

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-88-2213-E-009-116

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

第一年成果報告：

1. 對於六軸平台硬體機構及其油路分析

首先利用流體力學方程式和油壓公式及牛頓定理來分析油壓缸的一些動態特性，接下來假設一些狀態變數並進一步化簡而得到系統的狀態空間。

1.1 油壓缸動態方程式的推導

我們所採用的油壓系統如圖(1)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。我們可用流體力學方程式，油壓公式以及牛頓定理，逐一推論而得所需之油壓缸的動態方程式。

(1) 流體力學方程式(Flow equation)：

在流體力學中，油壓缸內油的流速和閥的壓力差以及閥的開口面積有關：

$$Q = K A_v \sqrt{P_s - \text{sgn}(A_v) P_L} \quad (1.1)$$

其中 Q 為流速， K 為流體流動常數， P_s 為馬達

提供的壓力， P_L 為負載的壓力， A_v 為閥的開口面積。

(2) 油壓公式：

在油壓缸裡，負載壓力變化量很明顯與油的流速，單位時間內閥的位移量以及油壓缸漏油的情況有關：

$$\begin{aligned} \frac{V_t}{2\beta} \frac{dP_L}{dt} &= Q - f_1 \dot{X} - C_l P_L \\ &= K A_v \sqrt{P_s - \text{sgn}(A_v) P_L} - f_1 \dot{X} - C_l P_L \quad (1.2) \end{aligned}$$

另外在油壓缸系統中，閥的開口面積 A_v 受輸入電流大小的影響：

$$A_v + \dot{A}_v \tau = K_0 I \quad (1.3)$$

又因為輸入電流的大小又受到我們加入控制油壓缸系統之控制器所影響，也就是說控制器所產生的控制量與輸入的電流成比例關係， $I = K_g U$ 。將這關係式代入(1.3)式，則又可得到另一個描述油壓缸的動態特性：

$$A_v + \dot{A}_v \tau = K_0 K_g U \quad (1.4)$$

其中 f_1 為摩擦係數， K_0 為閥的比例常數， C_l 為全部的漏油係數， V_t 為閥和圓柱型致動器的全部內部體積大小， X 為位置的位移量， \dot{X} 為位

置的速度， β 為油的體積彈性係數， I 為輸入電流， Kg 為閥的放大增益， τ 為閥的時間常數， U 為控制器產生之控制量。

(3)牛頓定理：

最後利用牛頓定理，可以求得油壓缸中力、負載壓力、閥移動之加速度及速度間的關係，其如(1.5)式所示：

$$F = M\ddot{X} = DmP_L - f_1\dot{X} \quad (1.5)$$

1.2 狀態空間推導

當我們令 $X_1=X$, $X_2=\dot{X}$, $X_3=Av$, $X_4=P_L$ 為狀態變數時，將(1.2)、(1.4)、(1.5)式整理成如下的系統狀態方程式：

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= \frac{Dm}{M}X_4 - \frac{f_1}{M}X_1 \\ \dot{X}_3 &= -\frac{1}{\tau}X_3 + \frac{KoKg}{\tau}U \\ \dot{X}_4 &= \frac{2\beta}{Vt}KA_v\sqrt{P_s - \text{sgn}(Av)X_4} - \frac{2\beta}{Vt}f_1X_2 - \frac{2\beta}{Vt}C_rX_4 \end{aligned} \quad (1.6)$$

然而因(1.6)式出現一個非線性項，所以為了消除狀態方程式的系統矩陣非線性的特徵，我們令一個非線性函數 ϕ_{LAVL} 來代表之：

$$\phi(Av) = \frac{2\beta}{Vt}KA_v[1 - \sqrt{P_s - \text{sgn}(Av)P_L}] \quad (1.7)$$

另外(1.6)式控制訊號 U ，一般都可以假設與閥之位置移動誤差量以及閥之速度移動誤差量有關，故我們可定義控制訊號 U 如下：

$$\begin{aligned} U &= a_1e + a_2\dot{e} + a_3 = a_1(X_r - X_1) + a_2(X_r - \dot{X}_2) + a_3 \\ &= -a_1X - a_2\dot{X} + (a_1X_r + a_2\dot{X}_r + a_3) \end{aligned} \quad (1.8)$$

