

[illegible]

計畫主持人：陳義男 教授
共同主持人：吳聰能 副教授

- ☐赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☐出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐國際合作研究計畫國外研究報告書一份

中 華 民 國 89 年 9 月 30 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

力回饋搖桿與虛擬實境之整合研究

Study on the Integration of Force-Feedback Joystick and Virtual Reality

計畫編號: NSC89-2212-E-002-030

執行期限: 88年8月1日至89年7月31日

主持人: 陳義男教授 臺灣大學造船及海洋工程研究所

共同主持人: 吳聰能副教授 臺灣大學造船及海洋工程研究所

一. 中文摘要

虛擬實境技術為使用者提供了一個最自然的人機互動模式，尤其近來利用虛擬實境取代傳統的實際訓練已成為一種趨勢。一個成功的虛擬實境系統，除了提供視覺效果及聲音外，若能夠給予使用者觸感與力感上的感受，則整個架構會更加完整，本計畫利用阻抗控制及數值方法，設計以液壓為動力來源之力回饋操縱桿，來模擬操縱飛行模擬器時真實的力量回授，並整合影像系統，為使用者提供一結合視覺、觸覺之訓練環境。

關鍵字：虛擬實境、力回饋搖桿、電液伺服控制

Abstract

Virtual Reality (VR) offers a natural interaction between users and machines. In recently it is a trend that we use VR to instead of real training. Besides the vision and sound, if VR can give us the feeling of force, it will be a more successful system. In order to construct a complete VR system, We try to design a hydraulic force-feedback joystick. The aim of this research is to integrate 3-D vision and force feedback, and offer users an environment of virtual reality.

We use the impedance control theorem and numerical method to design a controller for the control of joystick. And we apply this device in the flight simulator to simulate the force feedback of the joystick. So people can interact with the virtual world that is similar to the true world.

Keywords: virtual reality, force-feedback joystick, electro-hydraulic servo control

二. 計劃緣由與目的

近年來虛擬實境(VR; Virtual Reality)技術發展地非常快速，而以虛擬實境取代傳統實際訓練已經成為一種趨勢。所謂虛擬實境技術，即是藉由虛擬的影像、聲音及力感等來營造出一個虛構的空間，讓操作者融入這個模擬的環境中，產生身歷其境的感覺。目前虛擬實境技術偏重在虛擬影像及音效，而在力感方面則較缺乏，所以本計畫擬設計一個力回饋操縱桿，來模擬一些操作虛擬實境時的感覺，讓操作者不僅在螢幕上能看到影像，同時也能感受到和真實情況相同的力感。

目前所有的力回饋裝置，多偏重於使用馬達為其動力來源，雖然馬達有著較方便的使用性，但對於想要模擬一些較特殊的情況，譬如因碰撞的影響而使操縱桿將使用者的手拉回之效果，或是模擬操控系統本身的阻抗很大的情況時，應用液壓伺服系統會是一種較好的選擇，因為液壓系統的高力重比特性，可使我們輕易達到這些特殊的效果，也可將模擬的範圍擴大。

本計劃設計的力回饋操縱桿具有單一自由度，其動力來源是由操縱桿底部藉由 Y 接頭與操縱桿連結的液壓缸所提供，當液壓缸作動時，操縱桿也會隨著作單自由度的運動，主要的設計概念是將使用者對操縱桿所施力量的大小，經由控制電腦運算，得到一個相對應位置的值，然後對液壓缸做位置控制，而達成使用者與系統間的互動情形，簡單來說，目的就是將力量的訊號轉換成位置的訊號。

三. 控制系統

在電腦與電液伺服系統間以類比/數位轉換器(AD/DA converter)作為橋樑，以目前在市面上的類比數位轉換卡來說，大多可做到每秒 10K 以上的取樣速度，所以設計的重點在於控制程式應間隔多久作取樣並輸出，以達到我們的要求。

由 Shimoga 對於手所能感測之訊號頻寬之研究中指出，20-30Hz 為手部能對力的訊號做出感應的極限，所以，為了使力回饋裝置能做擬真且平順的動作，控制部分必須以 100Hz 以上的速度做同步運算輸出，且為了避免雜訊對系統產生先天不穩定之情況，我們將超過 30Hz 的訊號做濾波處理。

除此之外，因為操縱桿是由人來操作，因此，使用者本身也會改變整個系統的動態。

四. 阻抗控制原理

A. 人機阻抗

阻抗控制(impedance control)的觀念首先由 Hogan 所提出，此法提供一個位置與力量間動態的關係，稱之為目標阻抗，此目標阻抗為一二階常微分方程，系統之模型如圖 1。

