

台灣高速鐵路之模糊運動控制

Fuzzy Motion Control of Taiwan High Speed Rail

李俊賢	陳士琦	郭瑋龍	張世昕	楊子慶	謝漢輝
中央大學資訊 管理學系老師	中央大學資訊 管理學系學生	中央大學資訊 管理學系學生	中央大學資訊 管理學系學生	中央大學資訊 管理學系學生	中央大學資訊管 理學系學生
jamesli@mgt. ncu.edu.tw	jjaacckkieie @gmail.com	kuowelong @hotmail.com	axz8101576 @hotmail.com	skybluefaw @hotmail.com	dennisneverever @hotmail.com

摘要

本論文使用模糊控制理論(Fuzzy Logic Control Theory)模擬列車的行駛控制，依此做為高速鐵路公司的列車行駛管理參考。文中以台灣高速鐵路(Taiwan High Speed Rail, THSR)為例，探討列車在各站間之行駛時間、停站精準度、速度誤差及行車能量之消耗。本研究方法以 Runge-Kutta 數值解析方法結合模糊邏輯控制理論來模擬列車之行駛控制，以模擬真實列車運動之情況。本論文設計一種實用之參考運動曲線(Reference Curve)，可做任何距離之運動控制參考曲線，做為列車速度控制及準確停站之管理參考。實驗結果顯示本控制系統在列車停站誤差與車速控制上在可接受之準確範圍內。

關鍵詞：模糊集、模糊邏輯控制器、Runge-Kutta、參考運動曲線。

Abstract

This paper is to report the results of fuzzy motion control for the train of Taiwan High Speed Rail (THSR). The 4-th order Runge-Kutta method is used to mimic numerically the real dynamics of the THSR train motion which is usually specified by the differential equations for the Newton's Law. For the train motion control, a design method for the motion reference curve is used that no matter what distance between THSR stations can be applied practically. With the motion reference curve, a fuzzy controller is designed to control the THSR train. In the paper,

the south-bound motion simulations from the THSR Taipei station to the other seven THSR stations are conducted, and the motion control results are summarized. With the train motion between THSR stations, the spent time, the parking accuracy, the deviation of running speed and the energy dissipation can be simulated by the prime fuzzy control system, and so the motion information for possible management improvement or adjustment can be used as a management reference for the THSR Company.

Keywords: Fuzzy Set, Fuzzy Logic Controller, Runge-Kutta, Reference Curve.

1. 前言

在傳統控制列車的方式上使用人為操作，因此容易增加人力成本與增加人為疏失。針對該議題，本研究提出一個控制系統作為列車速度與錯誤控制藉此減少人力花費及人為疏失。

本控制系統使用模糊邏輯控制器(Fuzzy Logic Controller, FLC) [2][3][5]作為控制系統的核心並結合參考運動曲線(Reference Curve) [3][4][5]與 Runge-Kutta [2][7][11][13][15]作為實際列車行駛之模擬系統。控制系統會先以參考運動曲線作為其列車最佳行進速度，再將目標列車的實際行駛速度與最佳速度求其誤差與該誤差之差分。此誤差與其差分會作為模糊邏輯控制器的系統輸入，系統會計算並產生相對應之推力控制，以隨時調整行車情況，可以提高行車安全與減少人為錯誤。在模擬系統中系統會藉由使用者輸入起始站及終點站來計算列車移動速度、加速度等數據。本研究使用台灣高速鐵路為模擬對象，系統會模擬詳細且完整的速度與位移、速度與時間、力與時間的關係資料用以驗證模擬控制系統的準確度。

