

## 主動式懸吊系統模糊控制器

紀慶嘉\* 曹魯屏\*\* 吳修志\*\*\* 張惠珍\*\*\*\*

\*清雲技術學院機械工程系

\*\*國防大學中正理工學院兵器系

\*\*\*國防大學中正理工學院國防科學研究所

\*\*\*\*大華技術學院電子工程系

### 摘 要

本文以模糊邏輯控制方法來設計二分之一車的主動式懸吊系統。主要包含兩個部分：模糊控制器與位移致動器。於位移致動器的前方加入模糊控制器，作車身震盪與車輪運動間的模糊控制，並將此控制結果傳至位移致動器，使致動器動作，藉以降低車身之振動。並運用灰關聯進行車身運動分析，比較各種震盪對地形變化的關聯度。模擬結果顯示，此種方法比傳統被動式懸吊系統更有效降低車身之振動，亦可增進車輛行駛的安全性和舒適性。

**關鍵詞：**模糊邏輯，主動式懸吊系統，二分之一車模型，灰關聯

## Fuzzy Control for Active Suspension Design of a Half Car

Ching-China Ji\*, Lu-Ping Tsao\*\*, and Hsiu-Chih Wu\*\*\*, Hui-Chen Chang\*\*\*\*

\*Department of Mechanics Engineering, Ching Yun Institute of Technology

\*\*Department of System Engineering, Chung-Cheng Institute of Technology, National Defense University

\*\*\*Graduate School of Defense Science Studies, Chung-Cheng Institute of Technology

National Defense University

\*\*\*\*Department of Electronics Engineering, Ta Hwa Institute of Technology

### ABSTRACT

This paper presents a fuzzy logic control scheme for designing the active suspension system in a half car model. The major part of this active suspension system includes fuzzy logic control and actuator. In order to reduce the oscillation of the vehicle, the fuzzy logic control was employed in front of the actuator. It is very obviously, we can obtain low oscillation and passengers can feel not only the comfortable ride quality but also the safety of the vehicle. A grey relational analysis is also proposed in this paper to find the relationship between road conditions, vehicle velocity, and oscillation.

**Key Words:** fuzzy logic control, active suspension system, half car model, grey relation

## 一、前言

隨著生活水準的不斷提昇，人們對於交通工具乘坐舒適性及操控性能的要求也隨之提高，汽車懸吊系統亦跟著不斷改良進步。從傳統懸吊系統之彈簧常數、緩衝器黏滯係數等元件參數的改良設計，到近代極力研究發展的主動式懸吊系統，其目的無不是為了滿足人們對汽車舒適性的要求。

車輛震動的來源，主要是車輛行駛過隨機不平整之起伏路面，或是因坑洞、突起等狀況所引起。一般而言，良好的懸吊系統需具備使車體與路面震動相互隔絕及將路面干擾由輪胎傳導至車身的影響減到最少為目的[1,2]。

懸吊系統主要可以分為三類：即(1)被動式懸吊系統：是由彈簧與減震器構成，沒有額外的外加控制力來抑制外界擾動，主要係經由衰減器來消散擾動的能量，使乘坐有比較好的舒適性，其舒適性的取決在於系統原件參數的設計。(2)半主動式懸吊系統：和被動式懸吊系統一樣沒有額外出力系統來抑制外界擾動，但是可以藉由感測車體震動行為的狀況而隨時改變系統的阻尼常數，使懸吊系統變硬或變軟，藉以適時消散車體的擾動行為，進而改善乘坐的舒適性。(3)主動式懸吊系統：係藉由致動器提供額外出力，來有效的抵銷系統震動力量，進而改善乘坐的舒適性。

近年來，主動式懸吊系統與半主動式懸吊系統也吸引許多研究投入實際應用工作。與傳統控制方法相較，模糊邏輯控制提供了一種不同的數學法則來設計車輛懸吊系統[3-5]，此法將懸吊系統的加速度與垂直位移降低至一定程度，也得到較佳的乘坐舒適性。

由於以往的主動式懸吊系統大多採用液壓式致動器[3-5]，必須使用油缸、油幫浦、蓄壓

器、伺服閥及電子控制器等裝置。其中，蓄壓器為提供致動器的動力來源；致動器為配合伺服閥的流量控制作用，並輸出適當的控制力；伺服閥是用來控制流體的流量，進而控制出力；電子控制器則是量測訊號與傳遞訊號。這使得系統複雜而昂貴。本文運用新一款的位移式致動器[6]，僅需利用簡單的控制器即可進行作動，對主動懸吊系統的簡化而言，提供了一種新的方式。

文中以二分之一車為理論分析模型，除了可以模擬車身前、後輪的個別動態狀況外，也可進行車身縱向角變化模擬，及車輛速度改變的動態模擬，較四分之一車震動模型更能接近車輛實際動態狀況 [7]。尤其運用 SIMULINK 軟體，其對動態系統進行建模 (modeling)、模擬 (simulating) 和分析 (analyzing) 都相當方便。對於建模，SIMULINK 提供圖形化使用者介面，只要使用點選和拖曳滑鼠操作就可以建立像方塊圖的模型。較以往的模擬軟體需要用微分方程式或插分方程式來列式子並寫出程式語言相比，要方便許多，若使用顯示方塊，則可以在模擬執行當中，就可以看見模擬結果。當調整相關參數，本模型即可進行自行車或機車等兩輪車輛之動態模擬測試，對車輛實況測試將相當實用。

## 二、系統特性

車輛主動式懸吊系統裝置如圖 1 所示。其中包含三部份：二分之一車震動模型，模擬路況模型以及主動懸吊控制器 (分別裝置於前、後輪)。本節對其分別介紹如下：

### 2.1 二分之一車模型

圖 1 所示為二分之一汽車模型，此模型可

對於前、後輪同時進行路況之動態模擬，模擬中假設輪胎並未離開地面，其中  $Z_{bf}$ 、 $Z_{br}$  與  $Z_f$ 、 $Z_r$  之量測係相對靜止路面，此外，簧載質量 (sprung mass) 的速度  $\dot{Z}_b$  以及與非簧載質量 (unsprung mass) 的速度差  $\dot{Z}_b - \dot{Z}_{bf}$ 、 $\dot{Z}_b - \dot{Z}_{br}$

均得以量測。模型中  $M_b$  與  $M_f$ 、 $M_r$  分別代表車身 (簧載質量) 以及前、後輪胎 (非簧載質量) 的質量，前、後輪胎的彈性係數分別為  $K_f$ 、 $K_r$  而車身則位於彈簧  $K_f$ 、 $K_r$  及緩衝器  $C_f$ 、 $C_r$  上，車輛相關參數如表 1[8]。

