

行政院國科會工程處自動化學門 89 年度專題研究計劃成果報告

中文計畫名稱：飛行模擬平台設計問題分析及視效與脈衝運動匹配之研究

英文計畫名稱：The Design Problem Analysis and the Match between Vision and Pulse Motion for the Flight Simulator Platform

計畫編號：NSC 89-2212-E-009-025

執行期間：88/08-89/07

主持人& E-mail：成維華 whc@cc.nctu.edu.tw

執行單位：國立交通大學機械系

計畫中文摘要

本計畫主要在發展一般化之 PC-based 控制機制，以電動螺桿缸驅動之 Stewart 平台作為飛行模擬器之運動平台，並針對平台之 VR 視效與電動馬達脈衝運動(Pulse Motion)之相互搭配與平衡問題，作一深入研究。計劃中所建立一套系統雛型，包含一六自由度 Stewart 運動平台，同時對於人和平台在加速度、視效方面之人因工程方面的問題作一討論。此系統亦包含全方位磁感式位置追蹤感測裝置及各種致動器之安排，獲致電氣迴路與機構運動之完整且即時資料，以利平台位置迴路之即時控制，並結合即時立體影像監控系統，透過傳輸界面軟體控制的裝置，經由飛行模擬平台控制系統，發揮即時控制與顯示之雙重效果。數項設計問題亟需事先加以分析與計算，包括了飛行模擬平台工作空間(Workspace)之計算、靈巧工作空間(Dexterous Workspace)之計算、以及奇異點分析(Singularity Analysis)等，以提供飛行模擬平台之設計準則。在控制律(Control Law)設計上使用滑動模式控制(Sliding Mode Control)控制方式，可對高複雜度之機構模式作一簡易而有效率之控制。最後則探討飛行模擬器空電系統與座艙人機界面之設計與整合。

計畫英文摘要

This study proposes an innovative architecture for a generalized PC-based system to control the Stewart platform as a flight simulator with the electrical screwball cylinders used as its actuators. It discusses the match problem between the VR display and the motor pulse motion. A six degree-of-freedom Stewart platform was established, and the human factor issues were discussed and oriented to the relation between motion acceleration and visual display. The system installed a magnetic position-tracking sensor, and the display system is integrated with the flight simulator control, therefore the sensor data can provide both real time control and real time 3 D display capabilities at the same time. Some design problems were analyzed and calculated, including workspace, dexterous workspace, and singularity analysis, to provide the criteria for a flight simulation platform. The sliding mode control is used as the control law for the complicated mechanism. Finally the design and integration between Avionics system of the flight simulator and the cockpit pilot vehicle interface is discussed also.

計畫緣由及目的

Stewart 平台[1]係由 Stewart 所提六自由度平行式機構，其剛性、力重比、以及控制精度佳[2]，一般為六個線性伸縮桿之構型，可得到六個自由度[3]；本計畫採用三軸 Stewart Platform，包括了六個致動器，其中三個在線性伸縮桿上，另外三個在旋轉關節上，依 Grubler 公式可得六個自由度[4]，具有三線性伸縮桿之對稱性與簡易性，兼具六自由度能力。飛行模擬平台與飛行員間最重要之互動關係應為加速度，脈衝運動在一短時間內產生一個很大的加速度。在一段較長時間內，加速度與速度、位移均應恢復至原始值，以利運動平台之繼續運作。在脈衝運動期間，速度與位移及其一次導數必須為連續的，以避免動力系統中有不可預期之加速度產生。脈衝運動分為兩個時期，在作用時期(Activation Period)產生加速度，而在恢復時期(Restoration Period)產生減速度。該減速度應足夠小以使整個動力系統可忽略其值而不致受到影響，才能使 VR 視效部份能持續進行而不致使操作者感受到。設計問題包括飛行模擬平台運動學之分析[5]、工作空間(Workspace)之計算[6]、靈巧工作空間(Dexterous Workspace)之計算[7]、以及奇異點分析(Singularity Analysis)[8]等。正向運動學(Forward Kinematics)可獲得平台之位置與方向，滿足所輸出的關節角度與線性伸縮桿長度。但一組十六次方多項式方程式[9]之通解在控制系統中相當耗時，新的方法利用數值疊代方法可大幅減少計算；同時利用幾何關係描述之方式完成奇異點分析，並對工作空間與靈巧工作空

