

# 國科會國防科技專題研究計畫成果報告

## 力感量測研究

### Control Loading Measurement and Analysis

執行期限：91 年 1 月 1 日至 91 年 12 月 31 日

計畫編號：NSC 91-2623-7-032-002

執行單位：淡江大學航空太空工程學系

計畫主持人：蕭照焜

計畫參與人員：王崇明、胡舜傑

#### 摘要

本研究設計一個可以量測及分析飛行操縱桿反應之力感量測系統，及探討分析飛機操縱桿之力感動態數學模式，以作為飛行模擬器力感模擬控制系統設計及精進之參考，提高模擬器之力感真實度及訓練之效率。同時也可提供飛機力感系統維修之重要參考。

**關鍵詞：**力感系統、力感模擬器、非線性系統鑑別、飛行模擬器

#### 1、前言

飛行員透過飛行操控桿操控飛機，飛機飛行時，飛行員會因不同飛行環境及姿態感受到不同的操縱反作用力。為了逼真的模擬飛行狀態，模擬器之設計都包含一個模擬操縱反作用力的力感模擬控制系統，以增加飛行員感受真實飛機之操控力感，增進學習效益。

目前國內力感模擬控制系統之設計都是著重在力感機構、力感控制律、及伺服迴路控制等【1, 2, 3, 4】。此等力感模擬控制系統所產生之操縱反作用力需求是參考靜態的控制負載曲線。靜態的控制負載曲線缺乏動態資訊，無法以科學的方法來評估模擬之真實度，只能盡可能的調整控制系統以期接近真實之操縱感覺。

國外之典型相關研究包括【5, 6, 7, 8】。在【5】中介紹被動式側向操縱桿（一般用於先

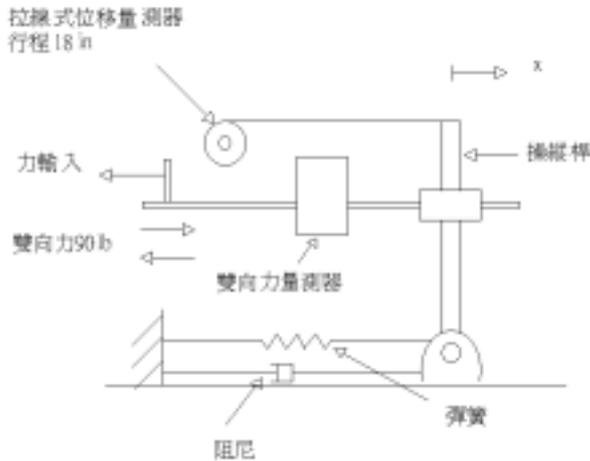
進飛機之操空系統）和主動式側向操縱桿之設計原理，並在動態飛行模擬器中，依據多種類型的實驗條件下，分別在被動式側向操縱桿和主動式側向操縱桿進行實驗，比較兩者之間的差異。在【6】中介紹 Honeywell 公司利用主動式操縱桿控制器技術研發完成一套側向操縱桿控制器，提供與傳統機械連桿飛機相同的動作、力量和視覺的提示，並且與線傳飛行控制系統相容。

控制負載之動態資訊必須在飛機上實際量測，本計劃設計發展了一套包含軟硬體完整之力感量測系統，並量測實際飛機（直昇機）及模擬器之操縱力感反應，建立靜態之控制負載曲線及操縱桿行程之動態反應，及簡易之阻尼分析。其動態模式我們用二階之 mass-spring-damper 系統來描述。