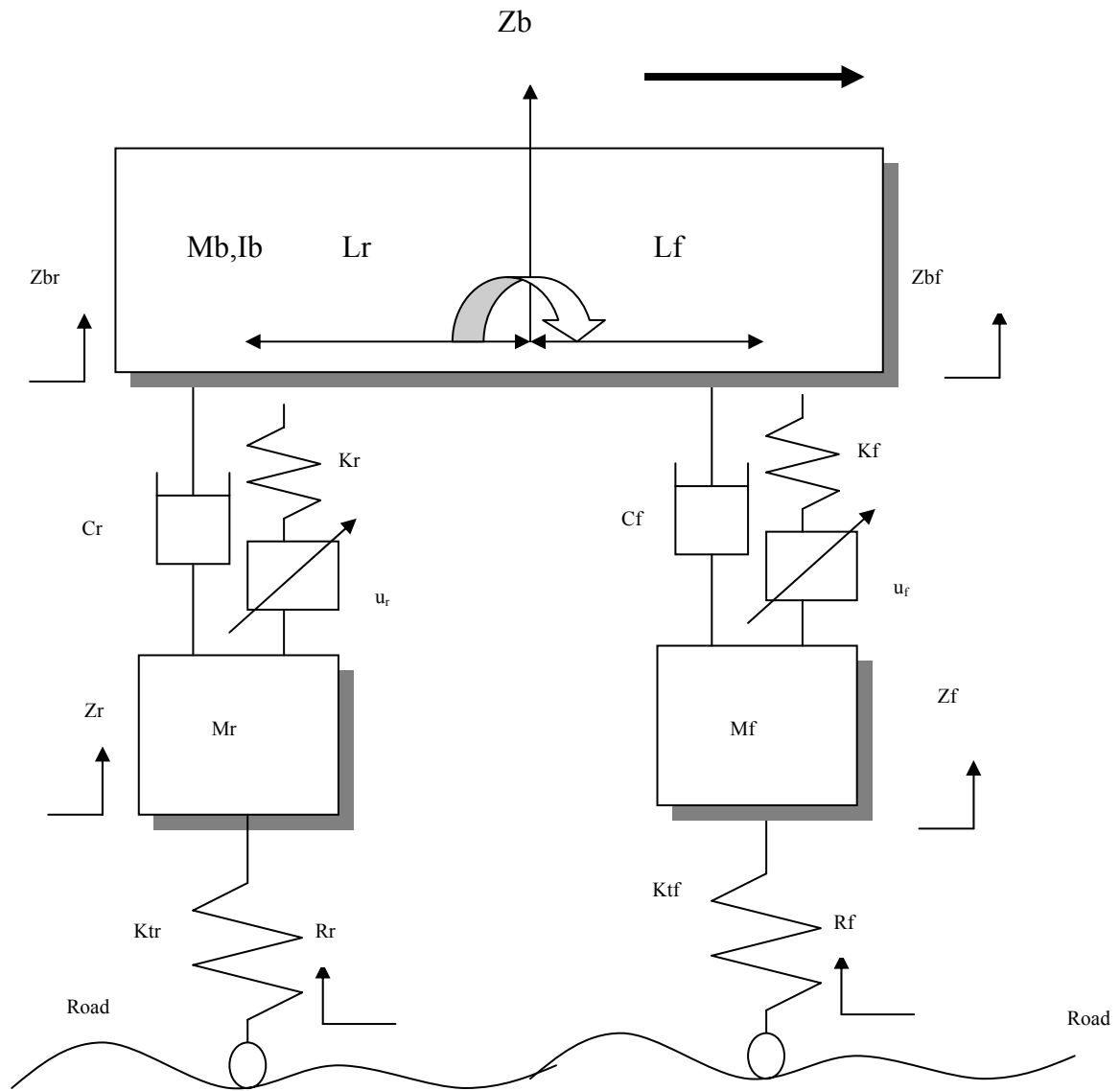


圖 1. 二分之一車主動式懸吊系統裝置圖。

模型的運動方程式如下：

$$M_b \ddot{Z}_b = K_f(Z_f - Z_{bf} + u_f) + C_f(\dot{Z}_f - \dot{Z}_{bf}) + K_r(Z_r - Z_{br} + u_r) + C_r(\dot{Z}_r - \dot{Z}_{br}) \quad (1)$$

$$I_b \ddot{\Theta} = -L_f [K_f(Z_f - Z_{bf} + u_f) + C_f(\dot{Z}_f - \dot{Z}_{bf})] + L_r [K_r(Z_r - Z_{br} + u_r) + C_r(\dot{Z}_r - \dot{Z}_{br})] \quad (4)$$

其中  $Z_f$ 、 $Z_r$  代表前後輪路況位移，而

$$M_f \ddot{Z}_f = K_y(R_f - Z_f) - K_f(Z_f - Z_{bf} + u_f) - C_f(\dot{Z}_f - \dot{Z}_{bf})$$

$u_f$ 、 $u_r$  分別代表前、後位移致動器輸入值。

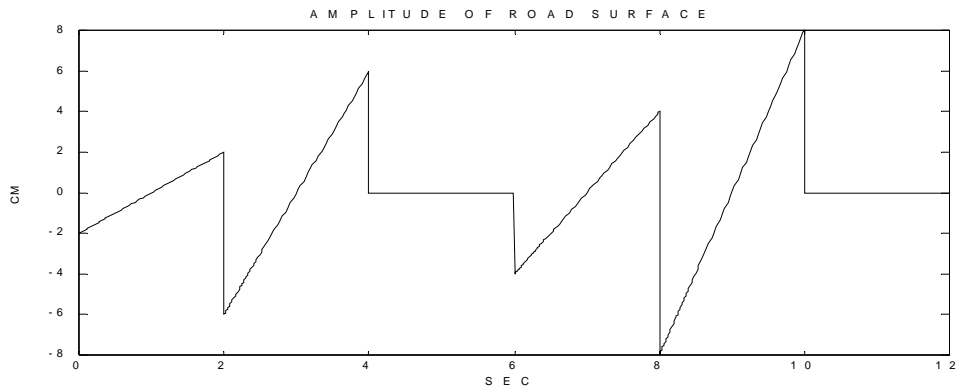
(2)

## 2.2 模擬路況模型

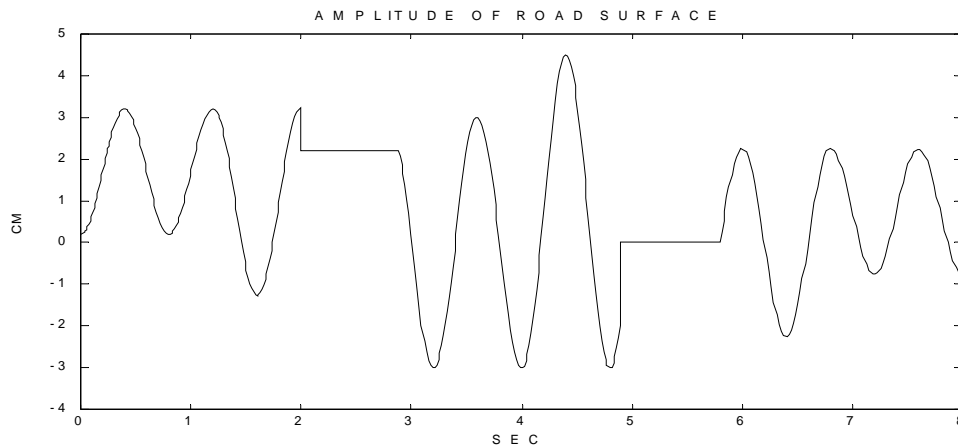
$$M_r \ddot{Z}_r = K_y(R_r - Z_r) - K_r(Z_r - Z_{br} + u_r) - C_r(\dot{Z}_r - \dot{Z}_{br})$$

在路況的設計上，本文使用兩種不同的路況分別進行模擬研究。其一為 12 秒不等高低之鋸齒波函數路況；其二為 8 秒正弦波函數路況 [5]。路況模型如圖 2 所示。

(3)



(a) 鋸齒波



(b) 正弦波

圖 2. 測試路況起伏情況：(a) 鋸齒波；(b) 正弦波。

表 1. 車輛各部參數。

車輛參數	數值
車身質量 $M_b$ (Kg)	555
車身縱向轉動慣量 $I_b$ (Nms <sup>2</sup> )	1240
重心至前軸距離 $L_f$ (m)	1.006
重心至後軸距離 $L_r$ (m)	1.455
前懸吊簧彈性係數 $K_f$ (N/m)	20140
後懸吊簧彈性係數 $K_r$ (N/m)	15100
前輪胎彈性係數 $K_{tf}$ (N/m)	156200
後輪胎彈性係數 $K_{tr}$ (N/m)	156200
前非簧載質量 $M_f$ (Kg)	22
後非簧載質量 $M_r$ (Kg)	34
前避震器阻尼 $C_f$ (N. s/m)	1042
後避震器阻尼 $C_r$ (N. s/m)	868