間之計算提供新而深入之探討。在控制器設計上，滑動模式控制(Sliding Mode Control)可對複雜機構作一簡易有效率之控制，適合本計畫之平行機構平台執行高效率之即時控制。可變結構控制是由可變結構系統之理論得來，由 70 年代發展而來[10]，在航空上之飛行控制與一般工業界之機器人控制均有不少應用[11]。滑動模式控制之主要目的，在於消除一些擾動(Disturbances)，尤其是對於無法參數化之擾動信號，可減少相對之靈敏度[12]，利用一切換平面(Switching Surface)或切換線(Switching Line)使系統誤差輸入作正負交替，在有限時間內滑動至原點，達成零誤差狀態。可變結構控制之穩定性分析則可使用相位平面分析(Phase Plane Analysis)[13]，以先求得穩定之控制系統。飛行模擬平台與虛擬實境[14]系統整合已非工作站級電腦之專利，本計畫飛行模擬器具有模擬座艙與顯視幕供監控及訓練。據資策會調查[15]，在 2002 年時，全球新增產之 PC 均將適用於 VR 系統之應用，因此使用 PC Based VR 系統作為飛行模擬器之視效處理，同時兼具發展性與普及性。在座艙人機界面，飛行模擬器可參考商用民航機或先進航管系統[16]，或戰機之空電系統(Avionics System)[17]之座艙配置與控制方式。本研究計畫之座艙空電設計則採用 4 部 PC，PC1 相當於戰機系統顯控單元與飛行控制系統，為 PLC 控制器；PC2 相當於戰機系統之抬頭顯示器為 VR 控制器；PC3 相當於戰機系統之火控計算機為資料計算控制器；PC4 為安全控制器。各控制器間之傳輸為 Ethernet，以替代航空用

匯流排之功能，配合油門與搖桿，達成某一特定飛行器各種姿態與加減速控制模擬。在人因工程之考量上，考慮人體對加速度之容忍度。據美國軍方與太空總署所作的測試結果[18]，人體在連續 20 分鐘的加速運動時間內，約可容忍 2 至 3G 之範疇。

研究方法

飛行模擬平台之設計分析流程如圖 1 所示，研究方法如下：1. 飛行模擬平台之位置分析：完成反向運動學分析，先行計算每一瞬間所需之加速度，在有限之工作區間內，在一離散時間序列內對加速度作取樣。

2. 脈衝運動與視效之匹配分析：脈衝運動是指在一短時間內產生一個很大的加速度。在一段較長時間內，加速度與速度、位移均應恢復至原始的值，通常為零，以利運動平台之繼續運作。在脈衝運動期間，速度與位移及其一次導數必須為連續的，以避免動力系統中有不可預期之加速度產生。脈衝運動可分為兩個時期，亦即為作用時期(Activation Period)與恢復時期(Restoration Period)。脈衝運動是在作用時期產生加速度，在恢復時期產生減速度。該減速度應足夠小以使整個動力系統可忽略其值而不致受到影響。圖 2 說明了脈衝運動與視效之匹配問題。

3. 飛行平台之基本設計問題分析：正向運動學問題之目標在於獲得平台之位置與方向，以滿足所輸出的關節角度與線性伸縮桿長度。一組十六次方多項式方程式通解會造成在即時控制系統中相當耗時之情形，計畫中以數值疊代之方法來計算正向運動學，以

增進計算之效率。由初始猜想值而得到角度之方式，可由正向運動學之數值疊代步驟來加以驗證，直到發散出現。這是以一個簡單而最陡峭下降之方式完成的。有相同位置者為運動學之奇異點，其條件可由適當之角度限制來避免，包括了控制參數

$W_{\min} \leq W \leq W_{\max}$ 與被動自由度

$\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}$ 。這些角度限制即形成了工作空間分析之基礎，進而可在飛行模擬平台致動器之極限開關之配置上作一正確之設計。可達工作空間

(Reachable Workspace)為平台中心在至少一個方向上可到達的空間範圍體積。由飛行模擬平台可達工作空間分析之結果，吾人可對於平台之座艙外部設計與防護之配置作一合理之選擇。靈巧工作空間(Dexterous

Workspace)為平台可在規範定義下在所有方向上可到達之空間範圍。所謂具靈巧性之旋轉角度可定義為僅允許角落點 P_i 置於球面 P_i 蓋之上時之可旋轉角度如圖 3 所示。若此球面之直徑為 D ，則 P_i 之靈巧工作空間可由式(8)

表示出。靈巧工作空間分析與脈衝運動及 VR 視效之結合，方可對飛行模擬平台之控制，達到飛行模擬器設計之核心技術部分。

4. 滑動模式控制(Sliding Mode Control)之控制律設計：

考慮一個廣義之二階線性系統，可設計一可變結構之控制律如下：

$$u = \mathcal{E}_1 x_1 + \mathcal{E}_2 x_2 + k_f f(s) ,$$

$$f(s) = \begin{cases} +1 & \text{若 } s > 0 \\ -1 & \text{若 } s < 0 \end{cases}$$

在下面條件下 \mathcal{E}_i 為不連續：

$$\mathcal{E}_i = \begin{cases} \mathcal{E}_i^+ & \text{若 } s.x_i > 0 \\ \mathcal{E}_i^- & \text{若 } s.x_i < 0 \end{cases}, \quad i=1,2$$