其中 X_r 為參考位移值， \dot{X}_r 為參考位移值微分(參考速度)， a_1 、 a_2 、 a_3 為控制訊號相關之常數。

最後將(1.7)式非線性項化簡以及(1.8)式控

制訊號的定義帶回(1.6)式中，則我們可進一步得到狀態空間，如下面(1.9)式所示：

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

$$Y = CX$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{f_1}{M} & 0 & 0 & \frac{Dm}{M} \\ -\frac{KoKg a_1}{\tau} & -\frac{KoKg a_2}{\tau} & -1 & 0 \\ 0 & -\frac{2\beta}{Vt}f_1 & \frac{2\beta}{Vt}K & -\frac{2\beta}{Vt}C_r \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

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

$$v = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \lambda \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \lambda = a_1X_r + a_2\dot{X}_r + a_3$$

其中 v 為常數擾動向量。

2. 推導平台結構在反向運動學的數學分析

我們使用的平台機構如圖(2)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： $B_i = [b_{ix} \ b_{iy} \ b_{iz}]^T$

而 $\{P\}$ 座標系對 $\{B\}$ 座標系的旋轉轉換矩陣為：

$$\begin{aligned} R &= \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c\alpha \cdot c\beta & c\alpha \cdot s\beta \cdot s\gamma - s\alpha \cdot c\gamma & c\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma + s\alpha \cdot s\gamma \\ s\alpha \cdot c\beta & s\alpha \cdot s\beta \cdot s\gamma + c\alpha \cdot c\gamma & s\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma - c\alpha \cdot s\gamma \\ -s\beta & c\beta \cdot s\gamma & c\beta \cdot c\gamma \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.1)$$

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：

$$L_i = R \cdot P_i + P - B_i \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (2.2)$$

接著將油壓致動器向量 L_i 取其 norm 值，即可

得各油壓致動器的長度。

$$l_i = \|L_i\| \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (2.3)$$

因此，我們可以得到逆向運動學的完整解：

$$l_i^2 = x^2 + y^2 + z^2 + r_p^2 + r_B^2 + 2(r_{1p_{ix}} + r_{1p_{iy}})(x - b_{ix}) + 2(r_{2p_{ix}} + r_{2p_{iy}})(y - b_{iy}) + 2(r_{3p_{ix}} + r_{3p_{iy}})z - 2(xb_{ix} + yb_{iy}) \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (2.4)$$

3. 針對平台作位置控制：

在控制部份，我們採用的控制結構如圖(3)所示，首先由軌跡規劃產生所需的空間位置參考訊號 $X_1 Y_1 Z_1 \alpha_1 \beta_1 \gamma_1$ ，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。接著進入控制迴圈，經由電腦透過數位轉類比卡將訊號轉成六個Channel的類比訊號，再經過油壓驅動卡去控制六軸動感平台。在回授部份，是透過線性比例尺將六支油壓缸的長度偵測出來，透過類比轉數位卡轉成數位訊號送往電腦作閉迴路的控制。目前我們採用位置控制的法則如下：

3.1 適應性 PI 控制 (Adaptive PI Control)

傳統的PI控制器對於油壓系統，容易造成超越量及衝量過大。因此將PI控制器作適應性的調適。如圖(4)所示， P_r 是設定的目標點， V_r 是控制輸出的量， P_1, P_2 調整三個區間的比例。

我們在設計適應型PI控制器時首先我們會有一組經過實驗經驗的PI值，並且在設定的目標點和下一個目標點之間作控制的調適，使整個區間分為三個部分，加速區，等速區，和減速區。其中加速區和減速區是作線性加速和減速。如此可以讓每兩個設定目標點間經過先遞增速度後等速進行最後再遞減速度，以改善油壓系統響應的超越量和衝量。

3.2 模糊控制 (Fuzzy Control)