模擬時，為便於觀察車身動態狀況，假設前後輪經過相同路況，並分別進行 5m/s ( 18km/hr )、10m/s ( 36km/hr )、15m/s ( 54km/hr )、20m/s ( 72km/hr )、25m/s ( 90km/hr )、30m/s ( 108km/hr ) 等車速模擬。

速度控制上，由於車速愈高時前後輪分別

接觸同一路況之時間愈短。依表 1 軸距 (  $L_f + L_r$  ) 與模擬速度自低至高計算出前後輪接觸路況時間間隔分別為 0.4922、0.2461、0.1641、0.1231、0.9840、0.0820 秒。

### 2.3 主動懸吊控制器

本文使用一階微分之位移式致動器，其動作方程式如下：[6]

$$T\ddot{u}_f + u_f = u_{cf}, \quad u_f = Z_f - Z_{bf} \quad (5)$$

$$T\ddot{u}_r + u_r = u_{cr}, \quad u_r = Z_r - Z_{br} \quad (6)$$

其中， $u_{cf}$ 、 $u_{cr}$  與  $T$  分別代表前、後輪控制器控制輸入值以及控制器時間參數。同時，位移致動器先與彈簧串聯後再與緩衝器並聯的方式，也建構了一種限制型的懸吊系統[9]。

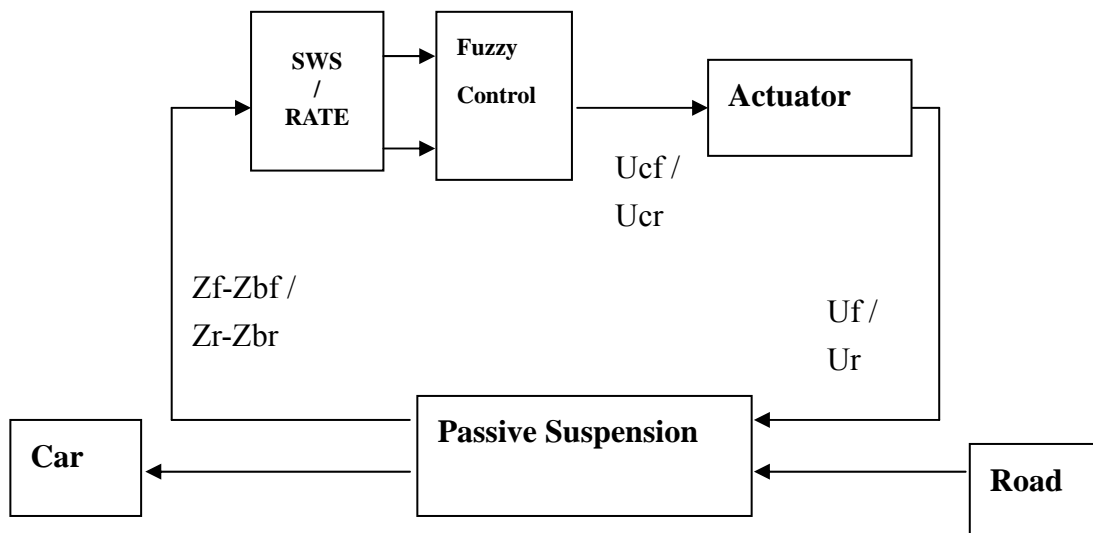


圖 3. 車輛模糊邏輯控制器結構圖。

### 三、模糊控制器

1965 年，Zadeh 教授在他主編的「Information and Control」刊物中首次提出了模糊集合 (fuzzy sets) 的觀念，強調以模糊邏輯來描述現實生活中事物性質的等級，以彌補使用二值邏輯描述事物的缺失。同時，模糊控制係利用模糊理論的近似理論作為控制器的推論機構，對於複雜或難以用明確的數學描述的系統，以直覺和經驗為基礎的模糊控制，可以得到良好控制結果。

車輛模糊邏輯控制器結構如圖 3 所示。此模糊控制器係利用車輛本車狀況為控制器的輸入變數 (SWS、RATE)，再經過模糊控制以及位移致動器作用後達到控制的效果。

一般模糊控制器設計的步驟可區分為：定義輸入、輸出變數；決定模糊化 (fuzzification) 的策略；設計控制規則庫 (rule base)；設計推理引擎 (inference engine)；以及選擇解模糊化 (defuzzification) 的方式。

#### 3.1 定義輸入與輸出變數

文中定義簧載質量 (sprung mass) 與非簧載質量 (unsprung mass) 之距離差 (SWS: Suspension Work Space, 前輪  $SWS = Z_f - Z_{bf}$  及後輪  $SWS = Z_r - Z_{br}$ ) 與距離差之變化量 (RATE) 為控制器的輸入變數。而  $u_{cf}$ 、 $u_{cr}$  為輸出變數。

#### 3.2 定義模糊變數與歸屬函數

在模糊化階段中，為了能將明確變數轉換

成模糊變數，必須使用適當的歸屬函數。首先必須先決定採用何種形狀的函數，其次是決定使用多少個模糊集合和各別的範圍。在文中採用三角形歸屬函數並定義了 3 個模糊變數 (fuzzy variables) 分別為正 (P)、零 (OK)、負 (N)，如圖 5 所示，對每一個語言變數，選擇一個適當的歸屬函數。

#### 3.3 設計控制規則庫

建立模糊推論系統，此為模糊控制之核心，具有模擬人類決策之能力。此步驟利用模糊推論技巧去推論一組描述操控法則的語言控制規則，以求得控制所需的模糊量。文中所設計的模糊控制規則之輸入變數 SWS、RATE 各有三個歸屬函數，其中 Mamdani 型式的 IF-THEN 推論系統應用於模糊推論規則中，總計有 9 條控制規則，詳見下表：[6]

		RATE		
		N	OK	P
SWS	N	Z	LP	LP
	OK	LN	Z	LP
	P	LN	LN	Z

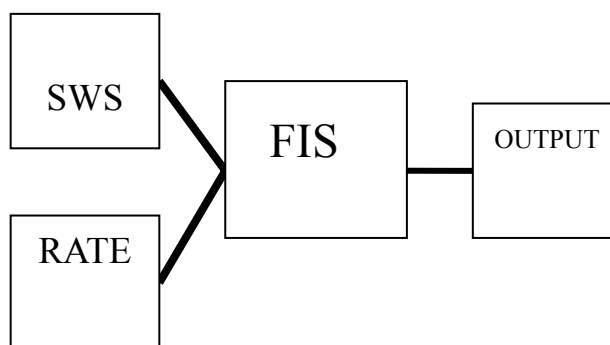
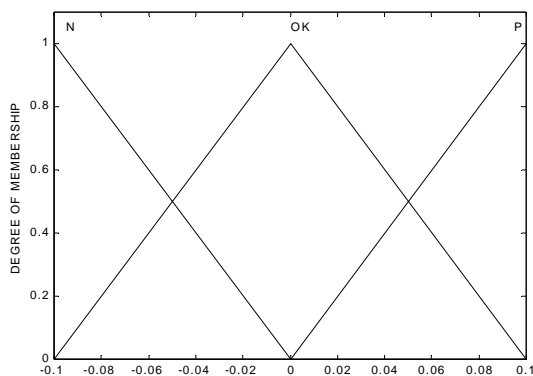
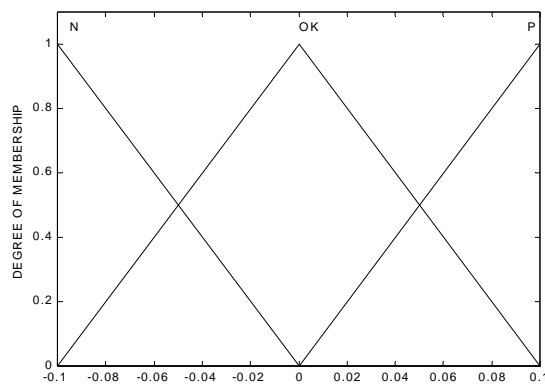


