

多功能虛擬實境動態模擬系統

Multipurpose Virtual-Reality-Based Motion Simulator

計畫編號：NSC-88-2213-E-009-114

執行期間：87年8月1日至88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

計畫摘要與目的

工安是目前台灣社會的一個重要課題，其中有關各種載具及機器設備的安全操控，更是各方矚目的重點。為了避免利用在實際環境中以真實載具或機器進行人員訓練或測試所造成之高消費（包括時間、空間及金錢）及高危險性，本計畫將發展一個多功能的虛擬實境動態模擬系統，經由虛擬實境（VR）與運動模擬器的結合，以逼真地模擬實際場景與設備或載具，而協助達到工安所要求的多種訓練與考核任務。本計畫執行期限共計三年，在第一年執行成果中，我們已經初步完成運動模擬器之建構，分析與控制，並已經成功結合各個子計畫的第一年成果，完成虛擬車輛駕訓的工作。本計畫乃以四個子計畫的型式所合力完成，以下分別就各個子計畫所完成的工作做簡要報告（原計畫書中的子計畫二與四，因未獲核准，不列入此報告中）。

子計畫一：虛擬實境動態模擬系統中之力控制與遙控操作

在遙控操作中，觸感對於操作者在處理像是組裝或拿取易碎品等需精巧動作與順應性的工作時，有極大的幫助，也因此受控機

構上，例如機器人，需加裝力感測器來反映當操作者與遠方物件互動時的接觸力，我們也在所建立的遙控機器人系統上配置力回饋搖桿，如此接觸力可直接傳到操作者手上，讓操作者感受到機器人所感受到的，另也已發展力反映策略，以協助操作者進行力的操控，以及處理如延遲效應等在遙控操作中常會遇到的問題。

圖一顯示我們已建立的虛擬實境遙控機器人系統，我們利用分散處理的方式來實現此系統，此乃由於人的手指可以分辨 300Hz 左右的連續力訊號，而在視覺上，30Hz 的更新率對人眼已經夠快了，所以如果以同一迴圈來處理與視覺訊號，龐大的繪圖負載將降低力訊號的頻寬，而低頻寬的力訊號則會導致機器人與堅硬環境接觸時的不穩定性，也會產生不真實的觸感，所以我們以兩部 PC 分別處理視覺與力訊號，在此設計下，力回饋的更新率達到 600Hz 左右。

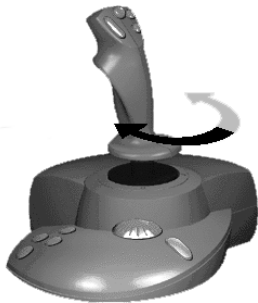
另一方面，為了配合虛擬實境所建立的車輛駕訓模擬，並做為自行開發力回饋搖桿的參考依據，我們購入了由 Microsoft 公司所開發的 SideWinder Force Feedback Pro 搖桿(圖二)，此搖桿為一架構在 Direct X 協定下的輸出入裝置，本身具有一顆 16 Bit、25MHz 的處理器以

及紅外線光學定位系統(Infrared Optical System),所以提供了相當快速且高解析度的位置定位,而力量方面則是由兩顆高精度的馬達來產生 X 軸及 Y 軸兩方向的力回饋。除此之外它還能在 Z 軸方面作小幅度的扭轉,對於某些虛擬場景而言有很大的幫助。

此搖桿提供了四種不同的力場大小以及四種不同的回饋力(彈性),受限於此的關係,並不能做連續性的力呈現,且搖桿所能輸出的最大力不足,在某些情況的模擬下,這將是一個很大的缺點,會使得虛擬場景與真實場景間的相似性降低,而導致操作者感受到錯誤的力訊息。不過由於現階段的虛擬場景為一簡單之車輛駕訓模擬,並無複雜而精確之物理模型,故此搖桿在現接段的應用已是足夠。