現階段我們正在規劃使用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。

在規則庫設計部份，我們將考慮三種狀況：

- (1) 我們使用的油壓缸可以作雙向運動並藉由輸入電壓的正負號來改變運動方向，所以我們在設計規則庫時採用對稱性的方式。
- (2) 當誤差量為大(Large)的時候，其誤差變化量影響甚小，而我們為了簡化規則庫，所以不考慮誤差變化量的大小，其激發量皆為大(Large)。
- (3) 當誤差量為小(Small)，誤差變化量為反方向的時候，為了避免油壓系統產生過大的超越量，因此設其激發量為零(Zero)。

我們所設計的規則庫如下：

誤差變化量 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

表(31) 模糊控制器規則庫

3.3 實驗結果

我們針對Adaptive PI型控制器與PD-like模糊控制器作比較與分析。

(1) 步階響應 (step response)

Adaptive PI控制器的rise time約為1.5秒，而PD-like控制器的rise time約為0.9秒。即PD-like模糊控制器擁有較快的步階響應。

如圖(5)和圖(6)所示。

(2) 梯階響應 (ramp response)

Adaptive PI 控制器梯階響應的誤差量約為 PD-like 控制器的 2 倍。明顯地 PD-like 模糊控制器也擁有較佳的梯階響應。如圖(7)和圖(8)所示。

4. 平台軌跡規劃

我們使用軌跡規劃模式的動作原理為：事先設定一些平台位置姿態的通過點及其所需的通過時間，再經由內插法以產生各通過點間的位置姿態，如此我們即可得到一組平滑連續的平台軌跡。

其中我們使用三次多項式 (Cubic polynomials) 的內插法來產生各通過點間的位置姿態，其數學式及一次微分式如下：

$$P(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (4.1)$$

$$\dot{P}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \quad (4.2)$$

式中 $P(t)$ 為在時間 t 時的平台位置姿態， $\dot{P}(t)$ 則為時間 t 時平台位置姿態的速度。為了簡化問題，我們假設初始和最終通過點的速度為零，而中間各通過點的速度以(4.3)式計算得到。

$$\dot{P}(t_i) = (P(t_{i+1}) - P(t_{i-1})) / 2T = V_i \quad (4.3)$$

式中 $P(t_{i+1})$ 和 $P(t_{i-1})$ 分別為在 t_i 前一時刻和 t_i 下一時刻的平台位置姿態，而 T 則為各通過點間的時間間隔。再配合各個通過點的位置姿態為事先知道，我們可以得到(4.1)式和(4.2)式的四個限制條件如下。

$$P(t_0) = P_0, \quad P(t_f) = P_f \quad (4.4)$$

$$\dot{P}(t_0) = V_0, \quad \dot{P}(t_f) = V_f$$

其中 P_0 和 P_f 分別為時刻 t_0 和 t_f 時的位置姿

態，而 V_0 和 V_f 則分別為對應的速度。將此限制條件(4.4)式代入(4.1)式和(4.2)式中並解之，我們即可解得三次多項式的各係數表示式(4.5)。

$$\begin{aligned} a_0 &= P_0, \\ a_1 &= V_0, \\ a_2 &= \frac{1}{t^2} (3P_f - 3P_0 - V_f t - 2V_0 t), \\ a_3 &= -\frac{1}{t^3} (2P_0 - 2P_f + V_0 t + V_f t). \end{aligned} \quad (4.5)$$