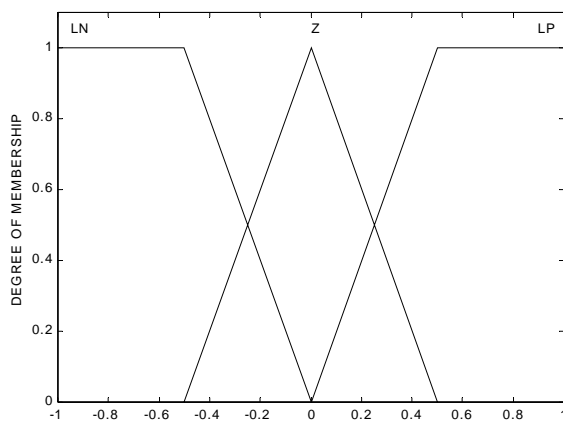
圖 4. Simulink 模糊工具箱之模糊控制器。



(a) SWS



(b) RATE



(c) OUTPUT

圖 5. 模糊邏輯輸入輸出值歸屬函數。

### 3.4 解模糊化

最後，在解模糊化的階段中，模糊集合輸

出必須轉成明確輸出值，文中解模糊化時採用重心法。

本文使用 Simulink 中的模糊工具箱來設計模糊控制器（如圖 4），這使得模糊控制器運用上顯得相當方便。

## 四、關聯分析

灰色系統理論（Grey System Theory）是由鄧聚龍教授於 1982 年所提出，主要是針對系統在模型之不明確性，資訊之不完整性之情況下，所進行有關於系統的關聯分析（Relational Analysis）與模型建構，藉由預測及決策的方法來探討並瞭解系統。灰色理論的應用範圍極廣，主要能對事務之「不確定性」、「多變量輸入」、「離散的數據」以及「數據的不完整性」進行有效的處理。

在灰關聯空間中量化的測度公式，稱為灰關聯度。而在求灰關聯度時，如果只取一個序列  $x_0(k)$  為參考序列時，我們稱為「局部性（Localized）灰關聯度」。本文使用路況為參考序列。

灰色關聯分析係依據灰色關聯度來做為衡量因素之間關聯程度大小的一種方法。「灰色關聯度」乃是利用離散的測度分式來做為距離的衡量，以探討兩個數列之間的關聯程度[10]。它具有計算方法簡單，樣本數量無過分要求，數據不須符合常態分配，不會產生與定性分析矛盾的結論等等優點。因此，適合用來處理當數據不明確及不完整時因素之間關聯程度的差異。

雖然本文各路況模型的數值完整，但在路況不斷起伏的情形下，雖以車身起伏曲線比較可以明確得知其控制結果之好壞，但若其趨勢相仿，運用灰關聯性觀察其間之關聯度，亦不失為一良好方式。灰關聯計算過程如下：

假設  $x_0$  為含有  $n$  個元素的參考序列，另外  $x_1, x_2 \dots x_m$  為含有  $n$  個元素的比較序列，分別表示如下：

$$x_0 = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(k), \dots, x_0(n)\}$$

$$x_1 = \{x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(k), \dots, x_1(n)\}$$

⋮

$$x_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k), \dots, x_i(n)\}$$

⋮

$$x_m = \{x_m(1), x_m(2), \dots, x_m(k), \dots, x_m(n)\}$$

參考序列  $x_0$  與比較序列  $x_i$  在  $k$  點的關聯係數的計算為：

$$\xi_i(k) = \frac{\min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \zeta \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \zeta \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (7)$$

其中， $i=1,2,\dots,m$ ， $k=1,2,\dots,n$ 。  $\zeta$  為分辨係數，其值介於 0 與 1 之間，可依實際需要調整，文中  $\zeta$  取值 0.5。而上式中

$$\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| \quad (8)$$

稱為兩級的最小差。第一層次最小差為

$$\Delta_i(\min) = \min_k |x_0(k) - x_i(k)| \quad (9)$$

是指在絕對差  $|x_0(k) - x_i(k)|$  中按不同  $K$  值挑選其中最最小者。亦即第二個層次最小差

$$\Delta_i(\min) = \min_i \left[ \min_k |x_0(k) - x_i(k)| \right] \quad (10)$$

是在  $\Delta_1(\min)$ 、 $\Delta_2(\min)$ 、 $\Delta_3(\min)$ ... 中挑選其中最最小者。而

$$\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)| \quad (11)$$

稱為兩級的最大差，第一個層次最大差記為

$$\Delta_i(\max) = \max_k |x_0(k) - x_i(k)| \quad (12)$$

而第二個層次最大差則為

$$\Delta_i(\max) = \max_i \left[ \max_k |x_0(k) - x_i(k)| \right] \quad (13)$$

最後，利用平均數的觀點，計算出序列  $x_0$  與序列  $x_i$  的灰色關聯度  $\Gamma(x_0, x_i)$  為

$$\Gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (14)$$

求解過程有三步驟：首先無因次化後求差

序列  $\Delta_i$ ，這是避免作關聯度計算時單位不同：

其次求兩級最小差 (8) 與最大差 (12)，先求出差序列後即可得到兩級最小差與最大差；最後利用 (14) 式求取關聯係數。

本文分別對 10m/s、20m/s、30m/s 時，被動控制與模糊控制下之前車身震動狀況分別與路況關聯度之關係進行分析。

## 五、模擬結果與討論

模擬結果，分別就兩種路況及車身重心垂直位移量、車身縱向傾斜角改變情形以被動式懸吊系統與模糊控制式懸吊系統，以速度 10m/s (36km/hr) 為例繪製圖 6、圖 7、圖 8、圖 9，



分別說明如下：

### 5.1 車身位移量

圖 6、圖 7 係模擬車輛以被動式懸吊及模糊控制式懸吊分別於模擬鋸齒波與正弦波時以速度 10m/s (36km/hr) 前進時，車身重心位置之平均位移量比較圖。

從圖 6 結果中可觀察出經由模糊控制器的處理後的車身位移曲線（以實線表示）已經明顯較被動控制式的車身位移量（以虛線表示）降低許多。同時，車身震盪起伏次數（被動式

共計 24 次；模糊式共計 12 次）也明顯減少。

圖 7 正弦波路況中則可觀察出車身震盪起伏次數因路況起伏較大而約略相當；但由模糊控制器的處理後的車身位移曲線則已經明顯較被動控制式的車身位移量降低許多。

為便於車身位移量之數值分析比較，特將車身各種速度狀況下車身重心垂直位移量積分後除以路況時間後，將所得之平均車身位移值分別紀錄於表 2（鋸齒波）及表 3（正弦波）。

