

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

撓性機械臂端點在拘束面上之位置及接觸力控制 Modeling and Hybrid Position/Force control of Flexible Manipulators

計畫編號：NSC 89-2213-E-002-085

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：袁 京 國立台灣大學機械系

計畫參與人員：柳良義 台大機研所研究生

陳仕芳 台大機研所研究生

一、中文摘要

本計畫由分佈參數模式觀點探討撓性機械臂端點在拘束面上的位置及接觸力控制。在單桿撓性機械臂端點之接觸力控制方面，本研究採用虛擬接觸力的概念克服了輸入（關節扭矩）與輸出（端點接觸力）間為非最小相位的難題，並利用應變及關節加速度回授使系統轉換成passive，如此則再利用簡單的PD控制即可達成控制所有無窮多撓性模態之目的。此時虛擬接觸力已可追蹤設定之希望接觸力軌跡，而真實接觸力也將漸近逼向希望之接觸力軌跡。至於多桿撓性機械臂端點在拘束面上之位置及接觸力控制方面，本研究採用輸入／輸出回授線性化的控制策略，利用虛擬端點位置的概念找出系統內部零動態特徵值皆落在虛軸上之條件，如此則再利用撓性臂之內潛阻尼及外在空氣阻尼即可達成消除所有無窮多撓性模態餘振之目的。上述構想已成功應用到接觸力控制，定位控制，及軌跡追蹤的控制問題上。此時真實的端點位置也將隨同虛擬端點位置而逼近希望追蹤之軌跡。

關鍵詞：受拘束撓性機械臂、分佈參數模式、位置與接觸力控制

Abstract

This article considers the question of position and force control of flexible manipulators on a constraint surface from the

viewpoint of distributed parameter modeling. For the case of force control of constrained one-link flexible arms, a physically correct linear distributed parameter model is derived. The concept of virtual constrained force is introduced in order to overcome the difficulty associated with the non-minimum phase nature of non-collocated control. It is found that the marginal minimum phase transfer function relating the joint torque to the virtual constrained force can be rendered passive by using either the root strain feedback or the joint acceleration feedback. For the non-collocated passive transfer function, a PD controller suffices to stabilize the overall system. On the basis of the above proposed approaches, the desired contact force trajectory of the endpoint on the constraint surface can be tracked effectively by the virtual constrained force as well as the actual constrained force. As for the position and force control of three-link elastic robotic systems on a constraint surface, a nonlinear distributed parameter model is derived. The input-output feedback linearization approach is adopted. A virtual endpoint position and the actual endpoint constraint force are used as the outputs such that the feedback linearizing control gives rise to marginal stable zero dynamics. With the introduction of internal material damping and external air damping, the residual vibration of all elastic

modes can be suppressed. The approach are applied effectively to contact force control, point-to-point position control, and trajectory tracking control with the endpoint remaining on the constraint surface at all time.

Keywords: Constrained Elastic Robots, Distributed Parameter Model, Position and Force Control

二、緣由與目的

當撓性機械臂之端點在一拘束面上工作時，由於關節之輸入扭矩與端點之位置與接觸力輸出間為非共點關係，因此屬於非最小相位系統。由於撓性機械臂為無限維系統，在非共點控制下會產生無窮多右半平面之零點[1]或具有不穩定之無限維的零動態。基於此一原因，機械臂端點在拘束面上之位置及接觸力控制常易導致系統的不穩定性[2]或構成穩定但頻寬甚小的系統[3]。為克服上述困難，利用無限維的分佈參數模式去掌握完整的零點及零動態可能是突破問題瓶頸的重要關鍵。惟目前文獻中尚未發現有關這方面的研究。本研究之目的乃是朝此方向進行初步的瞭解。

本研究利用分佈參數模式探討了二個子題。第一個研究子題為單桿撓性機械臂之端點在拘束面上的接觸力控制。由於描述此一系統的分佈參數模式為線性常係數偏微分方程組，因此可藉轉移函數(irrational transfer function)的無窮多零點及無窮多極點去設計控制器。第二個研究子題為三桿(末桿為撓性桿)撓性機械臂端點在拘束面上之位置及接觸力控制。由於描述此一系統的分佈參數模式為非線性偏微分方程組，藉由輸入/輸出回授線性化所產生之內部零動態仍然為無限維的偏微分方程組。此一零動態必然會影到控制器之設計。