令 $s = 0$ 並定義切換線(Switching Line) $s = x_2 + c_1 x_1, c_1 > 0$

如此可使得誤差沿著切換線滑動到原點，修正為零。本計畫之控制系統之方塊圖如圖 4 所示。

5. 虛擬實境系統與飛行模擬平台之整合：虛擬實境軟體在每次的模擬期間，將一連串的“事件”(Events)透過 I/O 界面輸入，在每次模擬的週期之內即時(Real Time)讀取，以減少資料之延遲。隨後所有虛擬物件之位置、形狀、速度等，均會為之更新。

6. 座艙空電系統(Avionics System)整合與人因工程(Human Factor)探討：飛行模擬器需要一個適當之座艙系統以供人員操作之互動界面。在本計畫之設計上，各控制器間之傳輸為 Ethernet，以取代空用匯流排 – MIL-STD-1553 BUS 之功能。座艙空電設計如圖 5 所示。根據美國軍方與太空總署所作的測試結果，人體在連續 20 分鐘的加速運動時間內，約可容忍 2 至 3G，然而隨著運動方向之不同，人體可承受之 G 力又有所不同。一般而言，可忍受能力之程度依序為向前、向後、向左、與向右，其中向前或向後之忍受能力約為向前或向後之忍受能力的兩倍，因此，可將此範圍作為飛行模擬平台控制律中飛行包絡線(Flight Envelope)之限制參考。

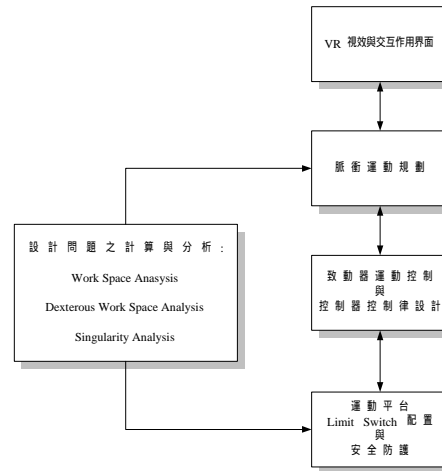


圖 1、飛行模擬平台之設計與分析流程

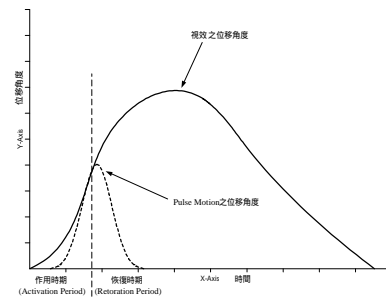


圖 2、脈衝運動與視效之匹配問題

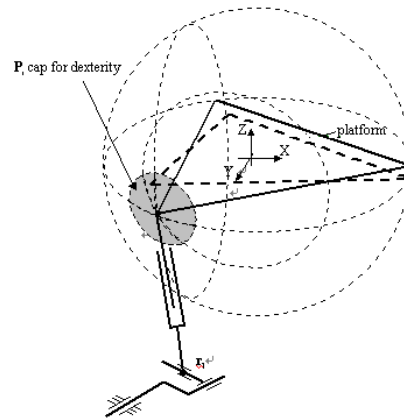


圖 3、靈巧工作空間分析

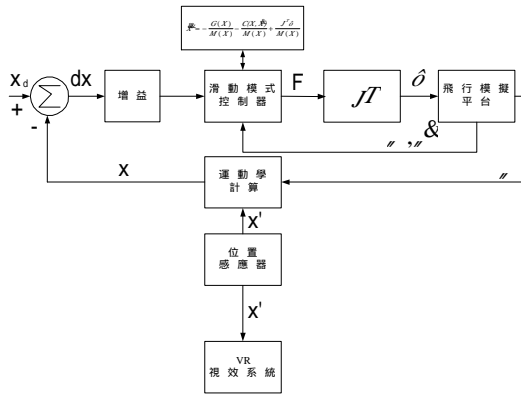


圖 4. 飛行模擬平台控制系統之方塊圖

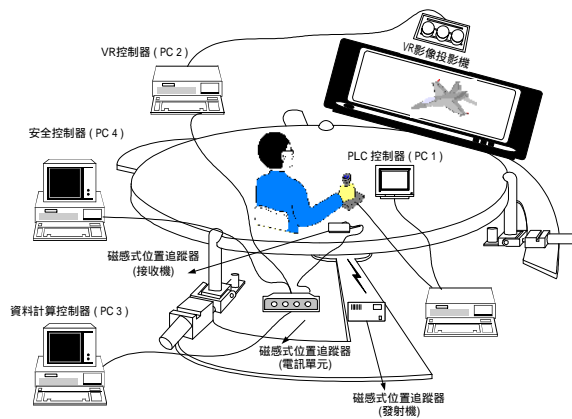


圖 5、座艙空電設計

結論與成果

計畫完成之結論與成果如下：

1. 完成飛行模擬平台之基構設計並提供新的奇異點、靈巧性、工作空間等分析之方法，建立飛行模擬平台即時控制之準則。
2. 達成 VR 即時視覺化顯示方法之研究。
3. 提供脈衝運動分析之結論以及與 VR 視效方面匹配問題之解決方法。
4. 完成飛行模擬平台非線性即時控制之控制律設計與穩定度分析方法。
5. 完成飛行模擬平台與座艙空電