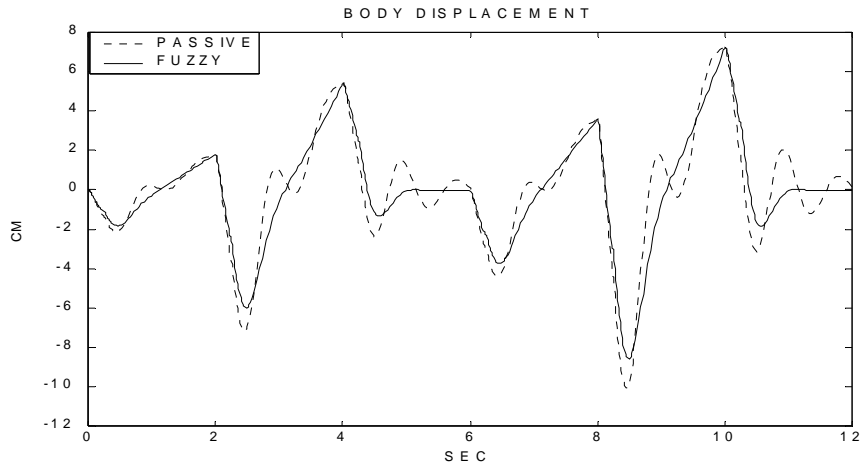


圖 6. 鋸齒波路況車身重心位移比較圖 (10M/SEC) (--- 被動式—模糊控制式)。

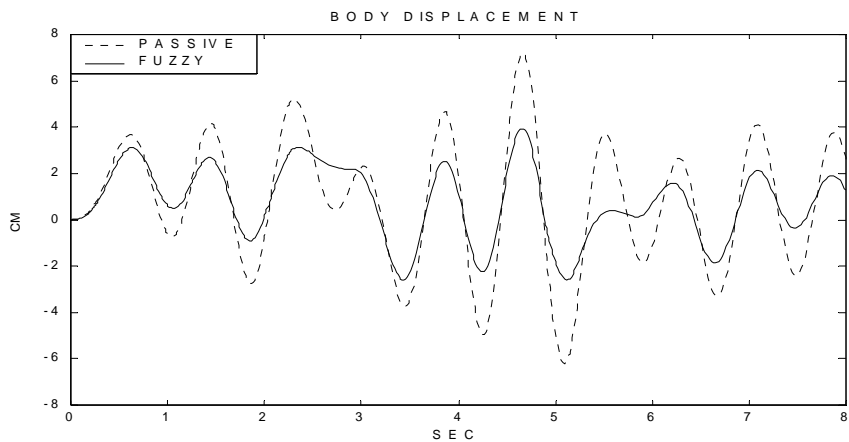


圖 7. 正弦波路況車身重心位移比較圖 (10M/SEC) (--- 被動式—模糊控制式)。

表 2. 鋸齒波路況車身重心平均垂直位移。

模擬速度	型式	總平均量 (CM)	百分比	百分比
30m/s (108km/hr)	被動式	2.2707	100%	100%
	模糊式	2.0308	89.4%	89.4%
25m/s (90km/hr)	被動式	2.2600	100%	99.5%
	模糊式	2.0229	89.5%	89.1%
20m/s (72km/hr)	被動式	2.2370	100%	98.5%
	模糊式	2.0071	89.7%	88.4%
15m/s (54km/hr)	被動式	2.1845	100%	96.2%
	模糊式	1.9775	90.5%	87.1%
10m/s (36km/hr)	被動式	2.0292	100%	89.4%
	模糊式	1.9106	94.2%	84.1%
5m/s (18km/hr)	被動式	1.6922	100%	74.5%
	模糊式	1.5664	92.6%	69.0%

表 3. 正弦波路況車身重心平均垂直位移。

模擬速度	型式	總平均量 (CM)	百分比	百分比
30m/s (108km/hr)	被動式	3.2612	100%	100%
	模糊式	1.8202	55.8%	55.8%
25m/s (90km/hr)	被動式	3.2187	100%	98.7%
	模糊式	1.8016	56.0%	55.2%
20m/s (72km/hr)	被動式	3.1332	100%	96.1%
	模糊式	1.7650	56.3%	54.1%
15m/s (54km/hr)	被動式	2.9408	100%	90.2%
	模糊式	1.6851	57.3%	51.7%
10m/s (36km/hr)	被動式	2.3881	100%	73.2%
	模糊式	1.4628	61.3%	44.9%
5m/s (18km/hr)	被動式	1.2985	100%	39.8%
	模糊式	1.0355	79.7%	31.8%

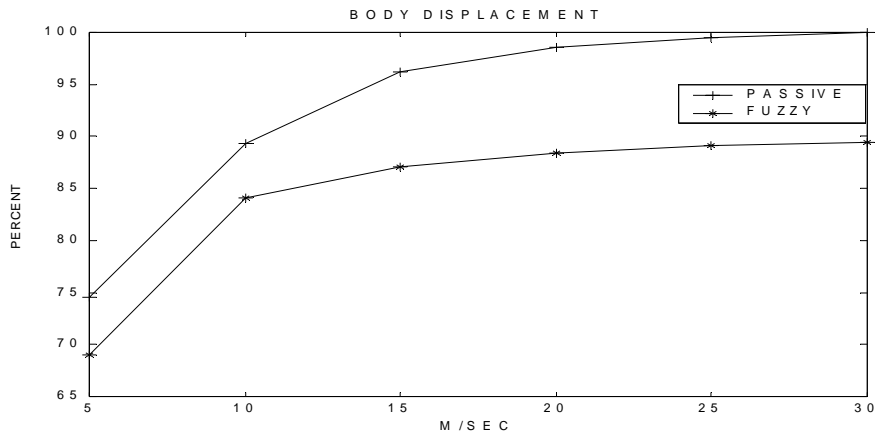


圖 8. 鋸齒波車身位移量與車速關係 (-+-被動式；-\*-模糊控制式)。

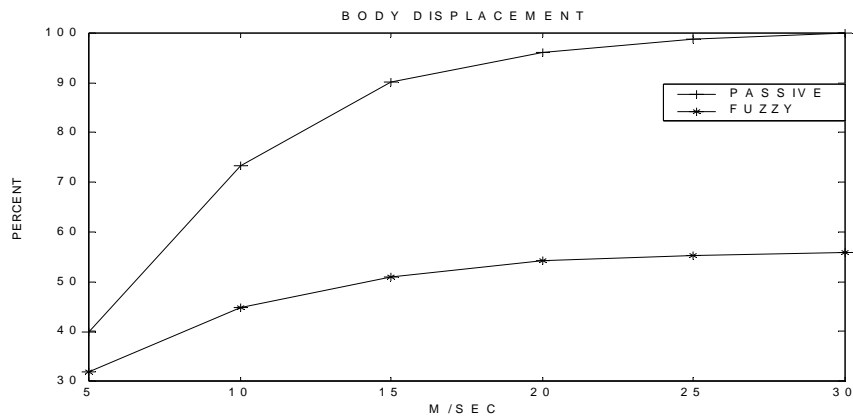


圖 9. 正弦波車身位移量與車速關係 (-+-被動式；-\*-模糊控制式)。

依據表 2 與表 3 之數據顯示，無論是鋸齒波或正弦波路況，車身平均位移量均隨速度而改變，當速度愈高時，平均位移量愈大，而當速度降低時，位移量亦隨之降低。

由表 2 鋸齒波路況結果中可以看出當以各種速度狀況下之被動式平均位移量為 1(100%) 則經由模糊控制後位移量自速度由高而低分別降低至 89.4%、89.5%、89.7%、90.5%、94.2%、92.6%，位移量平均約降低 10%；若將其中速度為 30m/s 之被動式懸吊平均位移量的值 (2.2707) 訂為 1 (100%) 分別比較各種速度與被動模式下車身之平均位移比例，其比例分別為 99.5%、98.5%、96.2%、89.4%、74.5%，隨速度降低平均位移量亦隨之降低，在模糊控

制模式下之比例分別為 89.4%、89.1%、88.4%、87.1%、84.1%、69.0%，同樣當速度降低時平均位移量亦隨之降低，將上述結果繪製如圖 8，由圖 8 中可觀察出當車速增加時位移量雖亦跟著增加，但當速度在 20m/s 以上時則出現較平緩之趨勢。

同樣，由表 3 正弦波路況結果中可以看出當以各種速度狀況下之被動式平均位移量為 1 (100%) 則經由模糊控制後位移量自速度由高而低分別降低至 55.8%、56.0%、56.3%、57.3%、61.3%、79.7%，位移量平均約降低 20%~45%，較鋸齒波狀況為佳；若將其中速度為 30m/s 之被動式懸吊平均位移量的值 (3.2612) 訂為 1 (100%) 分別比較各種速度與被動模式下車身

