

# 具動感觸覺裝置之二軸機器人 在虛擬實境之應用

藍天雄<sup>1</sup> 許桂樹<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 德霖技術學院機械工程學系副教授

<sup>2</sup> 高苑技術學院自動化工程學系助理教授

## 摘要

因應工業界的需要，在危險度高且複雜的環境或因體力有限的操作者操作下，及工作過程必需仰賴操作者的智慧與感覺的配合來執行時，操作者必須與機器結合共同完成，而操作者與機器結合須經由介面裝置。因此，本文提出一人機介面裝置，應用於虛擬實境之模型以動力回饋裝置模擬拍球的觸覺感受，以達到人類手臂可受覺虛擬物體的存在。系統主要組成包含了使用者介面、動態模擬與機器人控制系統。使用者介面是結合虛擬環境與視覺繪圖介面而完成的。操作者握住把手操控虛擬環境中的虛擬拍子，在模擬過程當中，操作者感受到在虛擬環境中虛擬工具與虛擬物體接觸時產生的力量與動作。並由實驗結果驗證，在虛擬環境之模型中，動力回饋之特性能使操作者更能真實感受到其外在力量。

關鍵詞：虛擬實境；動感回饋；遠端操控；動態模擬

## Virtual Reality Application of a Haptic 2D Robot

Tian-Syung Lan<sup>1</sup> and Kuei-Shu Hsu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor

Department of Mechanical Engineering De Lin Institute of Technology

<sup>2</sup> Assistant Professor

Department of Automation Engineering Kao Yuan Institute of Technology

## Abstract

Virtual reality systems are used for restricted environments with the senses of the real behaviors from the task based on the interface of operator s and machines through artificial intelligence. In this paper, we present a new type of telerobotics with haptic virtual reality (VR) approach for simulating hitting ball with force feedback attached to human arm. The main components of the approach include user interface, simulation, and robot control scheme. The control scheme employs the dynamical controller that is designed by considering the force from the operator imposed on the paddle, and the force from the environment imposed on the paddle and feedback to the human arm. Experiments for virtual environment on hitting a virtual ball system are used to validate the theoretical developments.

Keywords: *Virtual Reality; haptic feedback; remote control; dynamic simulation*

## 壹、前言

隨著電腦高速地發展，動態模擬的應用更為廣泛，諸如電腦動畫、機器手臂動作模擬、電腦遊戲、虛擬實境亦不例外。在虛擬實境中，使用者與虛擬環境之間的即時互動是相當的重要。這之間的互動，不單只是由使用者直接的力量輸入來達成，而且還包括了在虛擬環節部分對虛擬物體的直接碰觸。為了使在與虛擬物體接觸時的動態模擬更加的真實，一般而言，都會將力量或是觸覺加入動態模擬裡。在虛擬環境裡，環境動態模式模擬出與虛擬物體互動所產生的力量，透過動感回饋裝置，令人感受到和虛擬環境之間的交互作用。結合視覺回饋，可以使這樣的系統增添更多的真實性。

也因為虛擬實境的特性，能夠透過動感回饋裝置使一連串的數學型態的物理模式擬真化。不管是工程上、學術研究上或是娛樂等各方面，都大量地應用虛擬實境。許多訓練裝置，如飛行員飛行模擬訓練裝置，藉由電腦創造出的虛擬空間不僅沒有不當操作引起的危險，也不需要支付真實教練機的維護經費。同樣地應用在工具機的切削模擬，不用承擔機台或刀具損壞的風險，亦可減少耗材消耗量。運用虛擬實境技術所開發的訓練裝置，是非常理想的教學訓練裝置。

一般而言，理想的動感回饋裝置必須具備低摩擦力、低慣性、高靈敏度、高頻寬等特性，實際上，這樣的要求似乎是不可能的。絕大部分所謂的動感回饋裝置，幾乎都有利用力量感測器的訊號來驅動機器人。而利用力量感測器量測外在的接觸力，經由類比數位轉換，產生機器人位置命令而推動機器手臂。