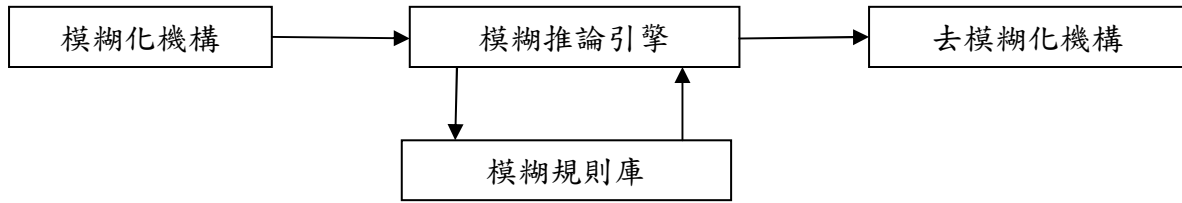


圖 1 模糊系統架構圖

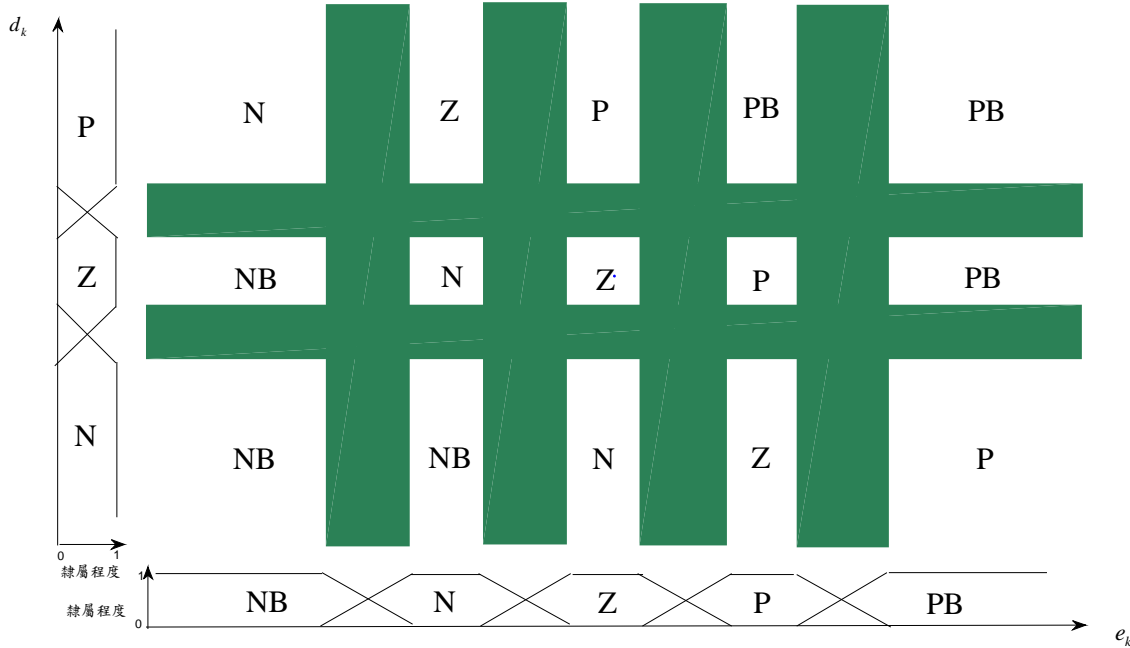


圖 2 本系統之 15 條規則示意圖

註：此示意圖表現出 15 規則產生的方式，但實際上水平方向的座標軸 e_k 之 P、Z、N 和垂直方向座標軸 d_k 之 Z 模糊集形狀為等腰三角形。此示意圖將其看成梯形以利繪圖。

以下介紹章節安排，第二節文獻探討說明本文所使用的理論，第三節陳述本系統設計與流程，第四節將說明實驗結果並於第五節作討論與結論。

2. 文獻探討

2.1 模糊集合

模糊集合(Fuzzy Set) [10][12][14][16][24] 又稱作模糊邏輯集合(Fuzzy Logic Set)[10]，是從模糊理論(Fuzzy Theory)延伸出來，而模糊理論不同於傳統理論。傳統明確集合是屬於二元的，論域中元素對於集合的關係只有兩種，也就是「屬於」或「不屬於」。「模糊集合」為傳統明確集合的一種推廣，因其允許模糊集合中的元素，對此集合的歸屬程度是界於 0 到 1 之間的值。傳統的明確集合與模糊集合最大的差異就

在於，明確集合的歸屬函數是唯一的，而模糊集合可以有無限多種的歸屬函數，也就是因為這個特性，使得模糊系統可以調整其歸屬數以適應不同的變異環境。例如說，假設我們定義高溫為溫度大於或等於攝氏 36 度，根據明確集合的定義，如果現在的溫度是 35.9 度，就代表已經相當接近 36 度，在人的感知下是頗為高溫，這種具有程度性的描述，是傳統明確集合論所無法處理的。而本研究就是以模糊集合的特性為核心所發展出來的理論。

