

多功能虛擬實境動態模擬系統中之
六軸運動平台的智慧型控制
Intelligent Control of Stewart Platform
in the Multipurpose Virtual-Reality-Based Motion Simulator

計畫編號：NSC-89-2218-E-009-042

執行期間：89年8月1日至90年7月31日

主持人：林進燈 教授 ctlin@fnn.cn.nctu.edu.tw

執行機關：國立交通大學電機與控制工程研究所

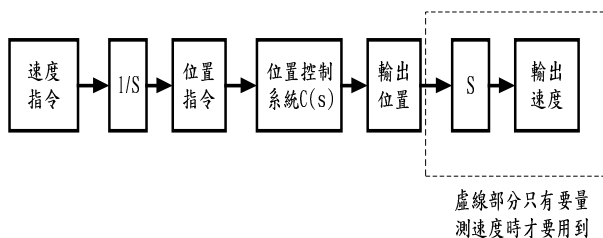
第三年具體成果：

一、六軸平台之控制

在完成平台的各種動力學分析及位置控制法則發展後，在第三年度裡，我們利用這些已有的資訊，進一步發展了進似的速度控制方式。此外為了使六軸運動模擬器能克服平台工作空間的限制，使模擬動作能更逼真，並真正實現六軸運動平台的速度控制與加速度控制，我們利用「動作提示(Motion Cues)」的觀念，以人類身體對力的感受配合眼睛在視覺上的假像，藉由「沖淡演算法」來實現平台的速度與加速度控制，並與實驗室自行發展的飛機動態模型結合，完成一個完整飛機操控訓練的虛擬實境。

1. 進似的六軸運動平台之速度控制

假設我們有一位置控制系統，其系統響應為 $C(s)$ ，則藉助開迴路系統，我們可利用此位置控制器來達成速度控制。其達成方式如下：



圖(1): 利用位置控制器完成速度控制的架構圖

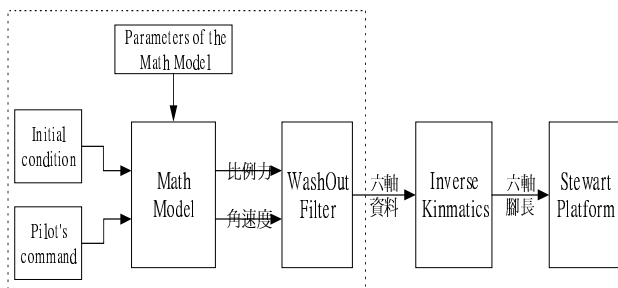
該架構乍看之下為開迴路架構，因此在傳統印象中，會認為其將具有開迴路的一些缺點。事實上，我們所提架構為開迴路和閉迴路架構之整合，因此其並不完全具備開迴路的缺點。事實上，除了抗雜訊能力較用閉迴路完成的速度弱外，其它方面都表現得還不錯。傳統上，閉迴路控制器較開迴路控制器具有四個優點，分別為：對參數變動靈敏性較小、可調整控制系統的暫態、較佳的抗雜訊能力及較佳的穩態誤差。經探討，我們發現所設計的速度控制系統除了對抗雜訊較差外，其擁有一般閉迴路速度控制系統的優點。

2. 動作提示

Stewart Platform 為一具有六自由度運動能力之機械平台，但其運動範圍受到其工作空間的限制，有些動作是無法達成。因此為了在其有限空間下模擬出駕駛汽車、飛機、輪船等交通工具時之運動感覺。所以我們以「沖淡演算法(Washout Algorithm)」架構出「動作提示(Motion Cues)」的完整架構，以達到我們對模擬器的力的感受。