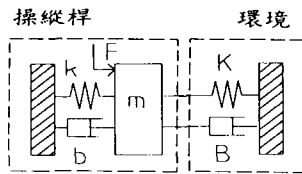


圖 1 操縱桿系統與環境之模型

假設操縱桿的等效質量(mass)為 m ，剛性(stiffness)為 k ，黏滯性(viscosity)為 b ，初始位置 $x = 0$ ，目前位置 x ，手對力回饋操縱桿所施的力為 F ，環境對操縱桿的反作用力為 F_e ，其動態方程式如下：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F - F_e \quad (1)$$

其中我們將反作用力以剛性 K 和黏滯性 B 取代，且環境產生作用之位置為 x_e ，所以操縱桿的反作用力 F_e 可以表示如下：

$$F_e = K(x - x_e) + B \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

由(1)式與(2)式可知，當系統和環境的阻抗(m 、 b 、 k 、 B 、 K)為已知的時候，則(1)式可簡化成二階常微分方程，所以我們就可以利用數值方法來近似求得二階常微分方程的解 x ，只要求出這個解，我們就可以得知操縱桿應被推至什麼位置，也可以對油壓缸做位置控制。

B. 位置控制

我們利用四階的 Runge-Kutta method 來近似求得二階常微分方程的解，然後再利用求出的位置對油壓缸做位置控制，但在此之前，必須先要保證油壓缸的位置控制很準確且響應夠快，否則模擬的結果會失真及失去意義。這裡我們利用高速應答比例閥放大器中內建的比例放大器對油壓缸做位置控制，放大器本身從電位計抓取位置訊號做回授，形成一位置控制架構。

我們將力感測器量測到的訊號直接乘上一個倍率後，將所得的結果對液壓缸做位置控制，由實驗結果圖 2 可知，當我們的手隨意操控操縱桿時，力感測器所感測到手所施的力量和操縱桿所表現出的位移量幾乎相當，因此我們不用再自行設計控制器，也確定利用數值方法求解並對液壓缸作位置控制之可行性。

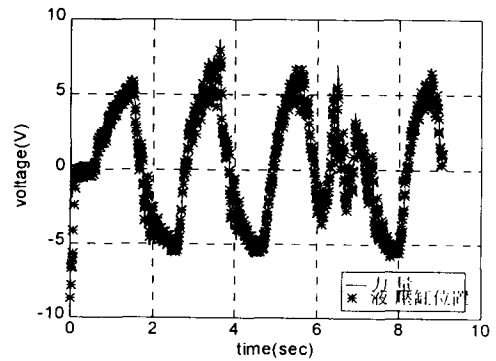


圖 2 位置控制

五. 穩定性分析

力回饋操縱桿之控制系統中操縱桿的質量為 m ，黏滯性為 b ，剛性為 k ，系統之回饋力之信號為 u ，忽略放大器和量測器及雜訊的影響，信號的取樣週期為 T ，且控制信號為零階取樣，虛擬環境的轉移函數為 $H(z)$ ，並假設操縱者可以用任意被動的阻抗 $Z_0(s)$ 來取代，並暫時忽略與環境接觸時，位置訊號單向的限制，由充分