2.2 模糊系統

模糊系統(Fuzzy System)[18][23]被廣泛地應用於自動控制、圖樣識別等方面，特別在模糊控制器設計方面，已成為設計控制器的最佳工具[1]因此模糊系統亦稱為模糊邏輯控制器(Fuzzy Logic Controller)[17]。模糊控制器設計

表 1 模糊邏輯控制器規則庫

$d_k \backslash e_k$	PB	P	Z	N	NB
P	PB	PB	P	Z	N
Z	PB	P	Z	N	NB
N	P	Z	N	NB	NB

其流程，必須先對受控系統進行瞭解，也就是以精確的微分方程式或差分方程式的數學模型來描述受控系統。模糊系統的運作是以一組模糊規則來加以描述，這組模糊規則可用以表達人類專家的知識。一般來說模糊系統[1][3]的基本架構如圖 1 表示，一般可分為模糊化機構(Fuzzification)、模糊規則庫(Fuzzy Rule Base)[25]、模糊推論引擎(Fuzzy Inference Engine)與去模糊化機構(Defuzzification)。

模糊化機構：其功能為將明確的(Crisp)外界輸入資料轉換成適當之語意式模糊資訊，吾人將其視為一種映射，由明確的輸入空間映射至特定之模糊集合空間。由於模糊系統是根基於模糊理論，所以使用隸屬函數(Membership Function)來計算。一般隸屬函數可以分為三角形歸屬函數、梯形歸屬函數和高斯歸屬函數。

模糊規則庫：由一組 If-Then 型式的模糊規則(Fuzzy Rule)所形成，用以描述系統的輸入與輸出間關係[6]。

模糊推論引擎：模糊推論引擎是模糊系統的核心，它可以藉由進行近似推論或模糊推論的方式，藉以模擬人類決策之行為。

去模糊化機構：該機構是將模糊推論引擎所推論出的模糊資訊，轉換回外界可接受的明確數值，以進行控制或決策。

在模糊系統中的模糊規則可根據需求使用格狀分割法(Grid-type Partition)來設計之。如圖 2，兩個輸入值各以 3 和 5 個模糊集描述時，利用該分割法透過輸入空間切割一共可產生 3x5 條模糊規則。

2.3 吊車速度控制系統

吊車速度控制系統[2]主要利用模糊集合(Fuzzy Set)及模糊控制理論(Fuzzy Logic Control Theory)[9]，與 Runge-Kutta、參考曲線(Reference Curve)相互結合。在模糊邏輯(Fuzzy Logic)的吊車速度控制系統中，只針對速度進

行控制。系統會根據目標的所在位置，再利用模糊邏輯控制器與運動參考曲線逼近以達到速度及煞車的控制及配合。系統有兩個輸入，分別為期望速度減去實際速度 e_k 以及 e_k 的一次微分 d_k 。系統的兩個輸入值會作為模糊系統之“輸入語意變數”(Input Linguistic Variables)，使系統產生令吊車前進的力(Force) f_k 。另外，在計算過程中把誤差 e_k 表示為 $h_{ek}(t)$ 及 e_k 微分後的誤差 d_k 表示為 $h_{dk}(t)$ 、力 f_k 表示為 $h_{fk}(t)$ ，計算的方式如下：

$$\begin{aligned} h_{d_k}(t) &= d(h_{e_k}(t)) / dt \\ h_{e_k}(t) &= r_k(t) - v_k(t) \end{aligned} \quad (3)$$

$r_k(t)$ 是預期的速度， $v_k(t)$ 代表吊車在單位時間內的速度。 $h_{fk}(t)$ 則是利用模糊邏輯控制器推演出來的，用來控制系統輸出力給吊車。在模糊邏輯控制器中，力量輸出多寡是根據一個模糊區域來決定。吊車速度控制中模糊集合內之模糊區域可分 5 個部分，其中，PB 為正大(Positive Big)、P 為正(Positive)、Z 為零、N 為負(Negative)、NB 為負大(Negative Big)。