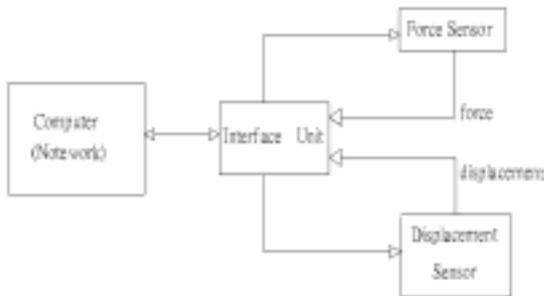
#### 2. 力感量測系統設計

執行操縱力感模式分析須有一套穩定可靠的力感量測系統。目前我們所設計之力感量測系統，量測機構及介面示意圖如圖一及圖二所示。量測機構主要包括模擬操縱桿機構、夾具、推拉力桿、力感測器及位移感測器。模擬操縱桿機構，如圖三，目的在支援量測系統及夾具之設計用，可調且穩固的固定飛行操縱桿，目前只採用單一方向，也就是 pitch 的方向（也可用來量測 yaw 方向），底部利用萬向接頭而操縱桿利用鋁管及把手模型。推拉力桿

提供量測試驗時之施力，方便力量之量測。力感測器需能準確穩定的量測操縱桿之反應，此反應包括靜態及動態，因此，力感測器之動態反應速度需夠快，才能準確的量測操縱桿之動態反應，往後的動態分析也才有意義。



圖一、力感量測機構示意圖



圖二、力感量測介面示意圖



圖二、力感量測模擬操縱桿機構

在力感量測之介面設計上，是以筆記型電腦之介面為原則，以方便在飛機上執行量測。力感測器（load cell）及位移量測器（電阻尺）所量測到的信號透過一個類比數位介面將信號送給電腦處理分析顯示。為了準確的量測位移及力的訊號，類比數位轉換器之解析度希望至少是 12 位元以上，在分析及顯示之軟體上，使用廣為工程設計人員所使用的 MATLAB 環境，介面控制卡我們採用俊原科技的 DSP FPGA 卡，但是其 A/D 為 10bits，需增加其解析度（可加一 16bits 之 A/D 卡），此卡作業環境需在 Windows 98 系統下，此外 DSP FPGA 卡直接透過 RS232 與電腦連接，並可以在 MATLAB 及 C 環境下使用，在此加上 16bits 之 A/D 卡，輸入及輸出訊號皆為 -10~10V。

設計完成之人機操作介面如圖四。進行數據擷取時，系統會先執行初始值數據擷取以確定數據擷取的正確性，接者才開始數據擷取，包括位移及力量的量測，都可即時的看到反應，同時位移及力量的關係圖也會顯現。最後將所擷取道的不同資料，在 Offline 的狀態下作分析及畫圖。



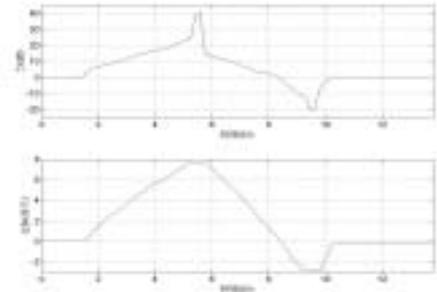
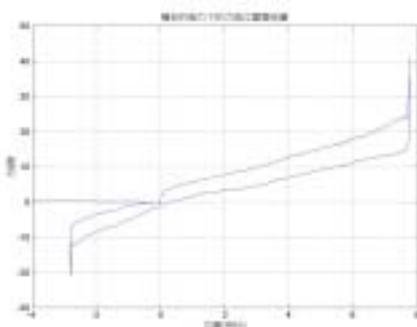
圖四、人機操作介面

