

考慮暫態響應之模糊性能 控制器設計及應用

Design and Applications of Fuzzy Performance Controller with Transient-response Consideration

曾傳蘆^{*1}

邱顯宇¹

江昭皚²

王振興¹

Chwan-Lu Tseng^{*1}, Hsien-Yu Chiu¹, Joe-Air Jiang², Jenn-Shing Wang¹

國立台北科技大學電機工程系^{*1}

國立台灣大學生物產業機電工程學系²

摘要

本論文主要目的在提出一套考慮時域規格之階層式模糊控制器，藉由額定之上升時間及最大超越量等暫態性能指標變數的引入，改善傳統 PI 型模糊控制器無法具體考量時域規格之缺點。在發展出模糊性能控制器之後，本論文接著考慮此架構在網際網路遠端控制應用之可行性，研究人員藉由封包來回時間的量測以瞭解網路延遲變動的情形並預估延遲時間，以建立一套考慮網路時間延遲大小之調整式模糊控制器。經由電腦模擬可知，本論文所提之模糊控制器架構，可有效兼顧系統對穩態及暫態響應性能的高度要求，且其在網路遠端控制中，具有實用之價值。

關鍵詞：模糊控制、網際網路、遠距操控、延遲

投稿受理時間：92 年 3 月 14 日

審查通過時間：92 年 7 月 7 日

ABSTRACT

This paper provides a new method in fuzzy logic controller design that takes into account the time-response specifications. Using the conventional PI-type controller as a stabilizing controller, an additional performance controller is introduced with the parameters of rise time and the maximum overshoot. After developing the controller, we investigate the practicability of the proposed controller in the Internet operation environments. We firstly use the round trip time to

measure and predict the time-varying delay figures, and then establish the tuning strategy for the fuzzy logic controller to reduce the irrevocable time-vary delay influence. From the computer simulation results, it is seen that the proposed fuzzy logic controller is feasible for improving the system dynamic behavior and the system stability still remains.

Keywords: Fuzzy control, Internet, teleoperation, delay

壹．前言

近年來，由於高科技產業對精密度的需求，控制系統之時域規格越來越受到重視。在此同時，伴隨著網際網路日漸普及以及軟體設備的快速發展，各式各樣的應用介面，也逐漸由一般傳統的操作環境轉移到網際網路之上。然而，由於網路具有時變延遲特性，故而使閉迴路控制系統暫態響應的速度變慢，過超越量變大或穩態響應的精確值降低，甚而言者整個控制系統的穩定度遭致破壞，因此可考慮時域性能規格之網際網路模糊控制器設計逐漸成爲重要之研究領域。

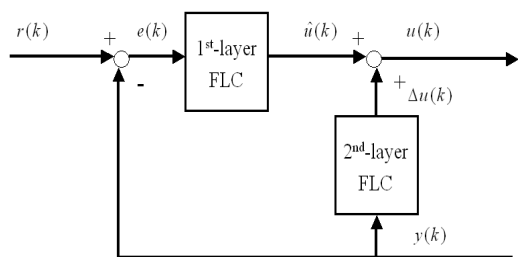
1990 年，Bare[1]等人首度提出以控制系統時域規格作爲模糊控制器量化因子 (Scaling Factor) 調整的依據。Maeda[2]等則於 1992 年提出最適性模糊控制器自調整法則，藉由額定之時域規格與實際量測結果的比較調變輸出量化因子。然而，上述之方法必須藉由參數的不斷調整方可獲得理想之響應性能，其參數初始值的設定，將大幅影響響應的過程及其結果。

其次，在針對具有時間延遲要素的控制系統上，儘管史密斯估測器 (Smith Predictor) [3]在此範疇中提供了不錯的設計方略，但對具有不確定延遲量的遠端控制系統而言，史密斯估測器並不適當。在現有模糊控制理論文獻中，亦有學者嘗試控制該系統，但其多將時間延遲的影響作爲模糊控制器強健性能的驗證項目[4][5]，而鮮少有針對時間延遲變量所作之研究。Xue[6]提出模糊補償規則，