之平均位移比例，其比例分別為 98.7%、96.1%、90.2%、73.2%、39.8%，隨速度降低平均位移量亦隨之降低，在模糊控制模式下之比例分別為 55.8%、55.2%、54.1%、51.7%、44.9%、31.8%，同時當速度降低時平均位移量亦隨之降低，將上述結果繪製如圖 9，由圖 9 中可觀察出當車速增加時位移量雖亦跟著增加，但當速度在 20m/s 以上時則出現較平緩之趨勢，此結果與鋸齒波路況相當。

由於車身位移量的大小直接影響乘坐的舒適度，因此震動幅度降低，確實提高了車上乘客乘坐的舒適性。

## 5.2 車身縱向傾斜角

圖 10、圖 11 係模擬車輛以被動式懸吊及模糊控制式懸吊分別於模擬鋸齒波與正弦波時以速度 10m/s (36km/hr) 前進時，車身縱向傾斜角之平均傾斜量比較圖。

由圖 10 及圖 11 結果顯示經由模糊控制器處理後的車身縱向傾斜角曲線(以實線表示)較被動控制式的車身縱向傾斜角(以虛線表示)降低許多。

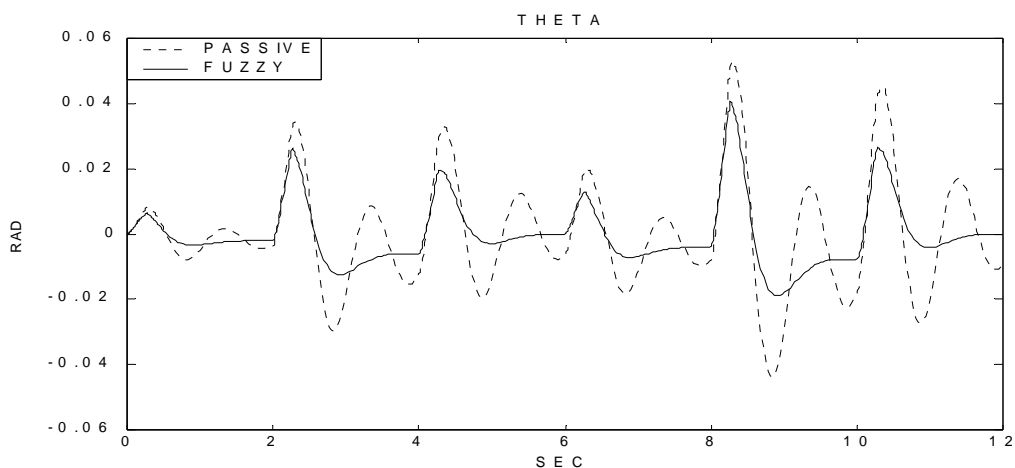


圖 10. 鋸齒波路況車身縱向傾斜角比較 (10M/SEC) (--- 被動式—模糊控制式)。

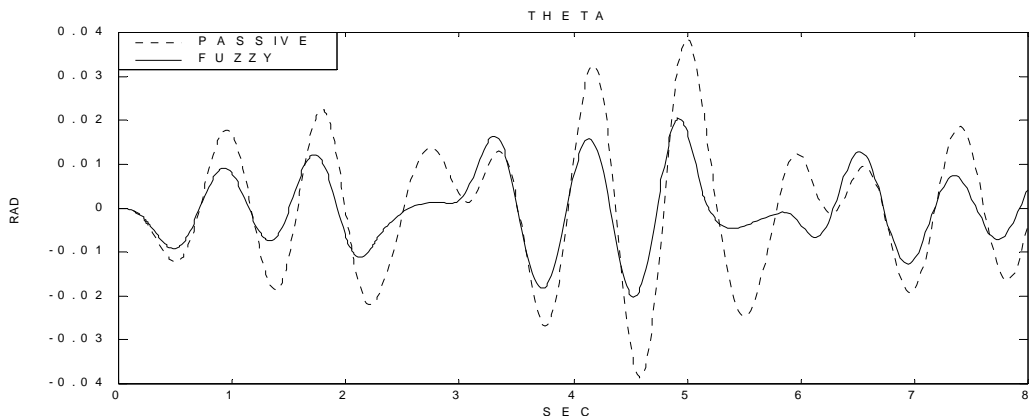


圖 11. 正弦波路況車身縱向傾斜角比較 (10M/SEC) (--- 被動式—模糊控制式)。

表 4. 鋸齒波路況車身重心平均縱向傾斜角。

模擬速度	型式	總平均量(RAD)	百分比	百分比
30m/s (108km/hr)	被動式	0.0045	100%	22.6%
	模糊式	0.0023	51.1%	11.6%
25m/s (90km/hr)	被動式	0.0054	100%	27.1%
	模糊式	0.0028	51.9%	14.1%
20m/s (72km/hr)	被動式	0.0067	100%	33.7%
	模糊式	0.0035	52.2%	17.6%
15m/s (54km/hr)	被動式	0.0089	100%	44.7%
	模糊式	0.0047	52.8%	23.6%
10m/s (36km/hr)	被動式	0.0128	100%	64.3%
	模糊式	0.0070	54.7%	35.2%
5m/s (18km/hr)	被動式	0.0199	100%	100%
	模糊式	0.0127	63.8%	63.8%

表 5. 正弦波路況車身重心平均縱向傾斜角。

模擬速度	型式	總平均量(RAD)	百分比	百分比
30m/s (108km/hr)	被動式	0.0037	100%	20.0%
	模糊式	0.0020	54.1	10.8%
25m/s (90km/hr)	被動式	0.0046	100%	24.9%
	模糊式	0.0025	54.3	13.5%
20m/s (72km/hr)	被動式	0.0061	100%	33.0%
	模糊式	0.0033	54.1	17.8%
15m/s (54km/hr)	被動式	0.0084	100%	45.4%
	模糊式	0.0045	53.6	24.3%
10m/s (36km/hr)	被動式	0.0127	100%	68.6%
	模糊式	0.0067	52.8	36.2%
5m/s (18km/hr)	被動式	0.0185	100%	100%
	模糊式	0.0098	53.0	53.0%