三、結果與討論

以下就二個子題的主要研究結果分別列述於后：

(一) 單桿撓性機械臂端點之接觸力控制 (示如Fig 1a)

1. 由關節扭矩至真實接觸力間之轉移函數 $G_{fu}(s)$ 在右半平面上有無窮多個零點。

2. 由關節扭矩至虛擬接觸力間之轉移函數 $G_{fd}(s)$ 的所有無窮多個零點皆座落在虛軸上，但 $G_{fd}(s)$ 未必是passive。

3. 利用撓性臂根部之應變回授可使 $G_{fd}(s)$ 中有限數目的極點與零點構成passive系統。

4. 利用關節加速度回授可使 $G_{fd}(s)$ 之所有無窮多個極點與零點構成passive系統。

5. 上述passive系統可藉簡單PD控制器達成控制真實接觸力之目的(見Fig.1b)。

6. 相較於類似的研究[4]，本研究採用了合乎物理意義的運動方程式，且將所有無窮多個撓性模態納入控制器之設計中。部分數值模擬結果示如Fig.1c-1d。

(二) 三桿撓性機械臂端點在拘束面上的位置與接觸力控觸 (示如Fig.2a)

1. 推導出含重力效應的非線性分佈參數模式。(目前文獻中相關問題[5,6]的討論仍局限於模態展開法的有限維動態模式)。

2. 若選擇關節扭矩為輸入而撓性臂端點之真實位置及真實接觸力為出，則由輸入/輸出回授線性化所導致的內部零動態其無窮多個特徵值皆座落在右半平面。

3. 若選擇關節扭矩為輸入而撓性臂的虛擬端點位置及真實接觸力為輸出，則由輸入/輸出回授線性化所導致的內部零動態其無窮多個特徵值可全部移轉到虛軸上。Fig.2b中 k_1 與 k_2 分別為撓性臂端點變形量在旋轉面內與旋轉面外的加權係數。分析結果顯示 $k_1 \leq 0.93$ 及 $k_2 \leq 1.2$ 為使系統達成最小相位的充要條件。此一結果已納入撓性臂之無窮多模態。(目前文獻中相關研究[5,6]僅考慮最低二個模態的情形，因此其所獲結果無法保證接近真實狀況。)

4. 利用撓性桿之內潛阻尼(internal

damping)與外在的空氣阻尼可以迅速將餘振消除。

5.上述控制策略已成功地應用到定點之接觸力控制，點與點間之定位控制，以及兼具運動與接觸力的軌跡追蹤控制。Fig.2c-2g為部份軌跡追蹤的數值模擬結果。

四、計畫成果自評

以上的研究結果大致符合原研究計畫的內容，且已達成預期目標。第一個研究子題已撰寫成期刊論文[7]，且已投稿送審中。第二個研究主題的內容已大致完成[8]，目前正整理撰寫期刊論文中。

五、參考文獻

- [1] D. Li, 1990, "Tip-Contact Force Control of One-Link Flexible Manipulator: an Inherent Performance Limitation," Proc. 1990 Amer. Contr. Conf., pp.697-701.
- [2] B. C. Chiou and M. Shahinpoor, 1988, "Dynamic Stability Analysis of a One-Link Force-Controlled Flexible Manipulator," J. of Robotic Systems, Vol.5, pp.443-451.
- [3] J. K. Mills, 1992, "Stability and Control Aspects of Flexible Link Robot Manipulators During Constrained Motion Tasks," J. of Robotic Systems, Vol.9, pp.935-953.
- [4] F. Motosuno and S. Kasai, 1998, "Modeling and Robust Force Control of Constrained One-Link Flexible Arms," J. of Robotic Systems, Vol.15, pp.447-464.
- [5] W. Yim and S. N. Singh, 1995, "Inverse Force and Motion Control of Constrained Elastic Robots," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.117, pp.374-383.
- [6] W. Yim and S. N. Singh, 1995, "Sliding Mode Force, Motion control, and Stabilization of Elastic Manipulator in

the Presence of Uncertainties," J. of Robotic Systems, Vol.12, pp.315-330.