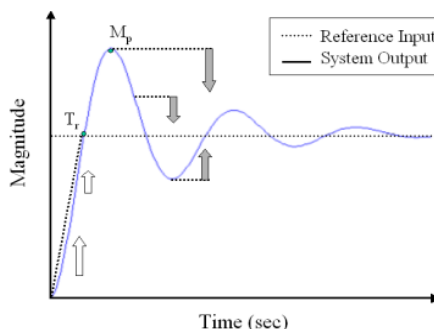
在系統響應過程中，誤差變量 \dot{e} 較小時採用模糊補償器來抵消模糊控制器產生之控制量，Li[7]則提出一套針對時延影響的控制規則調整策略 (Tuning Strategy)，利用輸出響應曲線的平移 (Shift) 以獲得所須之控制規則，但上述之方法在時變延遲上仍未多作討論。因此，本論文將研究可考量時域性能之模糊控制器架構，並考慮網路傳輸時間延遲對控制系統之影響，吾人將以可量測之封包來回時間 (Round Trip Time) 作爲模糊控制器參數調整依據，以期獲得有效之響應性能改善。由於網路延遲常造成系統性能之惡化，因此以下將先探討性能模糊控制器，再將其應用至網路控制系統。

貳．時域規格與模糊控制器設計

針對時域性能問題，本論文引入階層式 (Hierarchical) 控制系統的概念，有別於過往文獻大都專注於控制器參數的調整[5,8]，所提出之架構是將可量測之暫態響應性能指標引入作爲第二層 PD-type 模糊控制器的輸入變數，以爲操作量 $u(k)$ 的調整依據，藉此改善傳統 PI-type 模糊控制器無法同時兼顧穩態及暫態性能要求的缺憾。其控制器架構如圖一所示：



圖一 考慮時域規格之模糊控制器系統架構圖



圖二 考慮暫態響應性能指標之第二層 (PD type) 模糊控制器控制策略

為維持控制系統良好的穩態響應性能，本文所提之第一層模糊控制器採速度型 (PI-type) 控制方式，其輸出方程式為

$$\hat{u}(k) = \hat{u}(k-1) + \Delta\hat{u}(k) \quad (1)$$

其中

$$\Delta\hat{u}(k) = F_1\{e(k), \Delta e(k)\} \quad (2)$$

$F_1\{\}$ 為 PI-type 模糊推論函數，輸入變數 $e(k)$ 及 $\Delta e(k)$ 分別為系統過程變數之誤差 (Error) 及誤差變化量 (Change of Error)。儘管 PI-type 模糊控制器提供良好的穩態響應性能，然而受限於內部積分 (Internal Integration) 之特性，PI-type 模糊控制器輸出的調變結果無法立即反映在系統的響應過程中，以致在實踐之上難以改善不佳之暫態響應性能。

圖二所示，即為本論文所提之考慮暫態響應性能之第二層 (PD-type) 模糊控制器控制策略。在響應上升的區間 $[0, T_r]$ 中，良好的控制行為應是使其輸出響應曲線斜率 (Slope) 越大越好。基於此，吾人在起始點以及上升時間點之間以一虛擬直線 (如圖二斜直虛線所示) 分隔之，在直線之上者表示系統響應行為對額定要求已符合規格要求，控制器不須針對此動作；反之，則加一正向力使其響應速度加快。而在振盪響應區間 $[0, \infty]$ 中，則是令每一瞬間響應值逼近理想輸出值，響應不足則加之，響應超過則抑制。

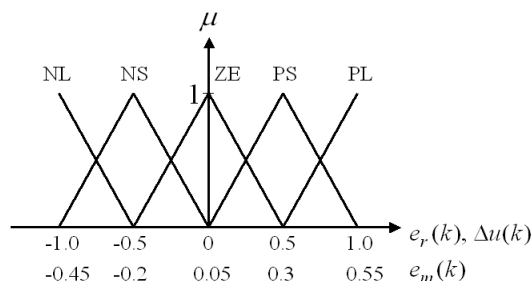
依上述之控制策略，本文所提之考慮暫態響應性能指標之第二層 (PD-type) 模糊控制器控制規則庫可表示如下表：