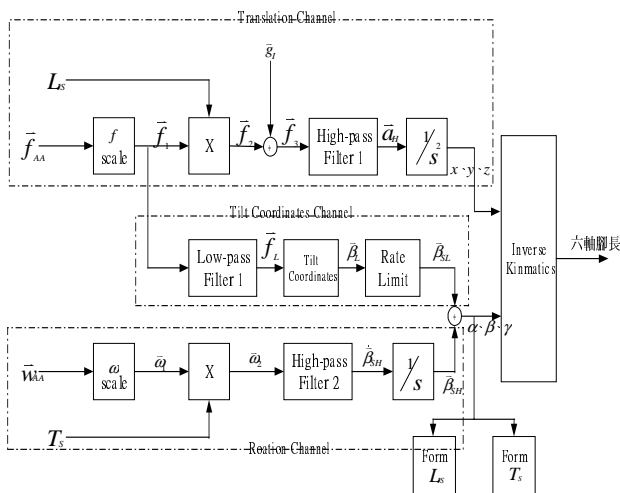
“動作提示”就是要在有限的空間裡，利用人體對力的感覺配合視覺上的假像來模擬一些一般平台所無法達成的動作，像飛機的翻滾、長時間的持續加速過程等動作。這對傳統的 Stewart Platform 控制是有存在的困難點，因一般是以位置控制為主，但要表現出模擬器力的表現則需速度與加速度方面的資料，所以我

們以模擬器所模擬的交通工具之數學 model 與 Washout Algorithm 架構出「動作提示」與六軸平台構成一完整的運動模擬器，其完整架構如圖(2)所示。



圖(2)：「動作提示」與六軸平台之完整架構

圖(3)為 Washout Algorithm 的架構，我們將以此架構將模擬器上之一參考點之運動感覺轉換為其在上平台對應點之運動。



圖(3)：Washout Algorithm 架構

“沖淡演算法(Washout Algorithm)”主要是利用人類對感覺具有門檻值(Threshold Value)的特性，適當將某些頻率成分的線性運動或轉動運動加以濾除，並將持續的比例力感覺用緩慢轉動一傾斜角的方式來實現，這個傾斜角所產生的轉動被控制在人類對轉動感覺的門檻值以下，操作員將不會有明顯的感覺，以免混淆原本轉動運動的感受。

3.發展以模糊控制器調整沖淡濾波器參數

當利用傳統沖淡濾波器於平台控制時，有時會發生特別的錯誤動作(motion error)，則這時需進一步調整濾波器的參數。在表(1)中列出沖淡濾波器的參數與錯誤動作之間的關係，另外錯誤動作的定義如下：

- (1) **Motion Jerkiness**：描述高頻部份的錯誤，當出現非預期的高頻顫動動作時，稱為急動。
- (2) **Motion Amplitude**：描述暫態或持續動作的大小。
- (3) **Motion Duration**：用來描述高頻暫態的動作是否有遺漏，當發生時，此動作的持續期間稱為太短(too short)。

錯誤動作	自由度	濾波器參數
Motion Jerkiness	X、Y	↓ w_{lpx} 、 w_{lpy} 、 w_{hpx} 、 w_{hpy} ↓ ζ_{hpx} 、 ζ_{hpy}
	Z、Yaw	↓ w_{hpz} 、 $w_{hp\phi}$ ↓ ζ_{hpz} 、 $\zeta_{hp\phi}$
	Pitch、Roll	↓ $w_{hp\theta}$ 、 $w_{hp\theta}$ ↓ $\zeta_{hp\theta}$ 、 $\zeta_{hp\theta}$
Motion Amplitude (too small)	X、Y、Z	↓ w_{hpx} 、 w_{hpy} 、 w_{hpz}
	Roll、Pitch、Yaw	↓ $w_{hp\phi}$ 、 $w_{hp\theta}$ 、 $w_{hp\phi}$
Motion Amplitude (too large)	X、Y、Z	↑ w_{hpx} 、 w_{hpy} 、 w_{hpz}
	Roll、Pitch、Yaw	↑ $w_{hp\phi}$ 、 $w_{hp\theta}$ 、 $w_{hp\phi}$
Motion Duration (too short)	X、Y	↓ w_{hpx} 、 w_{hpy} ↓ ζ_{hpx} 、 ζ_{hpy}
	Z、Pitch	↓ w_{hpz} 、 $w_{hp\phi}$ 、 $w_{hp\theta}$ 、 $w_{hp\phi}$
	Roll、Yaw	↓ ζ_{hpz} 、 $\zeta_{hp\phi}$ 、 $\zeta_{hp\theta}$ 、 $\zeta_{hp\phi}$