- [7] K. Yuan and L. Y. Liu, "Force Control of a Constrained One-Link Flexible Arm via Distributed Parameter Modelling," submitted for publication.
- [8] 陳仕芳, "受拘束三桿撓性臂之力量與運動控制", 國立台灣大學機械工程研究所碩士論文, 民國八十九年十二月。

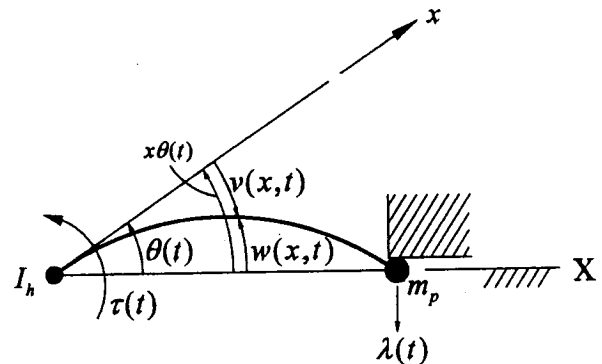


Fig 1a. 受拘束之單桿撓性機械臂示意圖

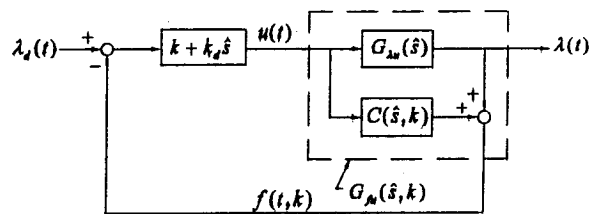


Fig 1b. 控制策略示意圖

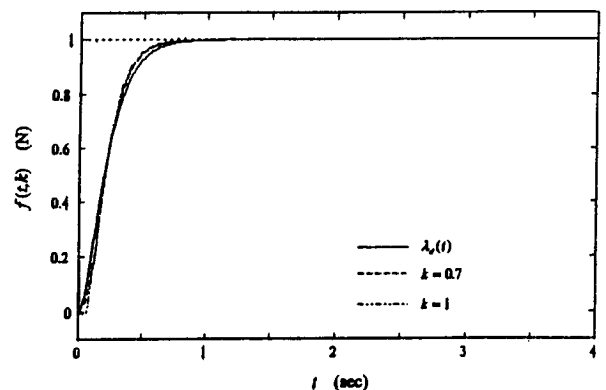


Fig 1c. 虛擬接觸力(\$k=0.7\$)與真實接觸力(\$k=1\$)