表一 考慮暫態性能指標之第二層控制規則庫

Rise Time Rules If Tracking is $e_r(k)$ then Adjust is $\Delta u(k)$		Overshoot Rules If Overshoot is $e_m(k)$ then Adjust is $\Delta u(k)$	
$e_r(k)$	$\Delta u(k)$	$e_m(k)$	$\Delta u(k)$
PL	PL	PL	PL
PS	PL	PS	PS
ZE	PS	ZE	ZE
		NS	NS
		NL	NL

其中
 PL = Positive Large
 PS = Positive Small
 ZE = Zero Equal
 NS = Negative Small
 NL = Negative Large

各語言變數分佈如圖三所示。



圖三 語言變數 ($e_r(k)$, $\Delta e_m(k)$, $\Delta u(k)$) 歸屬函數分佈圖 (以 $T_r=0.7\text{sec}$, $M_p=5\%$ 為例)

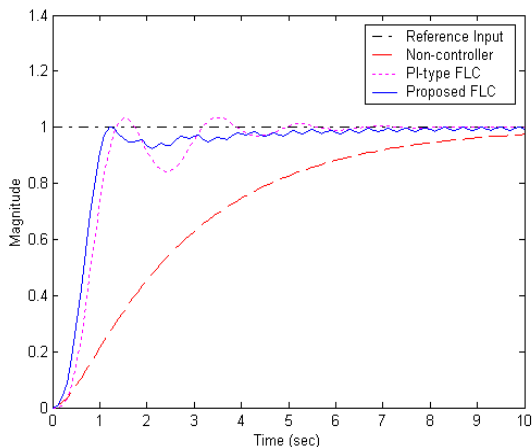
則其輸出方程式即可表示為

$$\Delta u(k) = F_2\{e_r(k), e_m(k)\} \quad (3)$$

其中， $F_2\{\cdot\}$ 為 PD-type 模糊推論函數，輸入變數 e_r 為圖二所示之虛擬直線上的取樣值至實際響應值之間的大小； e_m 則為實際響應值與額定之最大超越量之間的小大。則本文所提之階層式模糊控制器，其完整輸出(包括第一層 PI-type 及第二層 PD-type 模糊控制器)即可表示為

$$u(k) = \hat{u}(k) + \Delta u(k) \quad (4)$$

為充份驗證本論文所提之考慮時域規格之階層式模糊控制器控制性能，以下為針對不同之控制狀況模擬其響應結果。



圖四 二階穩定系統時域響應圖

圖四~六所示為不同之二階受控系統，

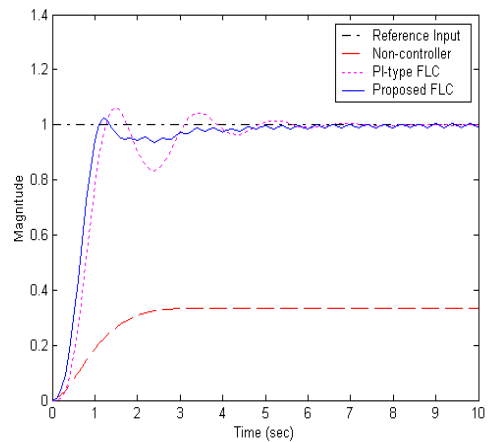
包括二階穩定系統 $G_1(s) = \frac{1}{s^2 + 3s}$ (圖四)、

二階穩定含穩態誤差系統 $G_2(s) = \frac{1}{s^2 + 3s + 2}$ (圖五) 及二階發散系

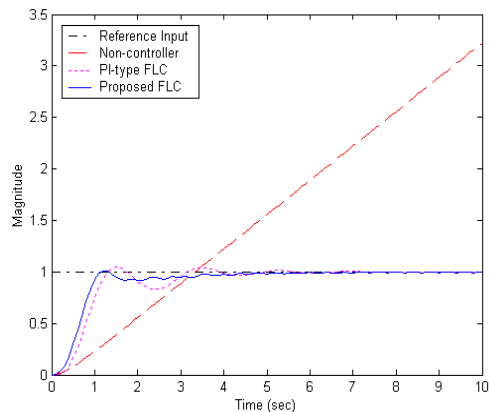
統 $G_3(s) = \frac{1}{s^2 + 3s - 1}$ (圖六) 分別於單位步