### 3. 線上測試

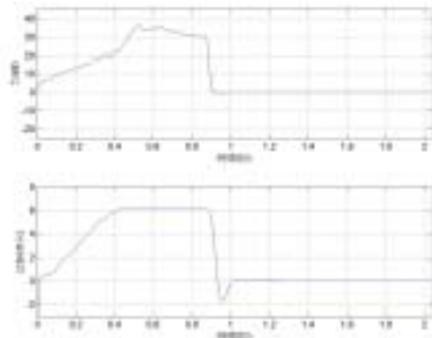
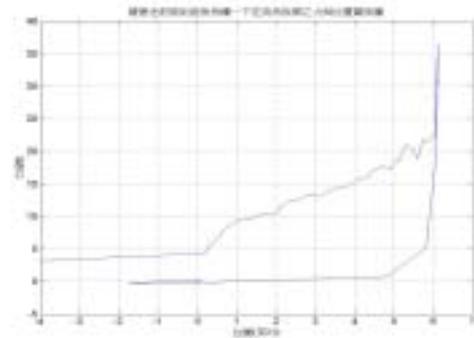
力感量測系統設計驗證完成後，在中科院的協助下先後完成了三次的線上測試，包括台東 F-5E 飛行模擬器、台南直昇機，及高雄岡山迷向機飛行模擬器。

#### 台東 F-5E :

F-5E 飛行模擬器量測結果如圖五、六所示。圖五為穩定施力下完成操縱桿行程之情形，觀察其力對位移的變化，及力與位移對時間的反應。圖六則是為了觀察其動態反應所執行之測試。



圖五、F-5E 飛行模擬器在穩定施力下完成操縱桿行程之結果

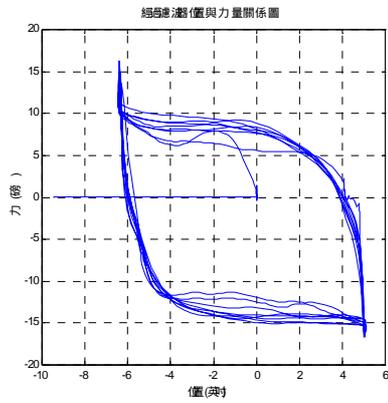
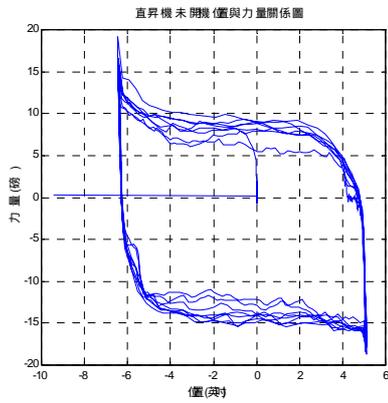


圖八、F-5E 飛行模擬器操縱桿動態反應量測

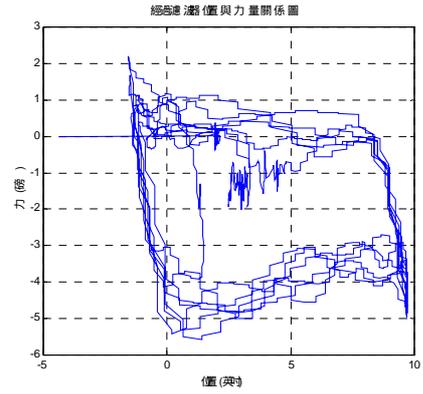
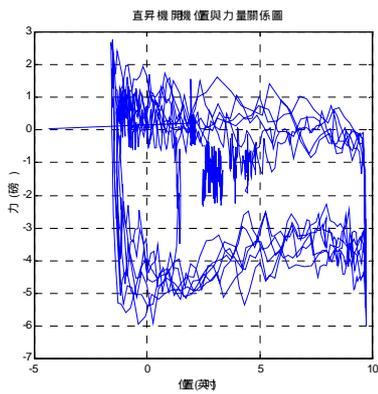
#### 台南直昇機 :