系統會依據輸入值在模糊區域計算隸屬程度(Membership Degree)，一般隸屬函數是使用三角形隸屬函數與梯形隸屬函數。其公式如下：

$$\text{triangle}(h; a, b, c) = \begin{cases} 0, & h < a \\ \frac{h-a}{b-a}, & a \leq h < b \\ \frac{c-h}{c-b}, & b \leq h < c \\ 0, & c \leq h \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{trapezoid}(h; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & h < a \\ \frac{h-a}{b-a}, & a \leq h < b \\ 1, & b \leq h < c \\ \frac{c-h}{c-b}, & c \leq h < d \\ 0, & d \leq h \end{cases} \quad (2)$$

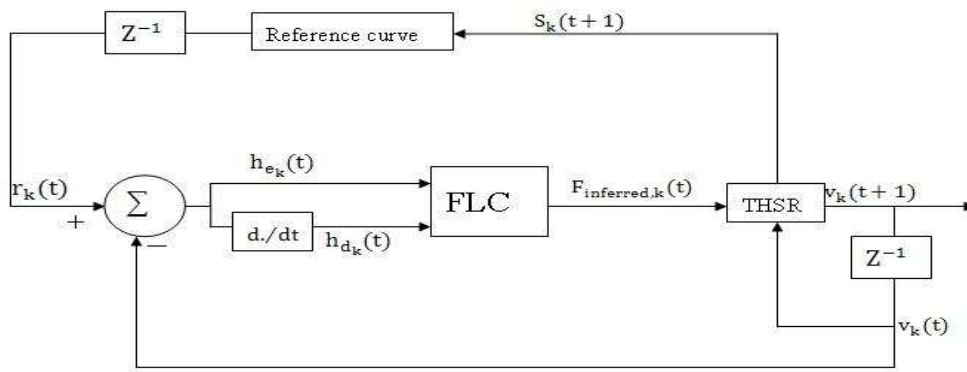


圖 5 高鐵速度控制系統架構圖

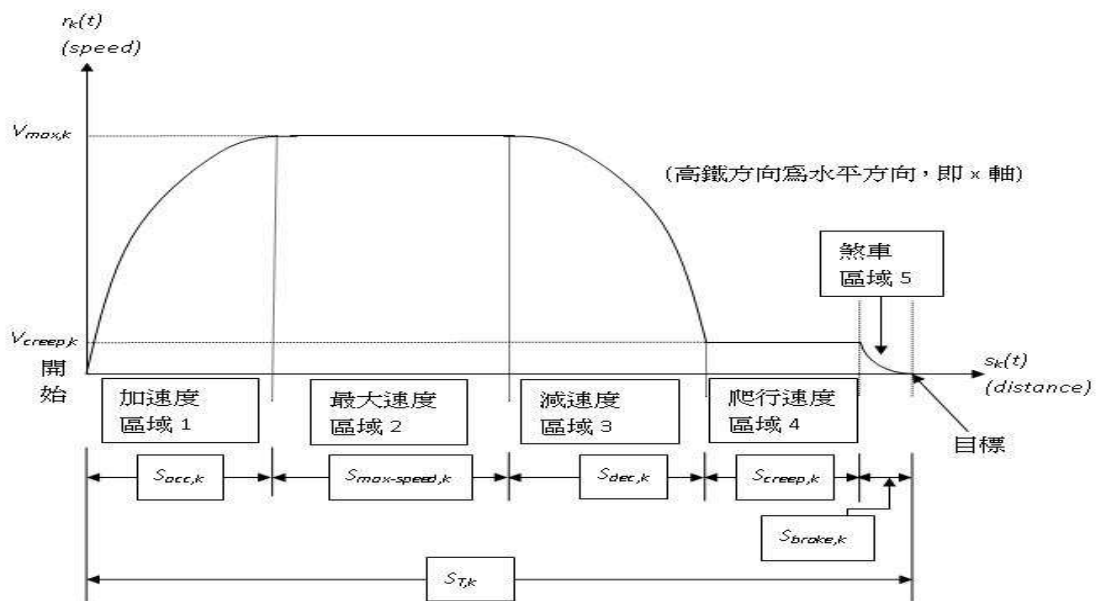


圖 6 運動參考曲線示意圖

隸屬函數計算後，再經由模糊規則計算啟動強度，計算出應施多少力 f_k 於吊車上。由模糊控制理論產生的吊車速度控制系統能夠達到智慧型控制之效果，實現自動化的基礎原理。