階輸入訊號下之時域響應圖。由圖中可知，在不同的控制情況下，雖然傳統之 PI-type 模糊控制器可使其獲得一穩定的條件，但暫態

響應結果(包括上升時間、最大超越量等)卻仍不盡理想，而藉由本論文所提之考慮時域規格之第二層 PD-type 模糊控制器的引入，則其結果可因此而獲得明顯的改善。在模擬結果中亦發現，系統輸出在穩態時有小幅震動現象，發生之主要原因為模糊控制器抑制暫態下射所致。若考慮系統可容許 5% 之穩態誤差，則震動仍在可接受範圍之內。



圖五 二階穩定含穩態誤差系統時域響應圖

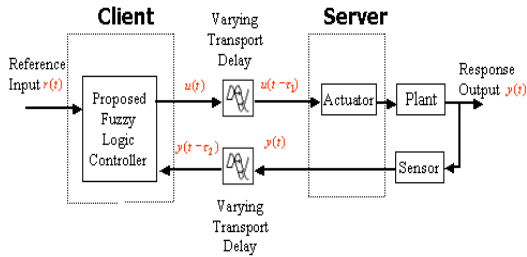


圖六 二階發散系統時域響應圖

參. 網路遠端模糊控制器設計

由於控制訊號傳輸延遲會破壞控制系統

性能，因此吾人有必要針對不同延遲量的大小設計出遠端調整式模糊控制器以消弭其影響。在本論文中，吾人所考慮之網路遠端模糊控制系統如圖七所示：

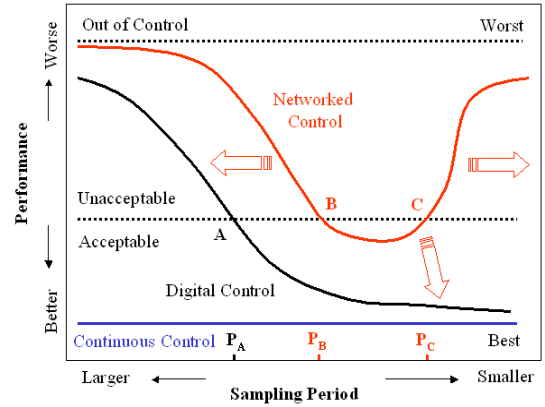


圖七 網路遠端模糊控制系統

其中，順向傳輸時變延遲（Forward Varying Transport Delay）及回授（Feedback）傳輸時變延遲分別為 τ_1 及 τ_2 ，茲分別討論其設計要點如下。

一、取樣週期的選擇

就閉迴路控制系統而言，取樣次數（Samples）即意味著閉迴路運算次數的多寡，越多的運算次數，其所獲得的調整次數也就越多，則輸出響應曲線越能趨近理想軌跡。然而就實務觀點視之，無窮多的調整次數是不切實際的，取樣週期的選擇必須參照軟硬體的性能規格以俟決定。一般而言，我們只能在滿足系統上限的條件下，盡可能的提高取樣頻率（減少取樣週期的大小）。若是進一步的將網際網路運作效能考量至設計規格中，則過多的取樣頻率非但無法增加其運作效能，反倒可能會形成失控的狀況。一般而言，網路控制系統取樣週期（如圖八所示）有其上、下界的限制[9]。