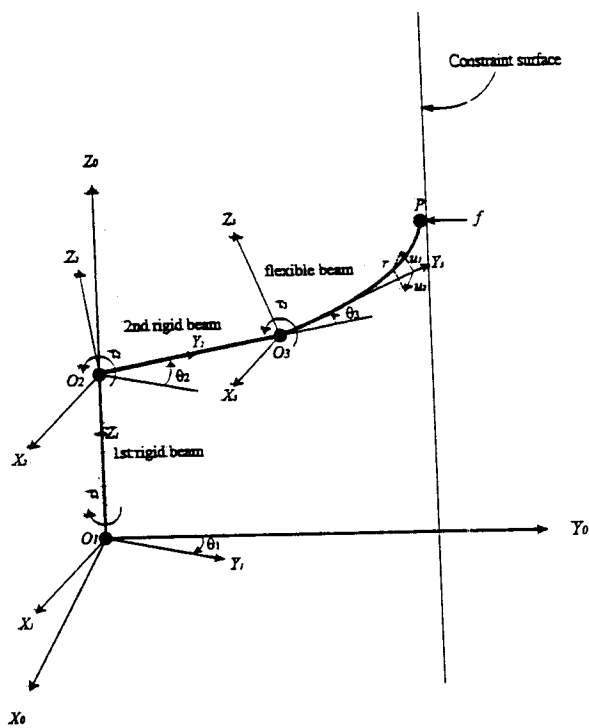


Fig 2a. 受拘束之三桿撓性機械臂示意圖

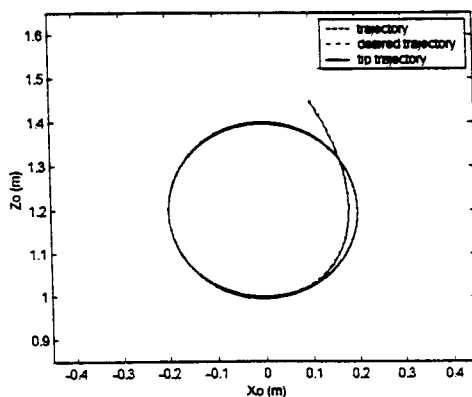


Fig 2d. 軌跡追蹤之路徑時間響應

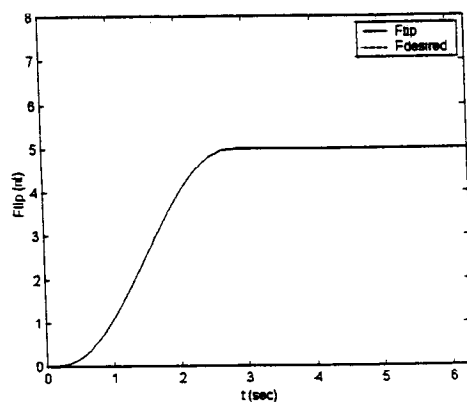


Fig 2e. 軌跡追蹤之接觸力時間響應

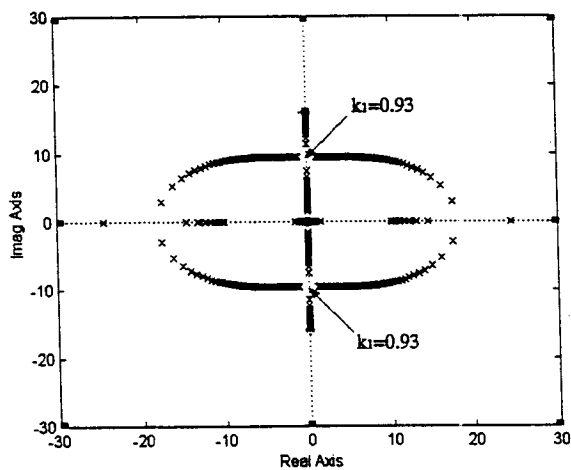


Fig 2b. 零動態特徵值的根軌跡(in-plane)

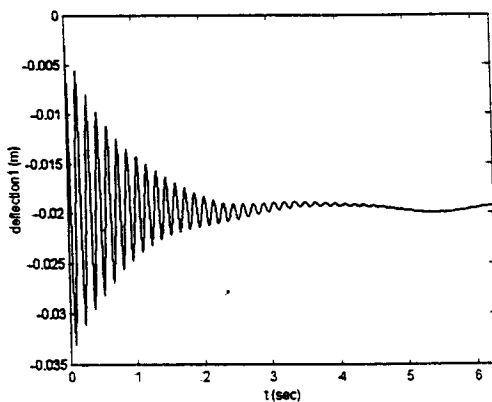


Fig 2f. 軌跡追蹤之端點變形量(in-plane)

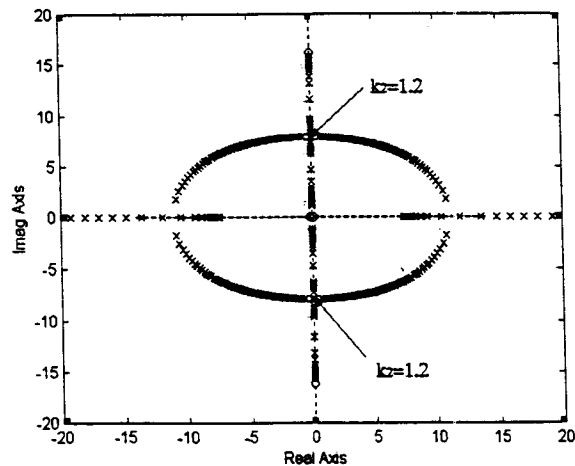


Fig 2c. 零動態特徵值的根軌跡(cut-of-plane)

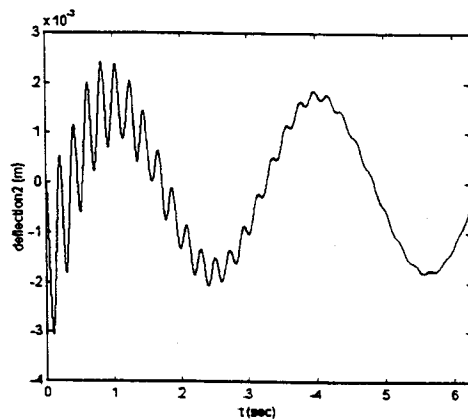


Fig 2g. 軌跡追蹤之端點變形量(out-of-plane)