圖一：虛擬實境遙控機器人系統



圖二：SideWinder Force Feedback Pro 搖桿

子計畫三：虛擬實境動態模擬系統中之行為轉換及階層式控制

法

在虛擬實境的動態模擬系統中,當虛擬系統接收到控制命令而設法產生應有的運動行為描述時,在虛擬實境的顯示以及在模擬運動平台的運動行為則是要儘可能地模擬並使其有身歷其境的感受,以達到虛擬實境的目的。而為了達到此一目標,上述的運動行為描述必須恰當的轉換給虛擬實境的顯示系統以及運動平台的控制系統。本子計畫是將相關之運動行為提供給顯示子系統,而以階層式的智慧控制概念來追求更高階而抽象之控制目標,也就是說將六軸運動平台的運動控制當成低階控制系統,而我們的系統則是設法設定控制輸入以使運動行為更符合需求。因此第一年的研究中主要的研究為階層式控制器的理論探討及在其中預估器的建立及分析比較。

1.階層式控制器的理論探討

在階層式控制中,我們利用模糊預估器來預估控制輸入之可能結果,並以 ARMA 模式來取代已有模式並且以法則可信度的觀念來決定新法則之建立與更新的控制。由於是線上學習控制,我們以線上即時誤差當偏差(bias)值,這個作法我們已有在發表文獻中獲得效能的驗證。我們也提出二維的觀念,也就是將輸出入分別處理,如此在法則數上可顯著的減少而在誤差的增加上卻較少。同時,我們也運用 tree 的觀念來增加模糊推理的效率。

2.預估器的建立及分析比較

預估器是用來做控制行為之修正。其常需要搜尋才能產生較佳的控制行為。可是對於本子計畫所強調的即時操控訓練系統,保證即時性的反應性能便是一個重要的研究課題,也就

是說如何在有限的時間內有效地搜尋到目前為止最好的控制輸入以及避免無效的處理。這裡我們是以模糊預估器之建立來產生對控制輸入之可能結果並加以評估。而模糊法則庫的模糊控制需要一些比例因子將實際所獲得之資訊，轉入其相對應之陳述空間及由推論結果轉換為明確輸出值。另外為了獲得理想的響應，需依照設定的性能指標，建立一些對比例因子調適之規則，重複調整比例因子，直到其響應符合設定之性能指標。此處所用之模糊性能指標 FPI，其定義如下式所述：

$$FPI = \min(\mu_{MOV}(e_{MOV}), (\mu_{RT}(e_{RT}), \mu_{SE}(e_{SE}))$$

其中 e_{MOV} 表示最大超越量之實際值和目標值的誤差， e_{RT} 表示到達時間之實際值和目標值的誤差， e_{SE} 表示絕對誤差和之實際值和目標值的誤差。調適之完成與否即根據此模糊性能指標 FPI，完成下列之模糊規則 **If** FPI > θ **Then** “Tuning Finish”，其中 $\theta \in [0,1]$ 。

子計畫五：虛擬實境動態模擬系統中之六軸運動平台的智慧型控制

本子計畫可視為整個計畫的控制本體，而負責在虛擬世界中複製真實載具的動態反應。由於六軸運動平台的結構頗為複雜，本子計畫在此計畫進行的第一年中，初步進行了硬體機構分析改良，解決反向運動學及油壓系統等問題，並達到位置控制等目的。另外本子計畫亦負責與其它各子計畫搭配，發展出車輛駕訓之虛擬實境互動環境，以完成第一年整體計畫之目的。

1. 六軸平台硬體機構及其油路分析

首先我們所採用的油壓系統如圖三所示，控制訊號經過閥的放大增益後轉成輸入電流，並控制比例伺服閥的開口和流量大小。其中 F 為負載力的大小， M 是負載的重量，而整個油壓系統的動力來源為一個三相式的交流馬達。而利用流體力學方程式，油壓公式以及牛頓定理，可逐一推論而得所需之油壓缸的動態方程式。接下來我們則假設一些狀態變數並進一步化簡而得如下之系統狀態空間：

$$\dot{X} = AX + B\phi(Av) + v \quad (1.9)$$

$$Y = CX$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-f1}{M} & 0 & 0 & \frac{Dm}{M} \\ -KoKga_1 & \frac{-KoKga_2}{\tau} & -1 & 0 \\ 0 & -\frac{2\beta}{Vt}f1 & \frac{2\beta}{Vt}K & -\frac{2\beta}{Vt}C_l \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

$$v = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \lambda \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \lambda = a_1 X_r + a_2 \dot{X}_r + a_3$$