圖八 網路控制系統之性能與取樣週樣比較圖

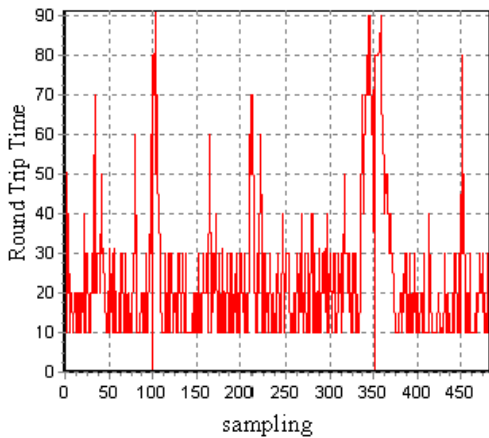
其中最大上界 P_B 必須滿足：

$$\tau_1 + \tau_2 + P_B < P_{BW} \quad (5)$$

P_{BW} 為控制系統維持正常運作所必須之週期，一般可藉由系統估測（Estimation）求得其量值的大小；而最小下界 P_C ，則必須取決於網路拓撲的種類及其軟硬體的運作狀況。

二、網路傳輸延遲的量測

儘管資料在網際網路上的傳輸時延大小可經由切割為許多片段分別加以討論[9]，但其分量的組成卻仍包含著諸多的不確定性，難以精確而完整的描述。在本論文中，由於量測時間延遲的目的主要在於將此量值引入模糊控制策略之中以爲模糊輸入變數，是故採用的是基於TCP架構下所量測之進似資料傳輸來回時間(Round Trip Time, RTT)，來估測延遲。實際之RTT量測結果（台北科技大學電機工程系 140.124.42.20 ↔ 雲林科技大學電機工程系 140.125.20.240），如圖九所示。

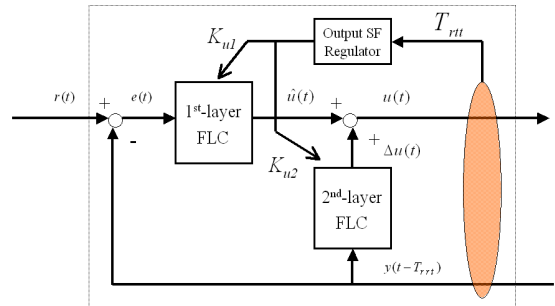


圖九 封包來回時間量測圖

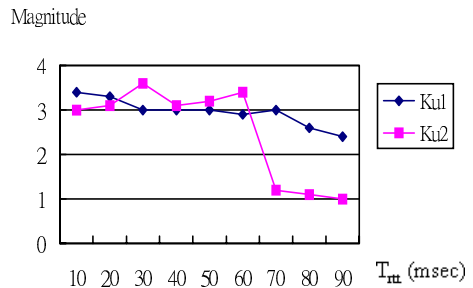
三、考慮延遲之模糊控制器策略

如先前所提，為考慮控制系統在暫態性能上的改善，吾人已於第一層 PI-type 模糊控制器上以階層化的概念引入時域規格，藉此作為第二層 PD-type 模糊控制器之輸入變數。緊接著為考慮時變延遲所帶來的破壞性影響，針對時間延遲估測值所具體設計之調整式模糊控制器便勢在必行。然而，過多的模糊控制法則往往會加重控制器的運算負擔及記憶體的使用量，使其無法滿足即時性的工作效能[10]，是故在本論文中，時延量的調整吾人選擇以查表[11]的方式，針對不同的時延區間事先給定輸出增益（Output Gain，即 K_{u1} 、 K_{u2} ）的調整量，以減少控制器的運算負擔及記憶體使用量。