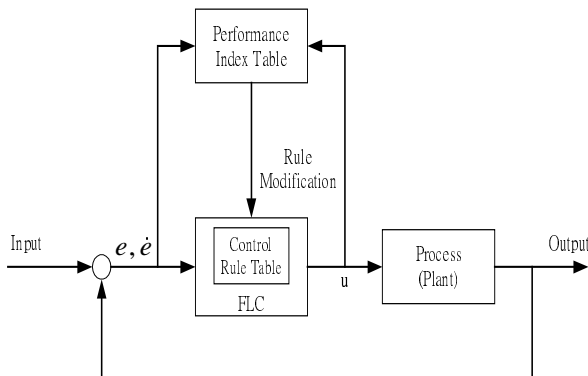
Motion Duration (too long)	X、Y	$\uparrow w_{lpx}、w_{lpy}$
---------------------------------------	-----	----------------------------

表(1)：錯誤動作與沖淡濾波器之參數關係

利用表(1)的對應關係，我們可以透過查表的方式，以手動的方式改變沖淡濾波器的參數，快速地修正模擬器的錯誤動作。並以模糊控制的概念，透過表(1)的對應關係，在發生某些錯誤動作時，我們可用建立完成的 IF ~ THEN 形式的模糊規則庫，調整沖淡濾波器的參數。

模糊規則控制器之架構

我們所使用的模糊規則控制器是一具有自我組織能力之控制器。其架構如下圖所示：



圖(4)：具自我組織能力模糊規則控制器架構圖

在這個架構的模糊控制器中，包含了兩個模糊規則庫，一個是 Control Rule Table 其功能主要是記錄輸入變數和輸出變數間的映射對應關係，透過它我們可以很容易的對受控體做控制，但對於可變動的受控環境，其效果並不好，為了彌補此缺點，還需採用二個模糊規則庫，稱為 Performance Index Table，用來調整 Control Rule Table 中的模糊規則，使控制器具有學習的能力。

Control Rule Table 之建立

Control Rule Table 主要是記錄輸入變數和輸出變數間的映射對應關係。在輸入變數方面，我們是以誤差值 e 及誤差值之變化量 \dot{e} 做為模糊規則表的輸入變數，而在輸出變數方

面，我們並不是直接採用沖淡濾波器參數 Wn 或 ζ ，而是另一個轉化過的變數 W_I 或 ζ_I ，所以，雖然在表(1.2.2)中，我們列出的是錯誤動作和 Wn 或 ζ 的關係，但是我們並不是直接針對 Wn 或 ζ 的值做控制，而是對 $Wn(t) = Wn(t-1) + W_I(t)$ 或是 $\zeta(t) = \zeta(t-1) + \zeta_I(t)$ 的關係式，來改變 Wn 和 ζ 的大小。

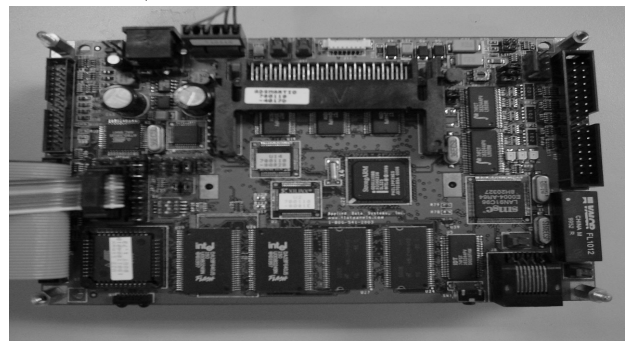
Performance Index Table 之建立及學習機制

Performance Index Table 之學習概念並不同於 Control Rule Table 的設計方式，其模糊規則並不是單純設計輸入與輸出的映射對應關係，而是透過預測上一次的控制結果，給予一個新的程度上的獎勵命令，並配合 Control Rule Table 做進一步的調整，使其中的輸入與輸出關係，具有調整性。