2. 六軸平台結構之反向運動學分析

我們使用的平台機構如圖四所示，採用兩個座標系統{B}和{P}。對{P}座標系而言，油壓致動器上接點座標為 $P_i = [p_{ix} \ p_{iy} \ p_{iz}]^T$ ，對{B}座標系而言，油壓致動器下接點座標為 $B_i = [b_{ix} \ b_{iy} \ b_{iz}]^T$ 。另外{P}座標系對{B}座標系的旋轉轉換矩陣為：

$$R = \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c\alpha \cdot c\beta & c\alpha \cdot s\beta \cdot s\gamma - s\alpha \cdot c\gamma & c\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma + s\alpha \cdot s\gamma \\ s\alpha \cdot c\beta & s\alpha \cdot s\beta \cdot s\gamma + c\alpha \cdot c\gamma & s\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma - c\alpha \cdot s\gamma \\ -s\beta & c\beta \cdot s\gamma & c\beta \cdot c\gamma \end{bmatrix}$$

則經過適當的座標轉換運算，我們可以得到油壓致動器向量 L_i 為

$$L_i = R \cdot P_i + P - B_i \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6$$

將油壓致動器向量 L_i 取其 norm 值，即可得各油壓致動器的長度。

$$l_i = \| L_i \| \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6$$

因此，我們可以得到逆向運動學的完整解：

$$l_i^2 = x^2 + y^2 + z^2 + r_p^2 + r_b^2 + 2(r_{1p_{ix}} + r_{1p_{iy}})(x - b_{ix}) + 2(r_{2p_{ix}} + r_{2p_{iy}})(y - b_{iy}) + 2(r_{3p_{ix}} + r_{3p_{iy}})z - 2(xb_{ix} + yb_{iy}) \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6$$

3. 六軸平台之位置控制

在控制部份，我們採用的控制結構如圖五所示，首先由軌跡規劃產生所需的空間位置參考訊號 $X \ Y \ Z \ \alpha \ \beta \ \gamma$ ，再利用逆向運動學將空間位置轉換成六支油壓致動器的長度，在此我們同時檢查致動器長度與萬向接頭角度作為系統的保護措施。接著我們透過電腦進入控制迴圈，以完成閉迴路的位置控制。

現階段我們採用控制的法則為 PD-like 型模糊控制器，其控制法則為

IF e_k is A and Δe_k is B THEN u_k is C。

而所設計的規則庫為

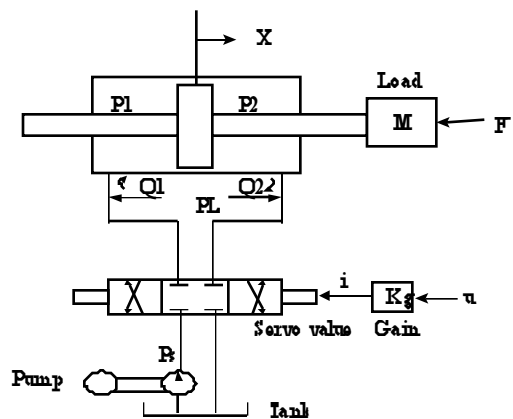
誤差變化 / 誤差量	LN	MN	ZE	MP	LP
LN	SN	SN	LN	MN	SN
MN	SN	SN	MN	MN	SN
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
MP	SP	MP	MP	SP	SP
LP	SP	MP	LP	SP	SP