3. 實驗設計與流程

本研究提出之控制系統是結合模糊邏輯控制器 (Fuzzy Logic Controller)，參考曲線 (Reference Curve) 和 Runge-Kutta，本系統架構圖如圖 5。模糊邏輯控制器會提供 Runge-Kutta 計算上所需的資訊，同時 Runge-Kutta 也會將其輸出資料作為參考曲線的輸入資料。運動參考曲線為列車行進速度的依據，因此系統必須依此曲線來控制列車速度。

系統得出位移 $S_k(t+1)$ 輸入運動參考曲線，在高鐵速度控制系統中，運行時所需的最高速

度、加速度、減速等都透過逼近參考運動曲線的方法來完成，圖 6 為速度與距離參考運動曲線，將分為五個區域，在區域一：列車從速度為零開始加速到最高速度，標記為 $S_{acc,k}$ 。區域二：列車維持最高速度行駛，標記為 $S_{max-speed,k}$ 。區域三：列車從最高速度進行減速，標記為 $S_{dec,k}$ 。區域四：本區域分為兩段，最初從減速後再緩慢地前進，標記為 $S_{creep,k}$ 前進到一定距離後停止，為區域五，標記 $S_{brake,k}$ ，此進站時的煞車過程。經由運動參考曲線得到上一時間點的期望速度 (Desired Speed) $r_k(t)$ 之後，期望速度會再跟高鐵列車行駛於上一時間的真實速度 $v_k(t)$ 相減，得出的誤差 e_k 和 d_k 繼續循環這個迴圈。系統的重點在於將高鐵列車的真實速度逼近運動參考曲線。