其中 Her 與 Hsu [1] 提出二軸動感回饋裝置應用於虛擬實境的設計與分析，模擬黏土的切削。一般最常見的虛擬環境都是以彈簧阻尼所構成的，而本文模擬的環境與 Yoon 和 Ryu [2] 之虛擬牆壁相當的類似。虛擬實境是動感回饋裝置的許多應用之一，要研究討論動感回饋裝置在虛擬實境中的應用，不免要參考動感回饋裝置在其他方面的應用，如遠端操控 [3, 4, 5] 與人力放大器 [6]。

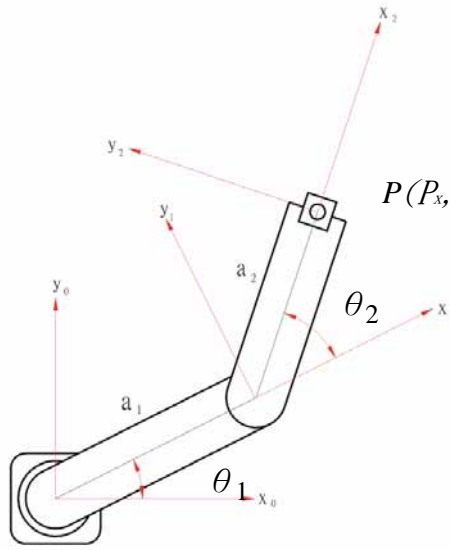
本文以平面二軸機器手臂作為虛擬實境系統中的動感回饋裝置。機器手臂致動器採用直接驅動 AC 伺服馬達。以持拍擊球的動態行為當作是虛擬的環境。使用者透過動感回饋裝置與虛擬環境產生交互作用，動感回饋裝置回饋適當力量給操作者，讓操作者感受到一真實的力量知覺。整個虛擬實境系統如圖一所示，透過即時繪圖動畫，操作者自己決定以什麼樣方式來拍球。依不同的拍球方式，會有不同的力道感覺。當然，拍得愈用力，拍出去的球速也愈快。



圖一、 虛擬實境系統示意圖

## 貳、機器人系統

本研究以平面二軸機器人，作為實現虛擬實境的動感回饋介面裝置。這個實驗用的機器人系統，包含了硬體組成、機器人之運動學、機器人之逆運動學與控制器設計。



圖二、二軸直接驅動機器人系統

在圖二中，分別定義了基座、連桿 1 以及連桿 2 上的座標系統。 $\theta_1$  為基座座標系與連桿 1 上座標系之夾角， $\theta_2$  為連桿 1 座標系與連桿 2 上座標系之夾角。 $a_1$  為連桿 1 之桿長， $a_2$  為連桿 2 之桿長。由幾何關係可獲得機器手臂末端在基座座標系上的位置  $P(P_x, P_y)$ ，表示如下：

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

連桿 2 座標系上的向量  $f(f_x, f_y)$ ，在基座座標系上可表示為  $F(F_x, F_y)$ ，則

$$f = ({}^0R_2)F \quad (3)$$

$$F = ({}^0R_2)^{-1}f \quad (4)$$

其中  $({}^0R_2)$  是連桿 2 上的座標系對基座上的座標系之旋轉矩陣，

$${}^0R_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$({}^0R_2)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ -\sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

利用以上的關係，將固定在連桿 2 的力量感測器所量測到的  $f(f_x, f_y)$ ，轉換成絕對座標上的  $F(F_x, F_y)$ 。

機器手臂的工作目標是定義在直角座標上，所以逆運動學的推導是必要的。上述運動學是由角度得到位置，逆運動學則由位置反求角度。由(2)式整理成(7)式

$$\cos \theta_2 = \frac{P_x^2 + P_y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2} \quad (7)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{P_x^2 + P_y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2}\right) \quad (8)$$

$$k = \frac{P_x^2 + P_y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2} \quad (9)$$

當  $|k| > 1$ ，(8)式沒有實數解，位置已經超出機器手臂的運動空間；當  $|k| = 1$ ，(8)式重根，機器手臂剛好完全伸展或收縮；當  $|k| < 1$  時，(8)式有兩個實數解，機器手臂呈現的姿態可能上彎或下彎。在一般的情況之下，如果  $\theta_2 = \theta_2^*$  為其中一解，那麼  $-\theta_2^*$  亦成立，其中  $\pi \geq \theta_2^* \geq 0$ 。既然  $\theta_2$  已求得，故可由(2)式以合角公式整理成(10)式與(11)式，解出  $\cos \theta_1, \sin \theta_1$ 。

$$a_1 \cos \theta_1 + a_2 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2) = P_x \quad (10)$$

$$a_1 \sin \theta_1 + a_2 (\cos \theta_1 \sin \theta_2 + \sin \theta_1 \cos \theta_2) = P_y \quad (11)$$