經過測試(1)步階響應(step response)與(2)梯階響應(ramp response)，獲得不錯的實驗結果，其如圖六與圖七所示。

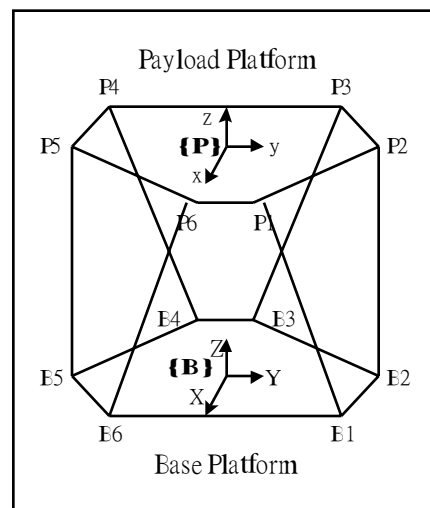
4. 互動式虛擬實境車輛駕訓系統之建立

本計畫在 PC 平台上所發展的虛擬場景，是以 Sense8 所發展的 WTK(World ToolKit

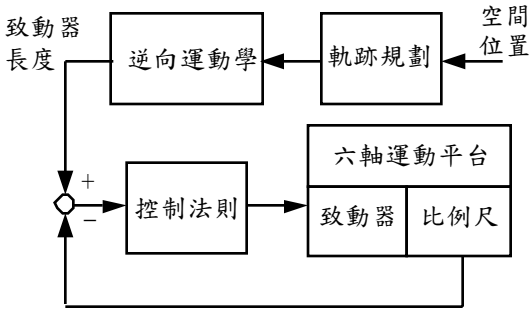
Version 7)為主，物件的製作是使用 3D Studio MAX；地形則是採用 WTK 本身所內附的 Modeler 來完成，最後叫用 WTK 的 API 經由 Microsoft Visual C++ 6.0 將我們所撰寫的 C 程式加以編譯成執行檔。目前我們正積極地製作 PC 下的各種場景，圖八即為目前利用 WTK 發展的車輛駕訓之虛擬實境場景及地形。另外由於本計畫為一整合型計畫，在發展之初，各子計畫都在各自的電腦上執行，為了解決各子計畫的通訊問題，我們採用了 TCP/IP 的通訊協定。