圖十所示為考慮時間延遲之模糊控制器系統架構圖，其中輸出增益調整器的輸入採近似之封包來回時間，其最佳參數調整分佈如圖十一所示。



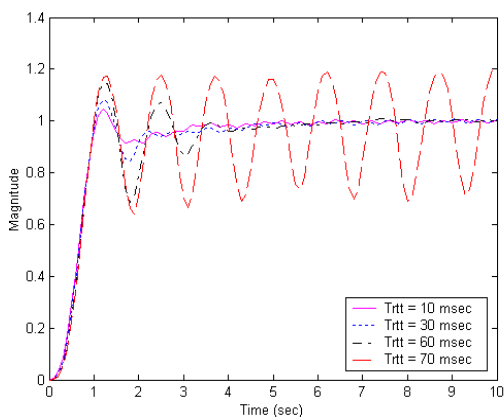
圖十 考慮時間延遲之模糊控制器系統架構圖



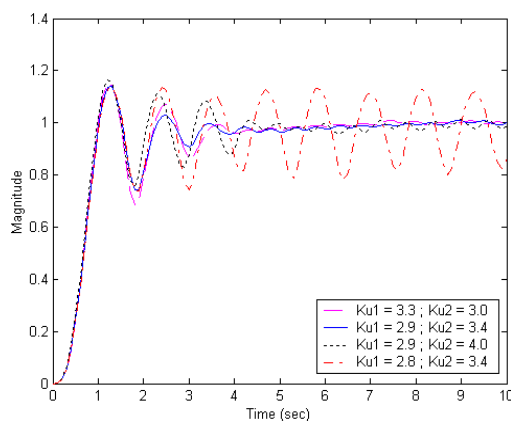
圖十一 考慮時間延遲之模糊控制器參數調分佈圖

為充份驗證本論文所提之考慮時域規格及時延變數之階層式模糊控制器控制性能，以下將進行電腦模擬並進行相關討論。

圖十二及圖十三則為二階穩定含穩態誤差系統 ($G_2(s) = \frac{1}{s^2 + 3s + 2}$) 在考慮時延變數下之模糊控制系統輸出響應結果。從圖十二可知在不同的時間延遲大小 ($T_{rtt} = 10, 30, 60, 70\text{msec}$) 下，控制器響應結果不僅在暫態規格上趨於轉壞，整個穩態行為亦可能會因此而喪失，是故控制器參數相對於時間延遲的大小有其因應之調整的必要性。



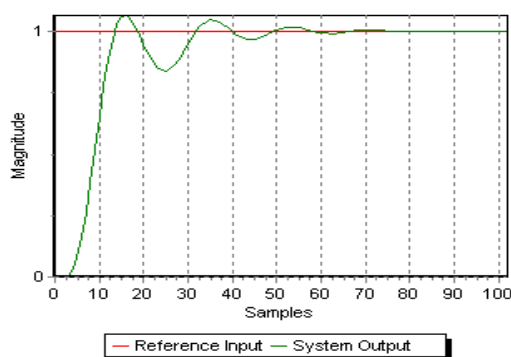
圖十二 相同控制器參數 ($K_{u1}=3.3$ 、 $K_{u2}=3.0$)，不同時間延遲量 (T_{rit}) 之時域響應圖



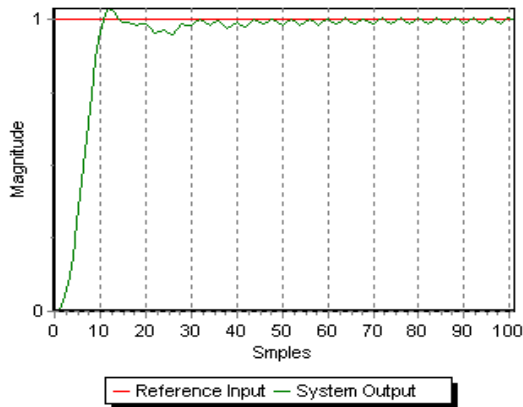
圖十三 相同時間延遲量 ($T_{rit}=60\text{msec}$)，不同控制器參數 (K_{u1} 、 K_{u2}) 之時域響應圖

然而，若是參數量值的調整並非本論文所列舉之建議值，則包括系統暫態及穩態行為，亦可能無法達到理想之響應結果（如圖十三）。

另外，若以 Borland C++ Builder Client-Server Model 對整體系統作實際之實際網路遠端模糊控制系統作驗證 (Client IP: 140.124.42.20, Server IP: 140.124.70.76, 取樣時間為 0.1sec)，亦可得出類似之結論。圖十四及圖十五所示分別為傳統 PI-type 模糊控制系統及本論文所提之階層式模糊控制器之響應結果。由圖中響應結果可知，本論文所提之模糊控制器架構，確實能在開放式的網路環境下，因應不同的時間延遲量測結果，有效的改善暫態響應性能。