二、嵌入式系統之發展

在過去兩個年度裡，我們是以 PC-Based 整合系統為發展方向，而在第三年度裡，我們的整合系統則進一步試著朝著小型嵌入式硬體單板的發展，以取代整台 PC 之功能。

這裡我們所採用的是由 Apply Data System 公司所生產的 Graphics Client Plus 產品。選擇這塊板子的原因是因為它有豐富的序列傳輸介面，包括 IrDA、RS-232、RS-485 及 CAN-Bus，也有內建 10Base-T 網路以及觸控式螢幕及鍵盤等，並且支援包括 Linux、WinCE 等五種嵌入式作業系統，可以發展的嵌入式種類及相關應用程式可謂相當豐富。此塊單板實體圖片如下圖所示：



圖(5)：Apply Data System 公司所生產的 The Graphics Master 產品

除此之外，GCPlus 所使用的微處理器為 SA-1110，而在 LART 的計畫中亦是使用 Strong ARM 微處理器系列。所謂 LART 計畫是由國外的 Delft University of Technology 所主持的研究計畫，主要研究在消耗不到一瓦特功率而可以達到 250MIPS 指令的 Linux 嵌入式系統。它有一套較為完整的 Linux 嵌入式系統文件及 mailing list，更難得的是它將所有的軟硬體以 GPL 方式公開。因此在發展 Strong ARM1110 嵌入式系統時可以有較為完整的相關文件可以參考。

目前我們在 GCPlus 單板上發展嵌入式系統來控制虛擬實境動態模擬器並未完全成功。現在已做到的為移植 Linux 作業系統至 GCPlus 單板上，使單板成為 Linux 嵌入式系統，並成功撰寫一些周邊驅動程式。未來則打算自己發展一塊嵌入式的板子，並加入六軸平台的驅動電路，以完成與平台的結合。

三、飛機虛擬場景之發展

在虛擬場景的發展上，我們可分硬體及軟體兩部份分別述說之。首先在硬體設備上，我們在交通大學電子資訊大樓 416 室建購一個專屬的虛擬實境展示室，其更增加了本計畫展示上的生動效果。而在軟體發展上，我們延續以往累積的經驗，將原有單純的虛擬實境場景擴大發展成為分散式模擬操控訓練系統。不過由於第三年總計畫的目的在於發展一虛擬飛機操控系統，因此在虛擬場景的開發上，我們是針對飛機場景來發展。下列即為軟體部分在第三年所完成的事項：(1) SGI 飛機模擬操控訓練系統雛型之建立、(2) PC 雙人飛機模擬操控訓練系統雛型之建立。

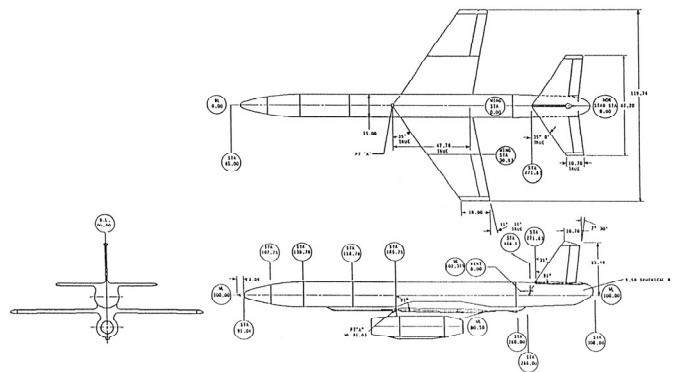
1. SGI 飛機模擬操控訓練系統雛型之建立

圖(6)中的虛擬實境飛機場景是使用在 SGI 機器上的一套 VR 軟體 Coryphaeus 所發展出來的，其精細度與逼真度與使用 PC 上的 VR 軟體 WTK 來發展的場景做比較，其效果要好許多。另外場景除了有用來與六軸運動平台搭配整合外，我們更是利用分散式系統架構，並