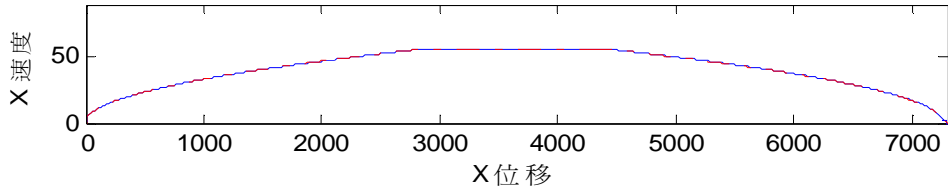


圖 11 台北站至板橋站的速度與位移圖

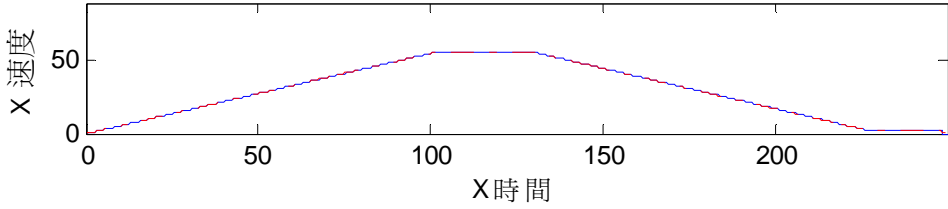


圖 12 台北站至板橋站的速度與時間圖

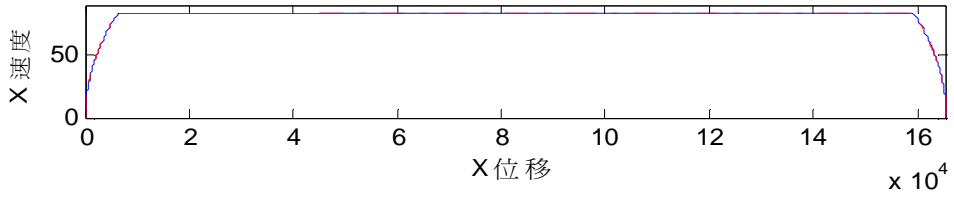


圖 13 台北站至台中站的速度與位移圖

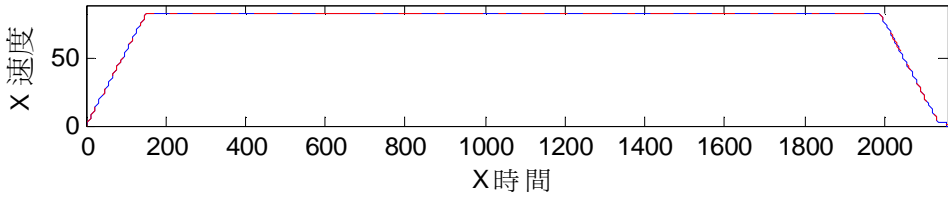


圖 14 台北站至台中站的速度與時間圖

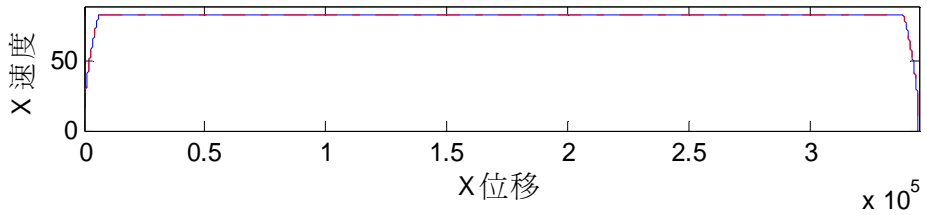


圖 15 台北站至左營站的速度與位移圖

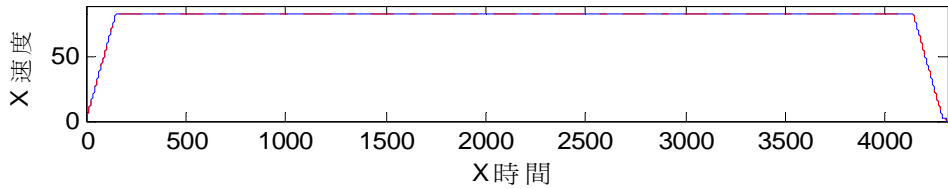


圖 16 台北站至左營站的速度與時間圖

註：在以上圖表中，紅色虛線為列車行進曲線，藍色實線為列車運動參考曲線

在實驗流程上使用者選擇列車起使站以及終站，系統會模擬推動列車過程中的影響。利用 Runge-Kutta 運算可得列車之行進位移。將位移對應至運動參考曲線中，系統會計算出列車運行時所需的期望速度等，並以列車位移和運動參考曲線的差異求得二項輸出的變數。其中的輸入為期望速度與實際速度相減— e_k ，另為 e_k 的微分— d_k ，輸入至模糊邏輯控制器，控制器產生對應控制的力使列車移動。

4. 實驗結果

本研究之實驗室以台灣高速鐵路(Taiwan High Speed Rail)作為模擬對象，模擬環境使用 MATLAB 作程式實現。初始的環境數據設定中，台灣高速鐵路擁有八個營運站，其站間距離見表 3，則表 4 列出台灣高速鐵路的參考數據 [20]。

表 3 高鐵八個營運站的站間距離

站名	站間距離	站名	站間距離
台北-板橋	7.3 公里	台中-嘉義	85.8 公里
板橋-桃園	34.9 公里	嘉義-台南	62.3 公里
桃園-新竹	29.9 公里	台南-高雄	31.4 公里
新竹-台中	93.6 公里		

表 4 高鐵部份資料參考數據

最高速限	300 km/hr
法定最大加速度	2 km/hr ²
高鐵總重	576 公噸
每位乘客加其行李	73.812 公斤
高鐵的靜摩擦係數	0.1
高鐵的動摩擦係數	0.22
高鐵截面積	64 平方公尺
列車編組功率	10,260 千瓦
空氣密度	0.00117 g/cm ³
所受空氣阻力為	80,599.3552 牛頓