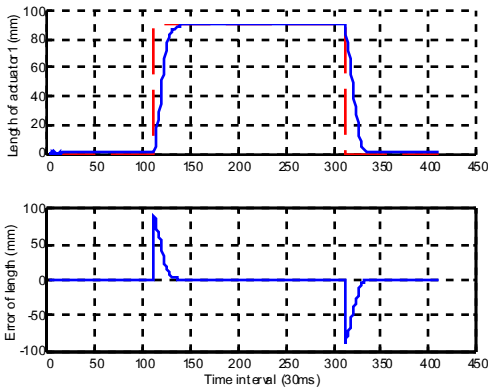
圖三：六軸平台之油壓系統架構圖



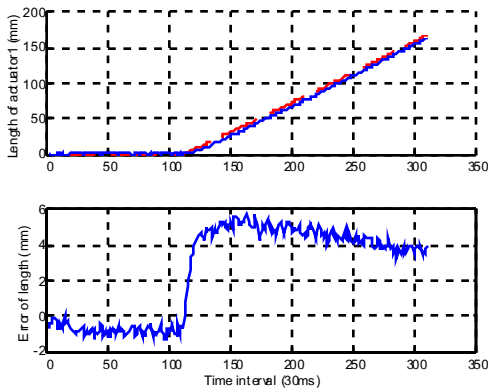
圖四：六軸平台之架構圖



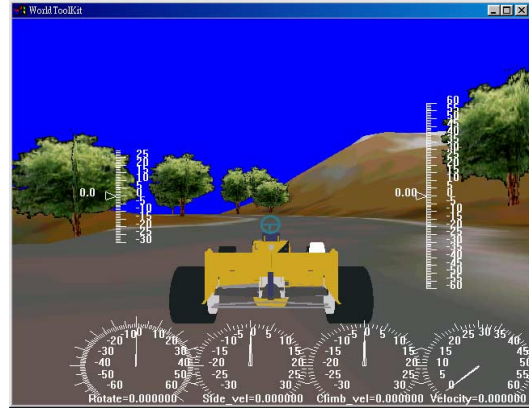
圖五：控制結構圖



圖(六)：Fuzzy PD-like 的 Step Response



圖(七)：Fuzzy PD-like 的 Ramp Response



圖(八)：車輛駕訓之虛擬實境場景

子計畫六：虛擬實境動態模擬系統中之六軸運動平台的影像定位系統研發

六軸平台的控制是一種閉迴路控制，因為由反向運動學可得知，對任一給定之平台姿態，我們可以推導出在該姿態下的六軸長度。但是平台的真實姿態和期望中的平台姿態卻因機械結構的因素，操控延遲或負載改變等等原因而很難達到完全相同。想達到更精確控制，使用閉迴路控制是一種有效的方法。但由於軸兩端是使用萬用接頭來連接基板及平台，依順向運動學的推導，想由已知之六軸長度求得平台的姿態至今仍未有能完全以數學式子表示的解法，只有利用遞迴方式求得的近似解，而這會使控制的效果受到不良的影響。因此，本子計畫利用三組立體取像系統來觀察各軸於平台端的位置。利用其中三個點的座標，我們即可求得該平台之姿態。由於量測必會產生誤差，因此，我們也正著手研發一套校正系統，希望能對立體取像系統作智慧而自動的校正，以使測量誤差降至最低。對於本年度的研究，我們完成下列三項軟體與硬體機制：(1)設計影像追蹤圖樣。(2)完成目標圖樣辨識追蹤。(3)完

成硬體追蹤平台。有了此三項軟體及硬體機制，我們可以達到六軸平台上動態目標圖樣的鎖定追蹤，且對於今後的系統發展及改良奠定了良好的基礎。

1. 影像追蹤圖樣的設計

由於目標的位置為 3D 座標點，所以利用單眼攝影機僅能找出 2D 的座標，故需使用兩台攝影機運用三角定位及攝影機的焦距求出完整的 (X, Y, Z) 座標，再者，取像的同步也是需要考慮的因素，所以我們使用硬體的同步訊號 (Sync) 控制兩台攝影機的快門收放，使兩者同時捕捉同一時刻的目標點的位置，增加定位的準確度。當左右攝影機擷取到影像後，最重要的工作就是要求得的是平台於空間上的姿態。從簡單的幾何圖形知道，空間中獨立的三個點可以決定一平面，因此我們定義平台上選定的三個點為參考點。我們在參考點做上容易辨識的記號，如圖九所示，而我們之所以採用條碼型式的目標圖樣，其原因有三：(1) 其特徵明顯。(2) 可用來模糊偵測。(3) 可預測姿態。

2. 目標圖樣辨識追蹤

由於六軸平台是一個運動機構，所以其上的目標圖樣必隨之運動，故會產生許多不同的型態，我們可以使用特徵圖樣追蹤 EigenTracking 的方式。再利用四種不同姿態的目標圖樣(圖十)當做基本圖樣，而由 Singular Value Decomposition(SVD) 的方式求取圖樣的特徵向量，由此可整合出其姿態的目標圖樣。其主要的判斷方程式如下所示：

$$E(c) = \sum_{j=1}^{n \times m} \rho((e_j - (\sum_{i=1}^t c_i U_{i,j})), \sigma)$$

其中， $E(c)$ 是經由 CCD 所擷取到實際影像向量 e_j 與特徵向量整合後的影像向量 $\sum_{i=1}^t c_i U_{i,j}$ 的誤差函數，而 ρ 函數可用來判定誤差量多寡的依據，最後 $U_{i,j}$ 為目標圖樣特徵向量。由此我們可以找出最符合原始影像的整合化影像，即找出 c_i ，所以可用 $\sum_{i=1}^t c_i U_{i,j}$ 來進行處理。

3. 硬體追蹤平台

圖十一為追蹤系統所使用的平台機制。

現今已完成了硬體的架構及目標特徵圖樣的選取及影像處理的方式，而對於動態目標圖樣之準確度的追求是需要大量的量測及改進