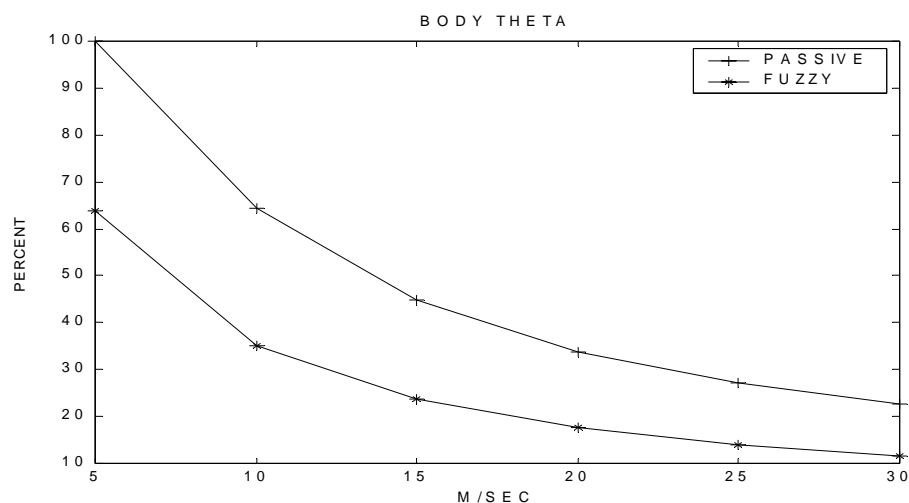


圖 12. 鋸齒波車身縱向傾斜角與車速關係 (—+—被動式；—\*—模糊控制式)。

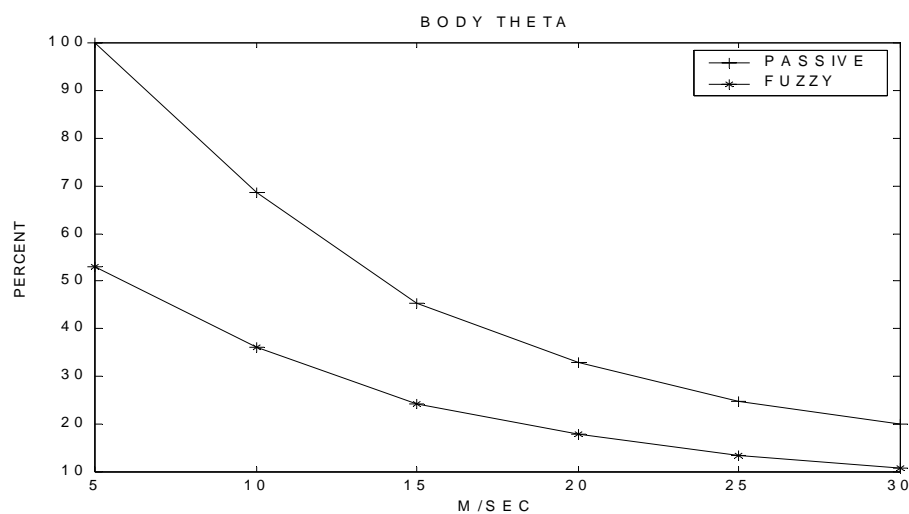


圖 13. 正弦波車身縱向傾斜角與車速關係 (—+—被動式；—\*—模糊控制式)。

為便於車身縱向傾斜角之數值分析，與車身位移量計算方式相同，將車身各種速度狀況下車身縱向傾斜角積分後除以路況時間，將所得之平均值紀錄於表 4 (鋸齒波)、表 5 (正弦波) 及圖 12 (鋸齒波)、圖 13 (正弦波)。

依據表 4 與表 5 之數據顯示，無論是鋸齒波或正弦波路況，車身縱向傾斜角均隨速度而改變，當速度愈高時，縱向傾斜角愈低，而當

速度降低時，傾斜角則隨之提高，趨勢恰與車身重心位移量相反，由此可知當速度愈低時車身縱向傾斜角較易受地勢起伏而改變，而速度提高後地勢起伏對車身縱向傾斜角之影響較低。

表 4 鋸齒波路況結果中可以看出當以各種速度狀況下之被動式車身縱向傾斜角為 1 (100%) 則經由模糊控制後縱向傾斜角自速度

由高而低分別降低至 51.1%、51.9%、52.2%、52.8%、54.7%、63.8%，車身縱向傾斜角平均約降低 36%~49%；若將其中速度為 5m/s 之被動式懸吊平均傾斜角的值 (0.0199) 訂為 1 (100%) 分別比較各種速度與被動模式下車身之平均傾斜角比例，其比例分別為 64.3%、44.7%、33.7%、27.1%、22.6%，隨速度提高傾斜角亦隨之降低，在模糊控制模式下之比例分別為 63.8%、35.2%、23.6%、17.6%、14.1%、11.6%，同樣當速度提高時平均傾斜角亦隨之降低，將上述結果繪製如圖 12，由圖 12 中可觀察出當車速增加時車身縱向傾斜角隨之降低。

同樣，由表 5 正弦波路況結果中可以看出當以各種速度狀況下之被動式平均傾斜角為 1 (100%) 經由模糊控制後傾斜角自速度由高而低分別降低至 54.1%、54.3%、54.1%、53.6%、52.8%、53.0%，傾斜角平均約降低約 47%，較鋸齒波狀況為佳；若將其中速度為 5m/s 之被動式懸吊平均傾斜角 (0.0185) 訂為 1 (100%) 分別比較各種速度與被動模式下車身之平均傾斜角，其比例分別為 68.6%、45.4%、33.0%、24.9%、20.0%，隨速度提高傾斜角亦隨之降低，

在模糊控制模式下之比例分別為 53.0%、36.2%、24.3%、17.8%、13.5%、10.8%，同時當速度提高時平均傾斜角亦隨之降低，將上述結果繪製如圖 13，由圖 13 中可觀察出當車速增加時平均傾斜角亦跟著降低，此結果與鋸齒波路況相當。從圖 10、圖 11 模擬結果中可觀察出車輛的縱向傾斜角經模糊控制後獲得良好改善。

由以上討論結果可知，無論車身重心垂直位移量或縱向傾斜角主要變化因素雖以車速與地形為要，但無論任何速度狀況下，主動式模糊邏輯控制器均有良好的改善效果。

### 5.3 前車身震動與路況灰關聯度比較

本文運用正弦波時車輛速度分別為 10m/s、20m/s、30m/s 時，被動控制與模糊控制下之前車身震動起伏時的 21 個相對起伏頂點與相對之路況位置進行與路況關聯度之關係進行分析。求解過程有三大步驟：首先求差序列，其次求兩級最小差與最大差，最後求取關聯係數。

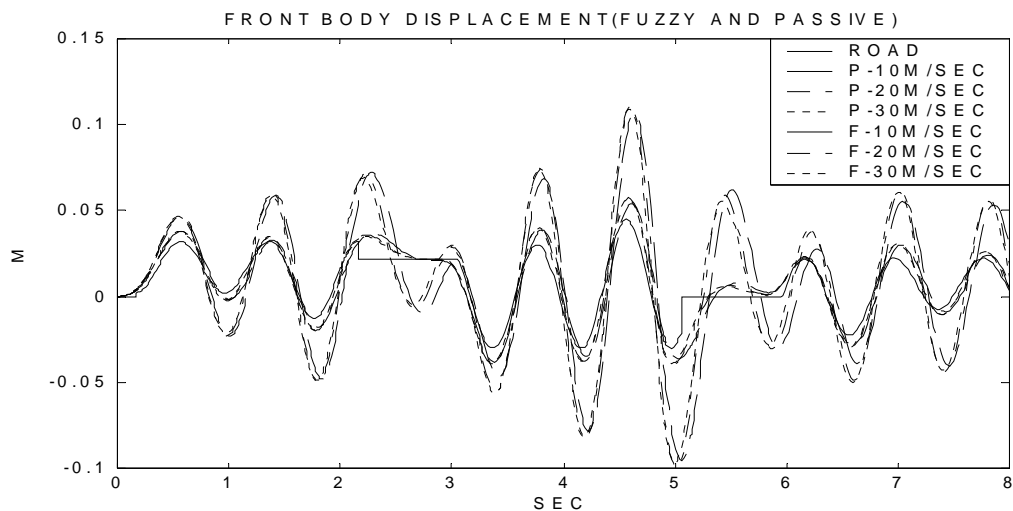


圖 14. 前車身位移 (模糊式、被動式) 與路況比較圖。

表 6. 各種速度與控制模式之正弦波路況頂點原始數據表。

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$x_0$	0	3.196	0.203	3.20	-1.27	3.23	2.20	2.20	-2.99	2.99	-2.99	4.48	-2.99	0.00	0.00	2.239	-2.24	2.236	-0.075	2.233	0.032
$x_1$	0	4.72	-2.30	6.02	-5.04	7.23	-0.95	2.97	-5.62	7.43	-8.34	11.16	-9.98	6.19	-3.04	3.91	-5.01	6.10	-4.40	5.63	2.95
$x_2$	0	4.69	-2.30	5.90	-4.88	7.14	-0.66	2.87	-5.53	7.63	-8.19	10.93	-9.71	5.88	-2.97	3.77	-4.89	6.07	-4.29	5.52	1.66
$x_3$	0	4.67	-2.18	5.89	-4.81	6.90	-0.43	2.14	-4.72	6.86	-7.84	10.66	-9.56	5.53	-2.87	2.77	-3.91	5.54	-4.04	5.30	1.143
$x_4$	0	3.83	-0.24	3.47	-1.97	3.69	2.17	2.19	-3.96	4.05	-3.80	5.75	-3.93	0.77	0.07	2.33	-2.96	3.11	-1.06	2.58	0.84
$x_5$	0	3.80	-0.21	3.47	-1.95	3.60	2.15	2.16	-3.93	3.99	-3.77	5.70	-3.89	0.65	0.09	2.31	-2.93	3.05	-1.04	2.58	0.54
$x_6$	0	3.79	-0.17	3.28	-1.79	3.51	2.07	2.08	-3.82	3.88	-3.46	5.40	-3.61	0.58	0.22	2.16	-2.81	3.01	-0.88	2.40	0.42