直昇機上實際進行測試，直昇機開機時會有很大震動跟噪音，所以會量到很多雜訊，因此我們利用簡單的二階 Butterworth Filter 來

將雜訊消除。圖七及八為直昇機未開機與開機時之實際量測結果。



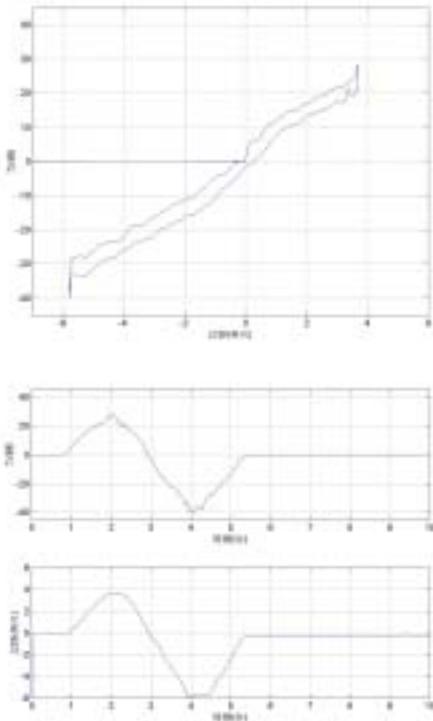
圖七：直昇機未開機之量測結果



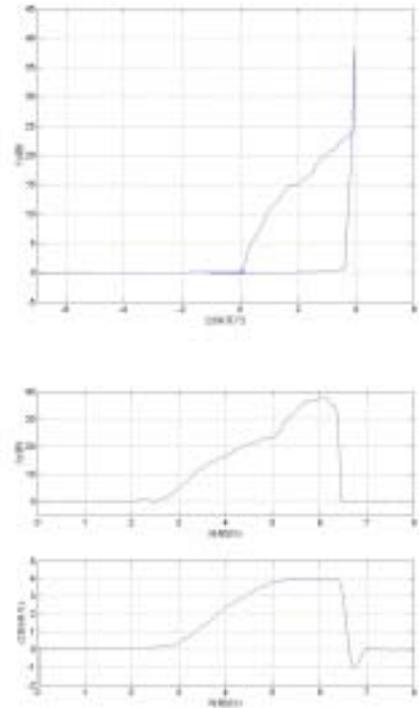
圖八：直昇機開機之量測結果

高雄岡山迷向機：

圖九與圖十為在高雄岡山實際量測迷向機之結果。圖九為操縱桿行程穩定施力下來回一次之結果；圖十為操縱桿推到底持續一下後放開之結果，其目的為觀察其動態反應。



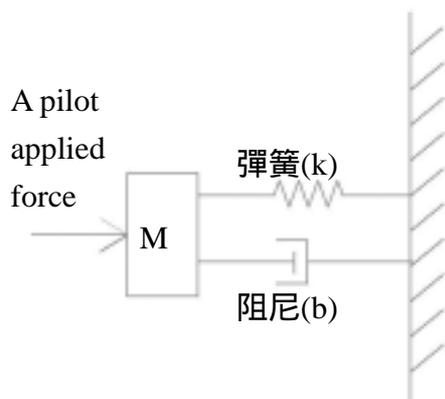
圖十：迷向機操縱桿行程穩定施力下來回一次之結果



圖十：迷向機操縱桿動態反應量測

#### 4. 系統鑑別

從前面線上測試之結果，我們以最簡單的 mass-spring-damper (如圖十一) 二階動態系統模式來分析。我們以迷向機之測試結果執行系統識別



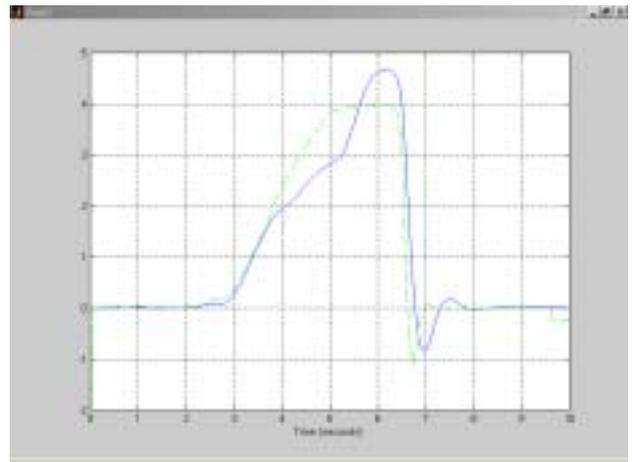
圖十一：二階動態系統模式

識別系統最後的目的就是希望能以一組參數值能來描述出各種操作行程，而最終我們發現

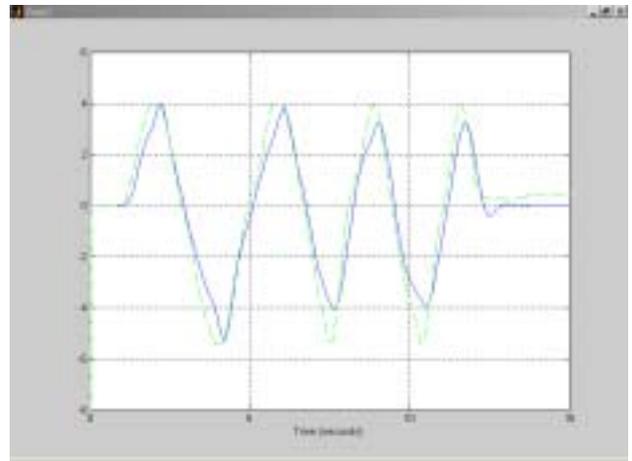
當行程為 ” 穩穩推到底靜止一下再放開 ” 時，其  $M=31.9$  ,  $B=198.5$  ,  $K=1423.7$  最能代表此力感系統，此時動態模式為

$$31.9\ddot{x} + 198.5\dot{x} + 1423.7x = f$$

其中位移為公尺，力為牛頓，其阻尼系數為 0.46。所識別出來的參數值最能描述各種行程之圖形。圖十二及十三為量測數據與二階動態模式之比較。



圖十二：穩穩推到底靜止一下再放開



圖十三：以正常操作速度完成行程數次

#### 5. 結論

本研究設計一個可以量測及分析飛行操縱桿反應的力感量測系統，及探討分析飛機操縱桿之力感動態數學模式。此力感動態數學模式我們以最簡單的

mass-spring-damper 二階動態系統模式來分析,此結果可以作為飛行模擬器力感模擬控制系統設計及精進之參考,提高模擬器之力感真實度及訓練之效率。同時也可提供飛機力感系統維修之重要參考(飛機操縱力感系統每半年需作一次調較)。此二階之 mass-spring-damper 模式雖然可以相當程度的來描述此力感系統,但無法表現其非線性的特性。我們在下階段將研究發展適合非線性力感模式的系統鑑別分析法則。