搭配現有的 MQM-104B 遠端無人操控飛機之動態模擬模組(參考 S.D. Lemke 所撰寫之「Aerodynamic and Performance Summary for the MQM-107B Clean and with I.R. Tip Pods」技術報告)，以完成逼真的飛機模擬操控訓練系統之雛形。



圖(6)：飛機場景之畫面成果展示

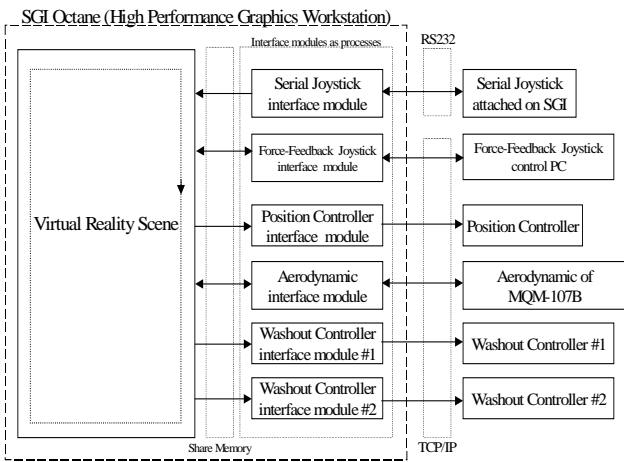


圖(7)：MQM-107B 無人操控飛機之外觀

2. 系統整合

飛機操控模擬訓練系統，除了場景畫面與動態模擬模組之間的搭配外，有時還必須與六軸運動平台「位置控制器」、「Washout 控制器」等外部硬體模組整合。為此我們在「系統整合」當中提出通訊介面模組的觀念，透過 TCP/IP 網路通訊協定來連接操控模擬訓練系統與其

它外部硬體，以展示最終完整的分散式即時動態視覺飛機操控訓練系統。



圖(8)：虛擬實境場景底層軟體架構圖

3. PC 場景開發

在本年度本計畫的虛擬實境場景開發部分，我們除了以 SGI 工作站為場景開發的主要平台之外，也試圖在 PC 個人電腦平台下發展虛擬實境場景，尋求較為廉價且容易普及的解決方案。因此在飛機場景上我們亦發展了一套飛機模擬場景。值得一提的是這裡所發展的飛機模擬場景是針對雙台飛機連線系統。



圖(9)：雙人飛機模擬操控訓練系統成果展示

4. 虛擬實境展示室

為增加展示上的生動效果，我們規畫了一間虛擬實境之展示空間。設計上將室內空間區隔成三個獨立空間，包括有機械油壓室、動作平台展示室及控制室(見圖(10)所示)。另外在圖(11)中展示一段實際結合平台的影片，以供參考。