圖十四 傳統 PI-type 模糊控制器於開放式網路下之響應圖



圖十五 考慮時域規格及時延變數之模糊控制器於開放式網路下之響應圖

結論

考慮時域規格之要求，本論文建立了一套之模糊控制架構。整個架構共可分為兩層，分別為第一層之 PI-type 模糊控制器，用以要求良好之系統穩態響應行為，與第二層 PD-type 模糊控制器，在系統響應行為可獲致穩定的前提之下，以額定之時域響應規格有效地改善 PI-type 模糊控制器在暫態響應規格上難以兼顧之缺憾。經由模擬證明，本論文所提之考慮時域規格模糊控制器，在上升時間、最大超越量等多項控制系統性能指標上，均優於傳統之 PI-type 模糊控制器。另外，為因應近年來控制系統操控界面有逐漸轉移至網路上之趨勢，本論文接著提出一套考慮延遲變數之調整式模糊控制器，以近似之單向傳輸延遲作為控制器參數調整的輸入變數，並分別定義不同時延區間之調整值以資使用。由模擬與實測結果可知，在不大幅增加控制器運算負荷及記憶體使用量的前提之下，本論文所提之考慮時間延遲模糊控制器，其響應性能可獲致明顯之改善。

致謝

本研究承國科會計畫 NSC 90-2213-E-027-015 經費補助，特此感謝。

參考文獻

- [1] B W. H. Bare, R. J. Mulholland, and S. S. Sofer, "Design of a Self-Tuning Rule Based Controller for a Gasoline Refinery Catalytic Reformer," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Volume 35, No. 2, pp. 156-164, February 1990.
- [2] M. Maeda and S. Murakami, "A Self-Tuning Fuzzy Controller," *Fuzzy Sets and System*, Volume 51, pp. 29-40, 1992.
- [3] O. J. M. Smith, "A Controller to Overcome Dead Time," *ISA Journal*, Volume 6, No. 2, pp. 28-33, February 1959.
- [4] R. K. Mudi and N. R. Pal, "A Robust Self-Tuning Scheme for PI- and PD-Type Fuzzy Controllers," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Volume 7, No. 1, pp. 2-16, February 1999.
- [5] A. Visioli, "Tuning of PID Controllers with Fuzzy Logic," *IEE Proceedings of Control Theory and Applications*, Volume 148, No. 1, pp. 1-8, January 2001.
- [6] F. Xue and H. Han, "Fuzzy Control for Plant with Delay Time," *Proceedings of the 3rd world Congress on Intelligent Control and Automation*, Volume 3, pp. 1840-1843, Hefei, China, July 2000.
- [7] H. X. Li and H. B. Gatland, "A New Methodology for Designing a Fuzzy Logic Controller," *IEEE Trans. on Systems Man, Cybernetics*, Volume 25, No. 25, pp. 505-512, March 1995.

- [8] R. Palm, "Tuning of Scaling Factors in Fuzzy Controllers using Correlation Functions, " *2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Volume 2, San Francisco, CA, USA, pp. 691-696, 1993.
- [9] F. L. Lian, "Analysis, Design, Modeling, and Control of Networked Control Systems, " *PhD thesis, University of Michigan*, USA, 2001.
- [10] Y. H. Kim, S. C. Ahn, and W. H. Kwon, "Computational Complexity of General Fuzzy Logic Control and its Simplification for a Loop Controller, " *Fuzzy Sets and Systems*, Volume 111, pp. 215-224, 2000.
- [11] C. C. Wang and S. M. Feng, "A Switching Type of Fuzzy Controller, " *Proceedings of the 3rd IEEE Conference on Fuzzy Systems, 1994 IEEE World Congress on Computational Intelligence*, Volume 1, Orlando, FL, USA, pp. 30-34, 1994.

