

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

利用位能場作三維機械手臂路徑規劃

Path Planning of 3D Manipulators Using Potential Fields

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC 89 - 2213 - E - 009 - 207

執行期間：89年 8月 1日至 90年 7月 31日

計畫主持人：莊仁輝 教授

本成果報告包括以下應繳交之附件：

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

執行單位：國立交通大學資訊科學研究所

中華民國九十年十月十日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

利用位能場作三維機械手臂路徑規劃

Path Planning of 3D Manipulators Using Potential Fields

計畫編號：NSC 89-2213-E-009-207

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：莊仁輝 國立交通大學資訊科學研究所

一、中文摘要

機械手臂路徑規劃的目的在於使工作中的機械手臂端點在自由空間中由起始點到達目標點且在過程中手臂不與障礙物發生任何碰撞，本計劃則是在探討如何利用位能場模型做三維物體的路徑規劃。我們是以廣義位能場模型來代表三維空間中的障礙物與機械手臂，該模型假設任何三維物體的周界均勻地帶正電荷，藉由障礙物對機械手臂的排斥力來調整機械手臂的位置與姿勢，以安全地避開障礙物並且不與之發生碰撞。而在路徑規劃問題中，在空間中最容易發生碰撞的部分稱為瓶頸，本計劃的目的就是要利用位能場模型來協助物體通過瓶頸。由實驗的結果看來，本計劃的路徑規劃演算法，除了能協助三維機械手臂順利通過障礙物間的瓶頸部分，物體在移動過程中所形成的路徑亦是極為平順的。此一能場模型由於具有解析形式，是一個兼具效率與實用的模型。

關鍵詞：路徑規劃、廣義位能場模型、三維工作空間、機械手臂、避碰

Abstract

The purpose of path planning is to move a robot from start position to destination with no collision with any obstacles. In this project, we consider the path planning of 3D objects based on a generalized potential model which assumes that the boundary of every 3D object is uniformly charged. According to the proposed approach, the repulsive force and torque between the moving object and the obstacles due to the above model are used to modify the position and orientation of the object, respectively, so as to keep the moving object away from the obstacle. For a path planning problem, the places where the moving object are most likely to collide with obstacles are bottlenecks in the free space. The goal of the proposed approach is to help the 3D object to avoid the obstacles near the bottleneck regions using potential field. According to the simulation results, a 3D object can indeed move through the bottleneck region safely and smoothly. Finally, the proposed potential field is analytically tractable which makes the path planning efficient and practical.

Keywords: path planning, generalized potential model, 3D workspace, manipulator, collision avoidance

二、緣由與目的

路徑規劃的目的是在將一自由空間中的物體從初始的狀態（包含位置及角度）移動到最後的狀態，其中的過程必須避免與任何的障礙物發生碰撞。此一領域已經有許多的論文加以探討，而其不同的研究方向包括：物體跟障礙物可能是剛體或可以變形的，障礙物可以是靜止不動或動態的，物體移動的方式可能是任意的或受某些限制（如機械手臂）。目前已經有相當多的研究成果，可以用來解決各種不同類型的問題，有許多路徑規劃的研究[1]-[3]都利用了 Configuration space (C-space) 的觀念，這種方法通常分成兩個步驟，首先將自由空間中的障礙物及運動物體之資訊以及一些運動的限制條件轉換到運動參數（狀態）空間中，而該空間的障礙物就對應於造成物體與障礙物碰撞的情況。接著在第二步驟中，就利用一些搜尋的演算法找出一條從起始狀態到最後狀態的路徑，其中經過的狀態都是安全的，而將這條在狀態空間中的路徑對應回工作空間中即可獲得最後的答案。至於建立 C-space 的方式及利用到的搜尋演算法則依各研究而有所不同。這種將路徑規劃問題轉移到狀態空間來做的方法，雖然花費的時間不一定特別長，但得到的路徑往往不平滑，因在狀態空間中鄰近兩點之狀態改變也許對物體來說是很大的一個動作。

另一方面也有些研究[4]-[9]考慮在工作空間 (workspace) 下路徑規劃方法，此類方法較 C-Space 為基礎的方法直觀，結合運用物體跟障礙物的幾何資訊及自由空間來解決路徑規劃的問題。但並非每一個以工作空間為基礎的方法都能找到最安全的路徑。在[8]-[13]，位能場觀念被利用來降低發生碰撞的危機，以位能場為基礎的方法，其主要的優點是自由空間的描述比較簡單，排斥力場可以引導物體的移動以達到避碰的效果，而將其應用到更高維度的路徑規劃問題也比較直接。

在[14]中，經由計算廣義位能場中多面體的每個面所產生的排斥力，可以找出障礙物與場景的位能谷底以及位能極小值，提供運動物體避碰路徑規劃的依據。而後在[15][16]中，並利用廣義位能場模型，在三維物體之形狀比對與辨識與三維剛體之路徑規劃有進一步的研究。本研究採用該廣義位能場演算法，計算出三維機械手臂之路徑規劃演算法所需的力與轉矩達成避碰的效果。一般而言，大部分基於二維工作空間的路徑規劃演算法往往無法直接延伸到三維空間來，而本計劃所使用的路徑規劃演算法卻是由二維空間直接推廣而來的（參見[17]）。我們的動機是探討一個以位能場為基礎的三