圖(10)：虛擬實境展示室



圖(11)：虛擬實境動感影片

- 【1】 D. Stewart, "A platform with six degrees of freedom", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 180, Part 1, no. 5, pp. 371-386, 1965-1966.
- 【2】 Z.Geng, "On the Dynamic Model and Kinematics Analysis of a Class of Stewart Platform", *Journal of Robotics and Automation System*, Vol.9, 1992.
- 【3】 H. Pang, "Kinematics and Dynamics of a Parallel Manipulator with Woven Joints", *Vibration and Dynamics of Robotics and Multibody structures*, ASME, pp. 49-56, 1993.
- 【4】 K. Liu, J. M. Fitzgerald and F. L. Lewis, "Kinematic analysis of a Stewart platform manipulator", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 40, No. 2, pp. 282-293, April, 1993.
- 【5】 Idan Moshe and Nahon Meyer A., "Off-line comparison of classical and robust flight motion control," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 22, no. 5, pp.702-709, September-October 1999.
- 【6】 Nicolas A. Pouliot and Clement M. Gosselin and Meyer A. Nahon, "Motion Simulation Capabilities of Three-Degree-of-Freedom Flight Simulators." *Journal of Aircraft*, Vol 35. No. 1, January-February 1998.
- 【7】 Peter R. Grant and Lloyd D. Reid, "Motion Washout Filter Tuning: Rules and Requirements", *Journal of Aircraft*, Vol. 34, No. 2, March-April 1997.
- 【8】 Grant, P. R., and Reid, L. D., "PROTEST: An Expert System for Tuning Simulator Washout Filters," *Journal of Aircraft*, Vol. 34, No. 2, March-April 1997, pp. 152-159.
- 【9】 Yu-Chung Wang and Kwei-Jay Lin, "Enhancing the Real-Time Capability of the Linux Kernel," In 5th International Conference on Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA' 98), Oct 1998.
- 【10】 De Goyeneche, J.-M.; De Sousa, E.A.F. "Loadable kernel modules" *IEEE Software*, Volume: 16 Issue: 1, Jan.-Feb. 1999, pp. 65-71.
- 【11】 Zuberi, K.M.; Shin, K.G. "EMERALDS: a microkernel for embedded real-time systems" *Real-Time Technology and Applications Symposium*, 1996. Proceedings., 1996 IEEE, 1996, pp. 241-249.
- 【12】 De Goyeneche, J.-M.; De Sousa, E.A.F. "Loadable kernel modules" *IEEE Software*, Volume: 16 Issue: 1, Jan.-Feb. 1999, pp. 65-71.
- 【13】 S.D.Lemke, "Aerodynamic and performance summary for the MQM-107B clean and with I.R. TIP PODS", ENGINEERING REPORT 1089E446, Beech Aircraft Corporation, December 1984.

附件：參加「第九屆國際模糊系統年會 會議」報告

一、參加會議經過

這次會議是由 International Fuzzy System Association (IFSA) 及 North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS) 所主辦，主要是探討模糊理論之發展，模糊與類神經及遺傳演算法結合系統之建立，模糊晶片之設計，以及模糊邏輯在控制、通訊、交通、影像處理與許多其他領域之應用。會議從七月二十五日到七月二十八日共有四天，在加拿大溫哥華是史坦利公園的 Coast Plaza Suite Hotel 舉行，第一天為 Tutorial，第二天為議程開始，晚上有歡迎酒會，第三天晚上並有晚宴。這次會議的主題包括 Fuzzy Control，

Fuzzy Modeling，Fuzzy Clustering，Stability Analysis，Fuzzy Logic and Genetic Algorithm，Fuzzy Decision Making，Fuzzy Neural Network，Image Processing，Fuzzy Hardware，Industrial Application，Traffic Control，Medical Applications，Robotics 等等，共有來自 41 個國家的 547 篇論文以六個 Parallel Sessions 方式同時進行。我的論文被邀請在第一天下午 13:30 發表。這一篇是以口頭報告方式發表，當中不少學者提出問題討論，包括英國模糊界大師 Prof. C. J. Harris，並有許多學者要求所發表論文的詳細資料。

二、與會心得

由會議之論文發表情形以及現場許多海報及業界展示看來，模糊邏輯的應用已深入各個領域，期中令人印象深刻的包括交通流量監控，自動車控制，網際網路及醫學方面的應用，由此現象可預期模糊邏輯將有更廣大的應用空間。同時有關模糊控制的理論研究在這次會議中也有不錯的論文發表，這使得模糊控制能逐漸脫離「在數學上不夠嚴謹」的批評。此

次會議的另一個重點是模糊分類及模糊影像處理。許多論文及成果展示了模糊邏輯在此領域有與控制相仿的應用空間。另外，關於模糊系統與類神經網路及遺傳演算法的結合仍有持續的發展。相信這些相關技術的結合是未來智慧型系統技術的主軸。另外值得一提的，在網際網路時代，利用模糊邏輯技術於網路資料的擷取 (Data Mining) 將有許多發揮的空間，值得關注。

三、建議

應鼓勵工業界、企業界在發展其產品時多考慮模糊技術之應用以提高產品的「智慧度」，並提高產品人機介面之人性化程度。至於學術界則可朝模糊技術的理論基礎發展，以提昇其應用深度及可靠度。

四、攜回資料名及內容

Proceedings of Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, Vancouver, Canada, 2001.