5. 輸入裝置 3D 搖桿

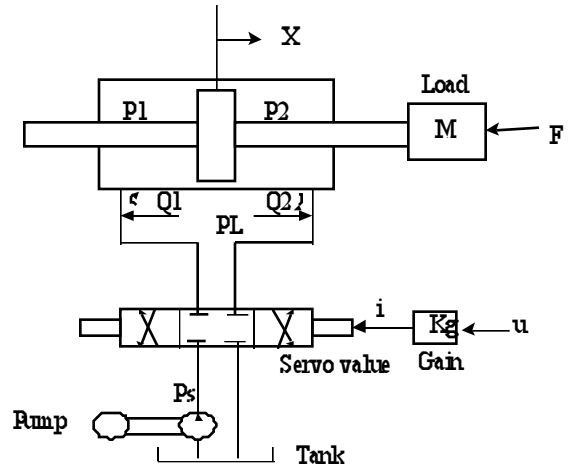
為了配合虛擬實境所建立的飛行模擬，並做為自行開發力回饋搖桿的參考依據，我們購入了由 Microsoft 公司所開發的 SideWinder Force Feedback Pro 搖桿(圖 9)，此搖桿為一架構在 Direct X 協定下的輸出入裝置，本身具有一顆 16 Bit、25MHz 的處理器以及紅外線光學定位系統 (Infrared Optical System)，所以提供了相當快速且高解析度的位置定位，而力量方面則是由兩顆高精度的馬達來產生 X 軸及 Y 軸兩方向的力回饋。除此之外它還能在 Z 軸方面作小幅度的扭轉，對於某些虛擬場景而言有很大的幫助。

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飛行模擬，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。

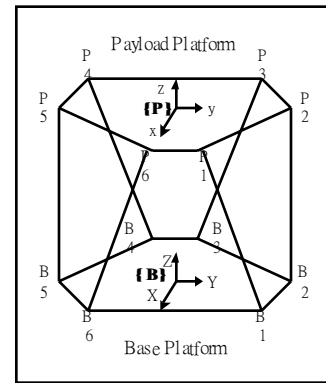
6. 互動式虛擬實境賽車系統的建立

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。執行檔被叫用時就會一一將程式內所設定要讀入的物件及地形放入場景內，如圖(10)。當執行檔完成後，叫用該執行檔就會進入一個主迴圈內(每個 frame 執行迴圈一次)直到按下結束鍵結束場景為止。目前我們正積極地製作 PC 下的各種場景，圖(11)即為目前利用 WTK 發展的場景及地形。

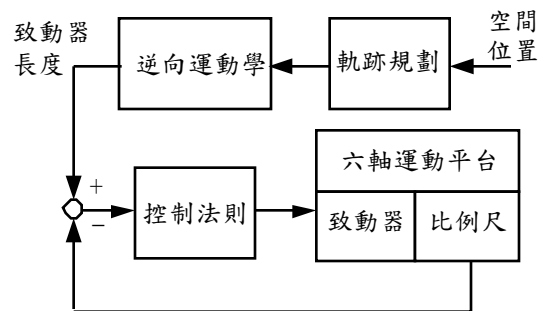
由於本計畫為一整合型計畫，在發展之初，各子計畫都在各自的電腦上執行，為了解決各子計畫的通訊問題，我們採用 TCP/IP 的通訊協定。TCP/IP 在 IRIX(或 UNIX)及 Windows NT/98 作業系統下，都有標準的系統函式(也就是所謂的 socket)支援；DOS 下雖然沒有提供系統的標準函式，但是我們找到由 Erick Engelke 及其他志願者所共同發展 DOS 下的 TCP/IP 連線函式庫 Waterloo TCP(簡稱 WATTCP)。