以  $\cos \theta_1, \sin \theta_1$  為未知數，將(10)式與(11)式整理成(12)式與(13)式，

$$(a_1 + a_2 \cos \theta_2) \cos \theta_1 - (a_2 \sin \theta_2) \sin \theta_1 = P_x \quad (12)$$

$$(a_2 \sin \theta_2) \cos \theta_1 + (a_1 + a_2 \cos \theta_2) \sin \theta_1 = P_y \quad (13)$$

由(12)式與(13)式聯立解出  $\cos \theta_1, \sin \theta_1$

$$\cos \theta_1 = \frac{P_x(a_1 + a_2 \cos \theta_2) + P_y a_2 \sin \theta_2}{a_1^2 + a_2^2 + a_1 a_2 \cos \theta_2} \quad (14)$$

$$\sin \theta_1 = \frac{-P_x a_2 \sin \theta_2 + P_y(a_1 + a_2 \cos \theta_2)}{a_1^2 + a_2^2 + a_1 a_2 \cos \theta_2} \quad (15)$$

(15)式和(14)式相除得到(16)式，

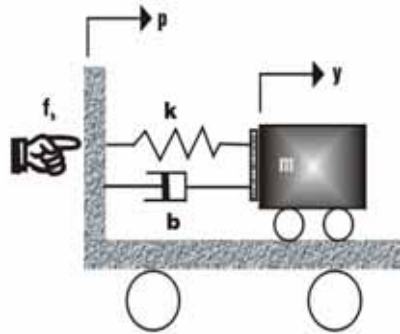
$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1}\right) \quad (16)$$

則  $\theta_1$  是由  $\theta_2$  解出之唯一解。

## 參、虛擬實境

虛擬環境包含了主要的三個物件，拍子（主動物件）、球（被動物件）、牆壁（被動物件）還有一些環境參數，如彈性係數跟阻尼係數。當然，虛擬環境中的兩個主要物件球跟拍子，拍子的動作跟據機器手臂的末端位置來決定，球的狀態則會受拍子影響。而我們的目標是讓人感受到拍子跟球之間的受力。所以暫不假設球拍的質量，單就球拍位置對整個系統影響作模擬。假設用拍子拍擊一質量  $m$  的球，目標是以透過動感回饋裝置，令人感受到球對拍子產生的衝擊力量。

拍子跟牆壁是由彈簧跟阻尼所組成的系統。當拍子跟球接觸的時候，可以將系統描述成較為人知的系統，如圖三中所示，安置在推車上的質量彈簧阻尼系統。



圖三、質量--彈簧—阻尼之物理系統

其中

$p(t)$ ：拍子的位移，並且是系統的輸入

$y(t)$ ：球的位移

$m$ ：球的質量

$k$ ：彈簧之彈性係數

$b$ ：阻尼之阻尼係數

根據牛頓第二運動定律，可將系統表示為

$$m\ddot{y} = \zeta(-\gamma b(\dot{y} - \dot{p}) - k(y - p)) \quad (17)$$

其中  $\zeta$  跟  $\gamma$  為約束條件

$$\zeta = \begin{cases} 1 & y < p \\ 0 & y \geq p \end{cases}, \quad \gamma = \begin{cases} 1 & \dot{y} > \dot{p} \\ 0 & \dot{y} \leq \dot{p} \end{cases} \quad (18)$$

約束條件  $\zeta$  是確保當球跟拍子接觸時才將力量輸出至機器人系統，也就是以  $\zeta$  判斷是否與虛擬物件接觸。如同約速條件  $\zeta$ ， $\gamma$  則是確保當球要離開拍子的過程時，不會受到阻尼的影響。將(17)式整理成(19)式，

$$m\ddot{y} + \zeta\gamma b\dot{y} + \zeta ky = \zeta\gamma b\dot{p} + \zeta kp \quad (19)$$