表 7. 各種速度與控制模式之正弦波路況頂點與路況之差序列。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$\Delta_1$	0	0	0.55	0.28	0.67	0.52	0.89	0.058	0.26	0.64	0.83	0.96	1.18	1.31	0.65	0.13	0.36	0.59	0.91	0.50	0.62
$\Delta_2$	0	0	0.55	0.26	0.65	0.51	0.83	0.075	0.24	0.63	0.81	0.93	1.13	1.26	0.63	0.10	0.34	0.60	0.89	0.48	0.35
$\Delta_3$	0	0	0.53	0.26	0.63	0.47	0.78	0.23	0.073	0.53	0.74	0.88	1.11	1.18	0.61	0.11	0.14	0.49	0.84	0.44	0.23
$\Delta_4$	0	0	0.13	0.091	0.12	0.045	0.12	0.12	0.099	0.12	0.056	0.098	0.089	0.20	0.018	0.09	0.07	0.11	0.25	0.025	0.21
$\Delta_5$	0	0	0.12	0.086	0.117	0.064	0.123	0.119	0.098	0.112	0.055	0.098	0.086	0.171	0.025	0.091	0.070	0.102	0.251	0.019	0.13
$\Delta_6$	0	0	0.11	0.13	0.077	0.083	0.141	0.139	0.073	0.089	0.023	0.023	0.015	0.153	0.057	0.130	0.042	0.094	0.209	0.065	0.10

表 8. 各種速度與控制模式之正弦波路況頂點與路況之灰關聯度。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$\xi_1$	1	1	0.54	0.70	0.49	0.56	0.42	0.92	0.72	0.51	0.44	0.41	0.36	0.33	0.50	0.84	0.64	0.52	0.42	0.57	0.52
$\xi_2$	1	1	0.54	0.72	0.50	0.56	0.44	0.90	0.73	0.51	0.45	0.41	0.37	0.34	0.51	0.86	0.66	0.52	0.42	0.58	0.66
$\xi_3$	1	1	0.55	0.72	0.51	0.58	0.46	0.74	0.90	0.55	0.47	0.43	0.37	0.36	0.52	0.86	0.83	0.57	0.44	0.60	0.74
$\xi_4$	1	1	0.84	0.88	0.85	0.94	0.85	0.85	0.87	0.84	0.92	0.87	0.88	0.77	0.97	0.88	0.90	0.85	0.72	0.96	0.76
$\xi_5$	1	1	0.85	0.88	0.85	0.91	0.84	0.85	0.87	0.84	0.92	0.87	0.88	0.79	0.96	0.88	0.90	0.87	0.72	0.97	0.83
$\xi_6$	1	1	0.86	0.83	0.89	0.89	0.82	0.82	0.90	0.88	0.97	0.97	0.98	0.81	0.92	0.83	0.94	0.87	0.76	0.91	0.87



設路況為參考數據列（其關聯度為 1），關聯度愈接近 1 者表示在該狀況下，其控制效果較好。數列  $x_0$ 、 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$  及  $x_6$ （如表 6 所示）為分別取自路況、被動式 30m/s、20m/s、10m/s 及模糊控制式 30m/s、20m/s、10m/s 之 21 個相對起伏頂點。首先求取差數列（如表 7 所示）；其次，求出兩級最小差（0）與兩級最大差（1.3119）；再將兩級最小差與兩級最大差帶入各差序列  $\Delta_i$  中求出個別值之關聯度（表 8），最後利用（14）式求出各序列之平均關聯度為：

灰關聯度					
被動式			模糊控制		
30m/s	20m/s	10m/s	30m/s	20m/s	10m/s
0.591	0.604	0.628	0.876	0.881	0.892

各種速度下之關聯度計算結果如上表（圖 14 為模擬結果），根據上表可看出當車身以被動方式控制時，其關聯度較低（59.1%、60.4%、62.8%），若以模糊方式控制時，由於車身起伏更貼近路面，因此其關聯度明顯較高（87.6%、88.1%、89.2%），因此運用關聯度評估模擬結果，對於複雜路況結果之分析亦具有相當意義。

## 六、結論

本文提出的模糊邏輯控制器，成功的應用在二分之一車的主動式懸吊系統上，經模擬結果證明能夠模擬二分之一車的動態狀況，完整模擬車身行進中各重速度下的動態狀況，不論是鋸齒波或正弦波型式的路況，皆能降低振盪，提升乘坐舒適性，也提高了車輛的操控性能。同時，灰關聯運用於車況結果分析亦為一嶄新的嘗試。

若調整相關參數，本模型亦可應用於機車或自行車等兩輪車輛之動態模擬測試，對車輛

實況測試將有助益。此控制器的邏輯簡單，運算迅速，應能運用於即時系統及全車模型。

## 參考文獻

- [1] Gillespie, T. D., Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, Inc. Warrendale, PA., 1992.
- [2] 陳家瑞主編，汽車構造（下冊）（第三版），人民交通出版社，北京市，第二十一章，第 196-198 頁，1995。
- [3] Nazaruiddin, Y.Y., Yamakita, M., “Neuro-fuzzy Based Modeling of Vehicle Suspension System,” Proceedings of the 1999 IEEE International Conference, Vol. 2, pp.1490-1495, 1999.
- [4] Nicolas, C.F., Landaluze, J., Castrillo, E., Gaston, M., and Reyero, R., “Application of Fuzzy Logic Control to the Design of Semi-Active Suspension,” The 6<sup>th</sup> IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vol. 2, pp.987-993, 1997.
- [5] Kuo Yi-Pin and Li T.-S.S., “GA-based Fuzzy PI/PD Controller for Automotive Active Suspension System,” IEEE Transactions on Industrial Electrics. Vol. 46, No. 6, pp. 1051-1056, 1999.
- [6] Foda, S. G., “Fuzzy Control of a Quarter-Car Suspension System,” Proceedings of The 12<sup>th</sup> International Conference on Microelectronics, Tehran, pp.231-234, 2000.
- [7] 紀慶嘉、吳修志、張惠珍，”應用於四分之一車的主動式懸吊系統之灰-模糊控制器”2002 年人工智慧研討會論文集，第 77-82 頁，2002。
- [8] Wu, Yuanjie and Xu, Bohou, “Study on the

- Damping Fuzzy Control of Semi-Active Suspension,” Vehicle Electronics Conference, ( IVEC ‘99 ) Proceedings of the IEEE International Conference, Vol. 1, pp. 66-69, 1999.
- [9] Redfield, R. C., “Performance of Low-Bandwidth Semi-Active Damping Concepts for Suspension Control,” Vehicle System Dynamics, Vol. 20, No. 4, pp. 245-267, 1991.
- [10] 鄧聚龍，灰色系統基本方法，華中理工大學出版社，武漢市，第二章，第 17-31 頁，1997。