性與必要性的分析中，最後可得一簡單的關係式如下：

$$b > \frac{KT}{2} + B \quad (3)$$

因此，由(3)式可以得到一個系統與虛擬環境之參數關係式，而我們利用此一條件，即可避免系統產生不穩定的情況。

六. 力回饋操縱桿與虛擬實境系統整合

系統整合示意圖如下：

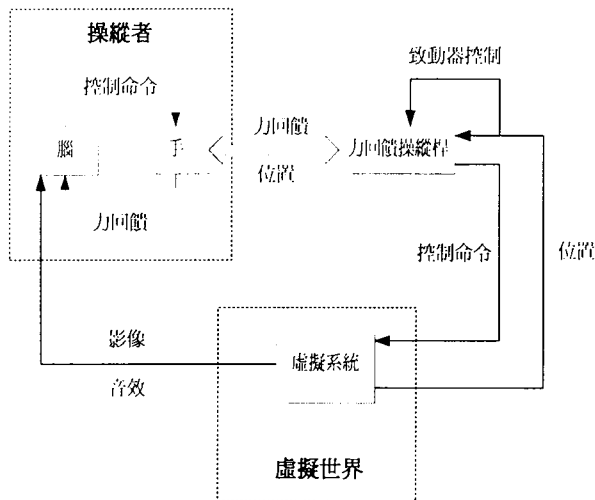


圖 3 系統整合示意圖

力回饋操縱桿在此同時為虛擬實境系統之輸入、輸出裝置，當使用者下達命令時(操作操縱桿)，力回饋操縱桿控制系統將使用者的輸入傳達給虛擬實境系統，而虛擬實境系統也同步對操縱桿控制系統輸出我們在虛擬環境中的狀態，控制系統即可利用此資訊計算所需之力量回饋，再將其反應給使用者，如此不斷的重複進行，直到將程式結束，以下我們將力回饋操縱桿與虛擬實境系統結合。

虛擬實境的軟體部分主要分成兩部分，一部份為虛擬環境中之場景之建構，包括了模型的放置、地形建構及材質貼圖等，另一部份為畫面上所呈現影像變化的模擬，譬如在操控飛機時，操作者所看到的影像變化，本研究利用套裝軟體 Power Render 作為虛擬實境之程式開發工具。

目前來說，採用分散式架構，利用多部電腦各自負責影像、音效、儀器控制等任務，PC

間並以 RS232 或 Ethernet 做資料傳輸交換已成為發展虛擬實境的一種趨勢，系統需求量高的部分可用較高階的電腦，系統需求量低的部分則使用低階的電腦，以降低成本，提高整體效率，但相對的也會衍生出資料傳遞的問題。由於液壓伺服系統的速度高且響應快，為保持電腦輸出信號的平滑度，免讓使用者操作起來有一格一格的感覺，高速且即時的資料傳遞是為很重要的關鍵。

對一個虛擬實境系統而言，各個運作程序間訊息的傳遞可分為三類：狀態更新(state update)、動作命令(command)及事件發生(event)，各有其不同的傳遞方式。狀態更新用於對虛擬環境中物體的監控，或是物體控制程序將物體的狀態傳送出去給其他程式作更新本身參數的動作。動作命令下達後，必須經由接收者確認後回應，以進行下一動作命令。事件發生則由編寫事件庫來觸發，並啟動處理程序。

本研究採用 Ethernet 作為傳輸介面，Ethernet 為多對多的傳輸介面，且傳輸速率高達 3k Bytes/sec，雖然較為複雜，但比起傳輸速率 130Bytes/sec，且傳輸方式必須為一對一的 RS232 而言，則較為適當且具有擴充性。

七. 結論

本研究設計一結構簡潔的力回饋操縱桿作為模擬操縱之用，並依機構特性設計模擬的方法且討論在不同狀況下之適用性，並完成一虛擬實境之系統架構，實現使用者與虛擬實境間之互動。本研究獲得以下之結論：

- (1) 由力平衡方程式及由阻抗的觀念來看，力量和位置的關係是同時存在的，並且在虛擬實境中，各個物體和使用者之間的互動關係，主要是以操縱桿的位置為資訊，所以本研究利用位置控制簡化較繁雜的力控制，而同樣能夠給予使用者操作時的擬真感及力量回饋，達到與虛擬實境之互動與模擬的需求。
- (2) 本研究所實做的力回饋操縱桿，較一般的力回饋裝置能提供更大範圍的力量回饋，因此可應用的範圍也更廣，並可以因不同的需求設計不同的操控感。
- (3) 利用力回饋裝置來增強影像上的感受，效

果比單獨使用任一部分要好且逼真。

- (4) 利用數值方法對二階常微分方程求解，因為方法本身具有疊加性，所以能降低雜訊對系統的影響，並使操作平順。

參考文獻

- [1] Pelletier, Doyon, “On the Implementation and Performance of Impedance Control on Position Controlled Robots” , Proceedings IEEE Conference on Robotics and Automation, pp.1228-1233, 1994.
- [2] 蔡武男, “建構虛擬實境所需之觸覺回饋裝置”, 國立台灣大學資訊所碩士論文, 1994.
- [3] Chris Egerter, “Power Render User’s Manual Version 2.6” , 1998.
- [4] Grigore Burdea, Philippe Coiffet, “Virtual Reality Technology” , John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [5] Ken Pimentel, Kevin Teixeira, “Virtual Reality-Through the New Looking glass” , McGraw-Hill, 1993.
- [6] R.A. Earnshaw, M.A. Gigante, H. Jones, “Virtual Reality Systems” , Academic Press, 1994.