將(19)式經過拉普拉斯轉換，可以得到(20) 式

$$(ms^2 + \zeta\gamma bs + \zeta k)Y(s) = (\zeta\gamma bs + \zeta k)P(s) \quad (20)$$

所以  $Y(s)$  與  $P(s)$  之間的轉移函數為

$$G_p^y(s) = \frac{Y(s)}{P(s)} = \frac{\zeta(\gamma bs + k)}{ms^2 + \zeta\gamma bs + \zeta k} \quad (21)$$

環境所產生的反作用力：

$$f_e = m\ddot{y} \quad (22)$$

則(22)式可以寫成如下的關係，

$$f_e = T_e p \quad (23)$$

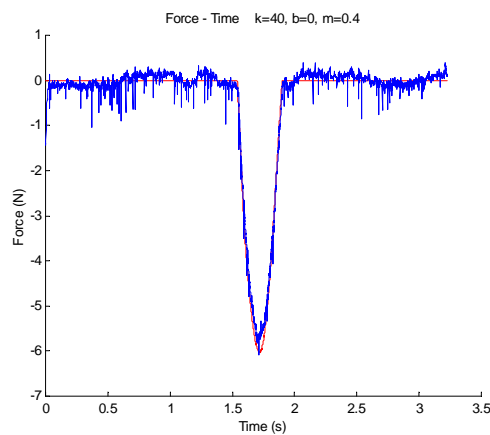
球拍受到的反作用力  $f_e$  跟球拍位移  $p$  之間的轉移函數為(24)式，

$$T_e = \frac{ms^2 \zeta(\gamma bs + k)}{ms^2 + \zeta\gamma bs + \zeta k} \quad (24)$$

其中  $T_e$  也就是虛擬實境系統中所使用的環境動態行為。

## 肆、實驗結果

在機器手臂的末端安置了一組雙向的力量感測器，利用力量感測器量取人類手臂跟機器手臂末端之間的接觸力，來驗證機器人系統是否將虛擬的力量，真實地傳遞至人類手臂。



圖四、彈性係數為 40，阻尼係數為 0，以及質量為 0.4 之接觸力時間響應圖

從圖四接觸力時間響應圖中，可以看出當虛擬力量為零時，不管操作者如何移動，接觸力幾乎為零。也就是說，動感回饋裝置可以很輕鬆地毫不費力地推動。當與虛擬物體接觸時，虛擬力量  $f_e$  幾乎等於  $f_h$ 。整個系統的性能還算不錯。

在模擬拍球的實驗中，當拍子設定有較大彈性係數時，球與拍子的接觸時間縮短，而且最大受力值亦比較大。實際操作的時候，操作者可以感覺到此時手中握的球拍是比較硬的。當拍子的彈性係數設定在比較小的值，球與拍子的接觸時間較長，相對地最大受力較小。此時相較於較大彈性係數的拍子，操作者可以很明顯地感覺握著較軟的球拍。

## 伍、結論

從實驗結果看來，所設計的虛擬實境系統，確實能將虛擬環境中的虛擬力量，透過動感回饋裝置讓使用者有恰當力量感覺；可以說已經達成預期目標。經過實驗驗證，改變虛擬環境中的參數，操作過程的體驗會不一樣，這也是合理的。

## 參考文獻

- [1] M. G. Her and K. S. Hsu, "Design and analysis of haptic direct drive robot for virtual reality," *Journal of Information & Optimization Sciences*, in press.
- [2] J. Yoon and J. Ryu, "Control and evaluation of a new 6-DOF haptic device using a parallel mechanism," *Intelligent Robots and Systems*, Vol. 2, 2000, pp. 1125–1130.
- [3] Q. Lin and C. Kuo, "Virtual tele-operation of underwater robots", *Robotics and Automation*, Vol. 2, 1997, pp. 1022–1027.
- [4] M. G. Her, K. S. Hsu and T. S. Lan, "Analysis and design of a haptic telerobotic system," *International Conference Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Baden-Baden, Germany, 2001.
- [5] Y. Masson and R. Fournier, "EVEREST: A virtual reality interface to program a teleoperated mission," *Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, 1997, pp. 1813–1817.
- [6] H. Kazerooni and M. G. Her, "The dynamics and control of a haptic interface device," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 4, 1994, pp. 453–464.