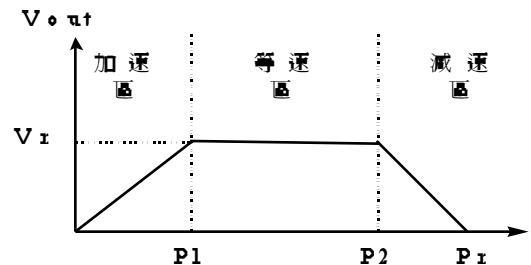
圖(1)油壓系統架構圖



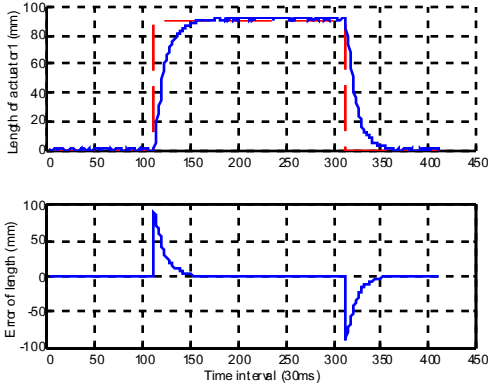
圖(2)平台機構



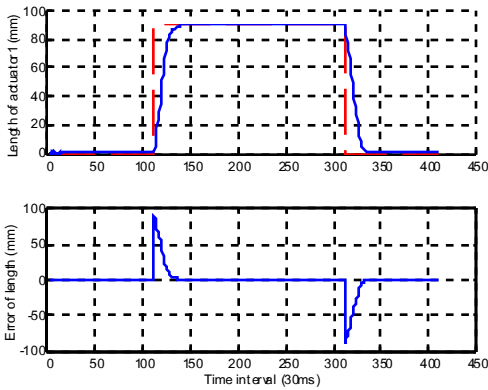
圖(3)控制結構圖



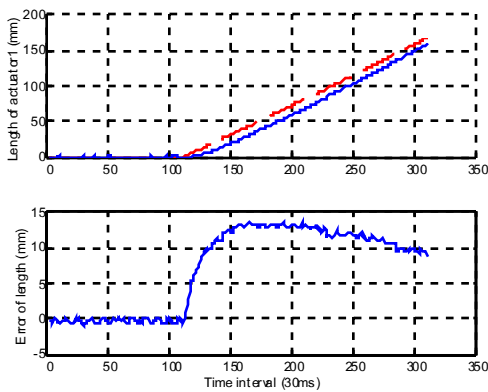
圖(4)適應性PI 控制器區間圖



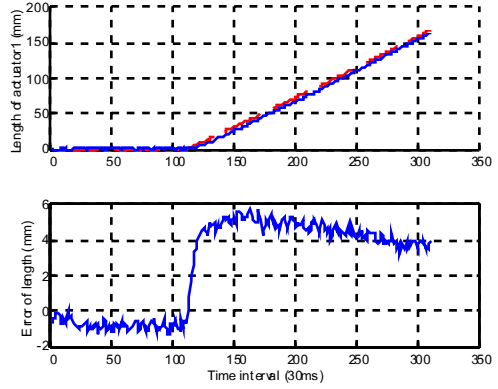
圖(5) Adaptive PI 的 Step Response



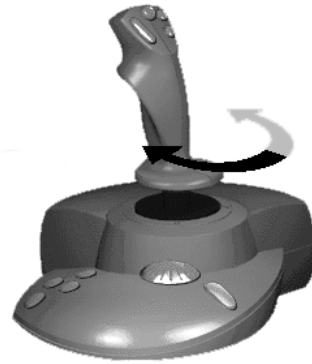
圖(6) Fuzzy PD-like 的 Step Response



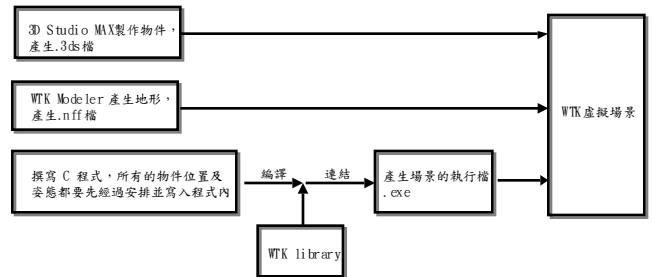
圖(7) Adaptive PI 的 Ramp Response



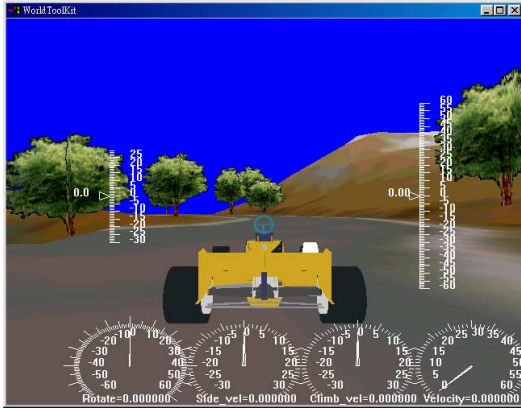
圖(8) Fuzzy PD-like 的 Ramp Response



圖(9) SideWind Force Feedback Pro



圖(10) 虛擬場景發展流程示意圖(WTK)



圖(11) WTK 所建賽車於環形道路內之場景