#### 參考文獻：

1. 林琮瑜, “操縱桿之設計與其在飛行模擬器之應用”, 國立成功大學電機工程研究所碩士論文, 1996
2. 林敬涵, “力回饋操縱桿與虛擬實境之整合研究”, 國立台灣大學造船及海洋工程研究所碩士論文, 1999
3. 周立人, “結合虛擬實境與機器人之遠端操控系統:力感之呈現與操控”, 國立交通大學電機與控制工程學系, 1998
4. 周淑娟, 國立中興大學碩士論文, 1999
5. R. J. A. W. Hosman, B. Benard, and H. Fourquet, “Active and Passive Side-Stick Controllers in Manual Aircraft Control”, Proceedings of 1990 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics Conference, pp.527-529, Nov. , 1990
6. J. W. Hegg, M. P. Smith, L. Yount and J. Todd, “Features of Active Sidestick Controllers”, IEEE/AIAA Digital Avionics

Systems Conference, 13<sup>th</sup> DASC pp.305-308, Oct., 1994.

7. L. A. Bimal and E. J. Donald, “Effect of manipulator and feel system characteristics on pilot performance in roll tracking”, AIAA Guidance, Control, and Flight Dynamics Conference, AIAA Paper 88-4326-CP, 1988
8. B. W. McFadden and John G. Joas, “Accurately Reproducing Pilot's Control Forces in a Flight Simulator”, AIAA 78-1585, 1978.