台灣高速鐵路的單一線段行駛總距離為 345.2 公里。列車最高速限為 300 公里/小時 (km/hr)，法定最大加速度為 2.0 公里/平方小時，

假設加速和減速的加速度都以此數據為最大值。列車編成由 12 節車廂編成(1 節商務車廂，11 節標準車廂)，每一編組空車重量約 503 噸，車廂平均重量滿載狀態下約 48 噸，乘客座位數一編組列車共 989 人(標準艙：923 人、商務艙：66 人)，高鐵總重為 576 公噸，平均一位乘客加其行李為 73.812 公斤。列車編組功率為 10.260 千瓦/單位列車編組 (kw/trainset)，當列車有最大速度時，同時具備推動列車的最大力為 123000.12 牛頓(N)，為整體高鐵推力的最大上限值。高鐵的靜摩擦係數 0.1 和動摩擦係數 0.22。風阻係數 $F_D = F / (A \times d \times V^2 / 2)$ 、 F 為阻力、 A 為有效截面積、 d 為空氣密度、 V 為速度；高鐵的風阻係數 $F_D = 0.31(N \times s^2 / m^2)$ ，高鐵截面積：64 平方公尺，空氣密度 0.00117 公克/平方公分，模擬台灣高鐵在時速 300 公里/小時最高速限之下，所受空氣阻力 80599.3552 牛頓。

模擬系統可輸入起始站與終點站。各站間距離如表 3。並以台北站至其餘各站作為實驗對象，其實驗結果如表 5 所示，其運動參考取線為圖 13 至 18。其中列車停站的準確度是用以衡量控制系統是否能精準地控制列車停止，誤差是評估模糊控制器在車速的控制是否能與參考運動曲線一致，進而達到車速平穩且安全的目標，最後會列出列車在該旅程中所消耗的能量。

5. 討論與結論

以台北出發至板橋、台中、高雄為例，分別以距離的近、中、遠試驗，系統模擬實際列車的狀況，輸出參考運動曲線、速度與時間關係圖、力與時間輸出關係圖，分別為圖 13 至 18，圖中藍線代表參考運動曲線，紅色虛線代表高鐵速度控制系統所產生的結果，也是誤差發生之處。

依實驗結果之圖表可探討出系統俱下列優點及貢獻。

第一，對於任何站間距離之遠近，停站之誤差最大區並無發生於站間距離最遠處(台北站至左營站)，這表示本系統皆能將列車的誤差控制於一定範圍內，觀察表 5 可知，由台北站出發到各站誤差不超過 9 公分，且最遠的站間距離台北至左營站的停站誤差為 0.00658，排所有停站中第三的精準度。此因最大速度區域之長短對於誤差之影響有限，誤差影響起因於加速度、減速度及列車進入之區域煞車。導致

表 5 高鐵各個區段的行車誤差與能量耗損

	車程(秒)	準確度(公尺)	誤差(RMSE 公尺/秒)	消耗能量(10^8 焦耳)
台北到板橋	249.8	0.01420	0.0474	9.1664
台北到桃園	675.4	0.08832	0.0420	52.9896
台北到新竹	1034.1	0.06345	0.0422	90.5344
台北到台中	2156.6	0.00446	0.0424	208.0662
台北到嘉義	3186.2	0.07370	0.0424	315.8034
台北到台南	3933.6	0.00945	0.0425	394.0323
台北到左營	4310.2	0.00658	0.0425	433.4607

較長之站間距離對於誤差影響可能小於較短之站間距離的行車誤差。期望於未來時，本系統可運用到其他的較廣大的區域，這項優點確保於極長距離下，列車行駛過程之誤差可受有效控制。

第二：本系統可模擬出列車行駛過程並描繪出列車移動之動之狀態，計算出推動列車過程中耗費多少能源，此能源代表消耗電力之程度使列車俱有足夠的動能，此為台灣高鐵公司提供另一項指標，於使列車依照運動參考曲線精準行駛之目的外，增加一項計算列車行駛成本之系統功能，將節省列車行駛成本，為高鐵公司獲取更多利益，且耗能較低之交通工具更加符合現代大眾對綠色能源之訴求，吸引一般僅偶爾使用高鐵之民眾選擇以高鐵代步，創造出其他客源。

在實作出高鐵速度控制系統前，先以吊車系統為理論基礎。於其後的過程中，我們能以預設的速度、加速度等數值，設定出參考運動曲線，讓列車依照本身的速度和參照曲線的差異來決定輸入的力。產生的結果可以準確地使高鐵吻合參考運動曲線的要求，成功獲得有效的控制效果。

本研究雖將前幾節敘述的理論運用在高鐵列車之速度控制上，但模糊集合和模糊控制理論仍有很大的擴展性可在其他的速度控制系統上表現。因此設計出此系統以期將模糊集與模糊控制發揮出更大的功用。