系統與人機介面之整合。

6. 完成感應器所得六自由度之位置、速度、與加速度之分析，以驗證相關理論之正確性。所完成之飛行平台機構如圖 7 所示。

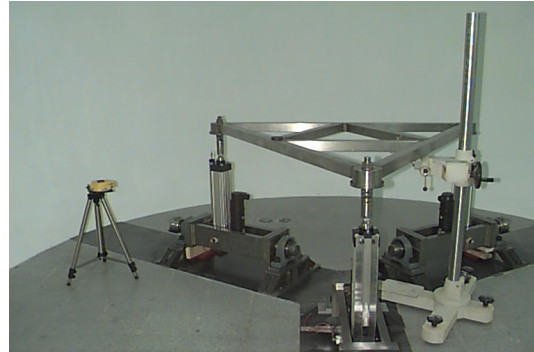


圖 7 飛行平台機構實體

參考資料

- [1] Stewart, D., "A Platform with Six Degrees of Freedom", *Proc. Of the Institute of Mechanical Engineers*, London England, Vol. 80, pp. 371-386, 1965.
- [2] Phillip John McKerrow, *Introduction to Robotics*, Addison Wesley, Chapter 2-5, 1991.
- [3] Craig, J. J., *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, 2nd ed. Addison Wesley, Chapter 8, 1989.
- [4] Yang, Yu-Neng, "Implementation of a Six D.O.F. Forced-Reflecting Teleoperator System with Fully Parallel Master-Slave Manipulators", *PhD thesis for M.E. Dept. of National Chiao Tung University*, Chapter 2, 1996.

- [5] Innocenti, C., and Parenti-Castelli, V., "Direct Position Analysis of the Stewart Platform Mechanism", *Mach. Theory*, Vol. 25, No. 6, pp. 611-621, 1990.
- [6] Kim, D.J.; Chung, W.K.; Youm, Y., "Geometrical approach for the workspace of 6-DOF parallel manipulators", *Robotics and Automation, Proceedings., IEEE International Conference on*, Vol. 4, pp. 2986-2991, 1997.
- [7] Stoughton, R.S.; Arai, T., "A modified Stewart platform manipulator with improved dexterity", *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, Vol. 9, pp. 166 -173, 1993.
- [8] E. F. Fichter, "A Stewart Platform-Based Manipulator: General Theory and Practical Construction", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 5, pp. 157-182, 1989.
- [9] Prabjot Nanua and Kenneth J. Waldron, "Direct Kinematic Solution of a Stewart Platform", *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, Vol. 6, pp. 438-444, 1990.
- [10] U. Itkis, "Control Systems of Variable Structure", *John Wiley & Sons*, 1976, pp1-83, 1976.
- [11] Young, K.D., "Variable Structure Control for Robotics and Aerospace Application", *Elsevier Science Publishers*, 1993.
- [12] Young, K.D.; Utkin, V.I.; Ozguner, U., "A Control Engineer's Guide to Sliding Mode Control", *Variable Structure Systems., VSS '96. Proceedings., IEEE International Workshop on*, pp. 1 -14, 1996.
- [13] Stanley M. Shinnars, "Modern Control System Theory and Design", *John Wiley and Sons*, Chapter 8, 1992.
- [14] John Vince, "Virtual Reality Systems", *Addison Wesley*, 1995
- [15] 劉培森, "3D/VR 市場、應用、技術驅勢", *資訊與電腦*, pp. 93-95, 1996. 10月號。
- [16] H. Huisman; R. P. M. Verhoeven; Y. A. van Houten; E. L. Flohr, "Crew Interface for Future ATM" *Avionics Systems Conference, 16th DASC.*, AIAA/IEEE Volume: 1-22 Vol.2 , pp. 6.3 -33-6.3-40, 1997.
- [17] Cecil Richardson; Michael Schoultz, "Formation Flight System Design Concept", *Digital Avionics Systems Conference, Proceedings., IEEE/AIAA 10th*, pp. 18-25, 1991.
- [18] Robert L. Norton, "Design of Machinery", *McGraw-Hill*, Chapter 7, 1994.