control systems. *IFAC Fault detection, supervision and safety of technical processes*, 1437-1448.
- Zhang, Y. M., Jiang, J., (2008). Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems, *Annual Reviews in Control*, **32**, 229-252.