綜合以上章節可總結，參考運動曲線具有使用上的彈性，可以在不同距離的行車狀況下，彈性產生參考運動曲線。根據能量的輸出可以達成控管能源目的，在現今的環境中節省能源已然成為企業以及個人的課題，因此在有效控管能源消耗的情況下，更能使高鐵公司達到綠色能源目標。

參考文獻

- [1]. 蘇春木、張孝德，機器學習：類神經網路、模糊系統以及基因演算法則，全華科技股份有限公司，民 91。
- [2]. Autar Kaw, Egwu Kalu (2008). Numerical Methods with Applications (1st ed.). autarkaw.com.
- [3]. C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller-Part II," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 20, pp. 419-435, Mar./Apr. 1990.
- [4]. C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller-Part I," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 20, pp. 404-418, Mar./Apr. 1990.
- [5]. Chunshien Li and Chun-Yi Lee(2001);Fuzzy Motion Control of an Auto-Warehousing Crane System, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.48, no.5, pp.983-994.
- [6]. C. Li and R. Priemer, "Fuzzy control of unknown multiple-input-multiple-output plants," Fuzzy Sets Syst., vol. 104, no. 2, pp. 245-267, 1999.
- [7]. Ernst Hairer, Syvert Paul Nørsett, and Gerhard Wanner (1993). Solving ordinary differential equations I: Nonstiff problems (2nd). Springer Verlag. ISBN 3-540-56670-8.
- [8]. F. Cellier, E. Kofman (2006). Continuous System Simulation Springer Verlag. ISBN 0-387-26102-8.
- [9]. F. L. Lewis, W. K Tim, L.-Z. Wang, and Z. X. Li, "Deadzone compensation in motion control systems using adaptive fuzzy logic control," IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., vol. 7, pp. 731-742, Nov. 1999.
- [10]. G. Bojadziev and M. Bojadziev, Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Applications, Singapore: World Scientific, 1995.
- [11]. George E. Forsythe, Michael A. Malcolm, and Cleve B. Moler (1977). Computer Methods for Mathematical Computations. Prentice-Hall. Ch6
- [12]. G. J. Klir and B. Yuan, Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall RTR, 1995.

- [13]. John C. Butcher (2003). Numerical methods for ordinary differential equations. John Wiley & Sons. ISBN 0471967580.
- [14]. J. S. R. Jang, C. T. Sun, and E. Mizutani, Neuro-Fuzzy and Soft Computing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1997.
- [15]. Kendall E. Atkinson (1989). An Introduction to Numerical Analysis. John Wiley & Sons.
- [16]. L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," Inform. Control, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [17]. M. Sugeno and M. Nishida, "Fuzzy control of model car," Fuzzy Sets Syst., vol. 16, pp. 103-113, 1985.
- [18]. M. Sugeno and T. Yasukawa, "A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 1, pp. 7-31, Feb. 1993.
- [19]. S. T. Lin and A. K. Huang, "Hierarchical fuzzy force control for industrial robots," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 45, pp. 646-653, Aug. 1998.
- [20]. Taiwan High Speed Rail Earthquake Warning System. The Taiwan-Japan Workshop on the Earthquake Early Warning System (abstract). NCDR. 2007-09-04. Retrieved 2010-10-04
- [21]. William H. Press, Brian P. Flannery, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling (1988). Numerical Recipes in C. Cambridge University Press. (see Sections 16.1 and 16.2.)
- [22]. Y. Izuno, T. Izuno, H. Yasutsune, E. Hiraki, and M. Nakaoka, "Speed tracking servo control system incorporating traveling-wave-type ultrasonic motor and feasible evaluations," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 34, pp. 126-132, Jan./Feb. 1998.
- [23]. Zadeh, L.A. (1968). "Fuzzy algorithms". Information and Control 12 (2): 94-102. doi:10.1016/S0019-9958(68)90211-8. ISSN 0019-9958.
- [24]. Zadeh, L.A. (1965). "Fuzzy sets". Information and Control 8 (3): 338-353. doi:10.1016/S0019-9958(65)90241-X. ISSN 0019-9958.
- [25]. Zemankova-Leech, M. (1983). Fuzzy Relational Data Bases. Ph. D. Dissertation. Florida State University.