維機械手臂路徑規劃演算法，希望它如同在二維空間一般，可以有效率且正確地執行路徑規劃的工作，並且在移動的過程中是平滑順暢的。

三、結果與討論

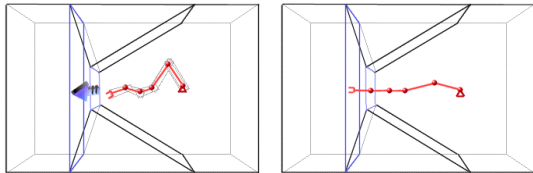
在本計劃中，我們採用廣義的位能場模型來達到避碰的效果，此廣義位能場模型簡述如下(詳見[14])：假設 r 是空間中的一點，與 r' 之間的位能為 $1/|r-r'|^m$ ， S 是一個任意的表面，則於 r 因為 S 所造成的位能大小為

$$\int_S \frac{dS}{R^m}, \quad m \geq 2 \quad (1)$$

其中 R 是 r 與 S 中某一點 r' 間的距離。經由一連串的推導，我們可以得到 S 作用在點 r 的排斥力可以用解析方法經由計算下式的 gradient 而求得

$$\Phi(x, y, z) = \frac{1}{z} \tan^{-1} \frac{xz}{y\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (2)$$

此排斥力就被我們的演算法用來調整物體的狀態，以保持其與障礙物之間的安全距離。



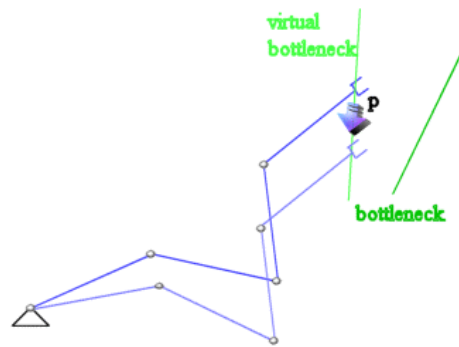
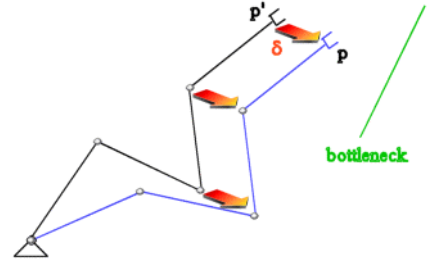
圖一 一個三維機械手臂路徑規劃，左圖是機械初始的組態，右圖是路徑規劃完成後的組態。

底下我們以一個三維的例子來說明我們所採用的路徑規劃演算法，如圖一所示，我們在機械手臂欲通過的路徑上設置一系列按順序排列的瓶頸面 (bottleneck)，機械手臂的末端操作點 (end-effector) 將按照這些瓶頸面的順序前進。前進的過程中，位能場的計算幫助機械手臂避免碰到障礙物，當末端操作點接觸到最後一個瓶頸面時，就算是完成了整個三維機械手臂的路徑規劃。

我們的演算法主要是針對物體在環境中較狹小區域附近的行為，來規劃避碰的路徑，此區域我們稱之為瓶頸面，如圖一機械手臂所穿過的面，演算法的做法是 (1) 首先將機械手臂的末端操作點每次以朝瓶頸面的幾何中心的向量平移 δ ， δ 為任意選擇的初始值。同時，除了靠近基座的最後兩節手臂外，所有的手臂均做相同向量的平移 (如圖二)。機械手臂與障礙物發生碰撞或者最後面兩節手臂因距離太遠，無法正常連接時，位移量 δ 將被減半，直到碰撞不再發生而且最靠近基座的兩節手臂可以正常連接為止。在不考慮障礙物位能場的影響下，機械手臂的端點會一步一步慢慢接近瓶頸面的幾何中心，因此我們能確保連結物體會往瓶頸面移動。瓶頸面的位置與角度的選擇影響了路徑規劃的效率，但是因為我們每次都會重新計算虛擬

瓶頸面，因此瓶頸面的放置是有彈性的。在比較自由或轉折角度比較小的地方，瓶頸面的位置與角度影響並不大；相反的，如果是在狹窄或轉折角度大的地方，瓶頸面的導引關係到路徑規劃的成功與否。

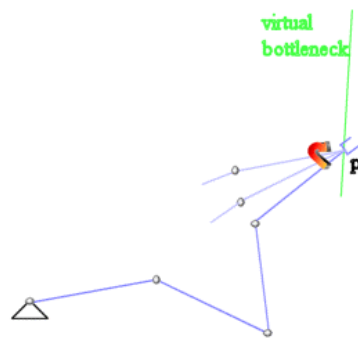
圖二 機械手臂的前進平移調整



圖三 滑動平移調整示意圖

(2) 在前進平移後，機械手臂的末端操作點接著便採用二元搜尋法，在瓶頸面中做往復滑動搜尋，尋找出構成機械手臂位能最小值時，末端操作點的位置，但此時不改變末端的角度 (如圖三)。

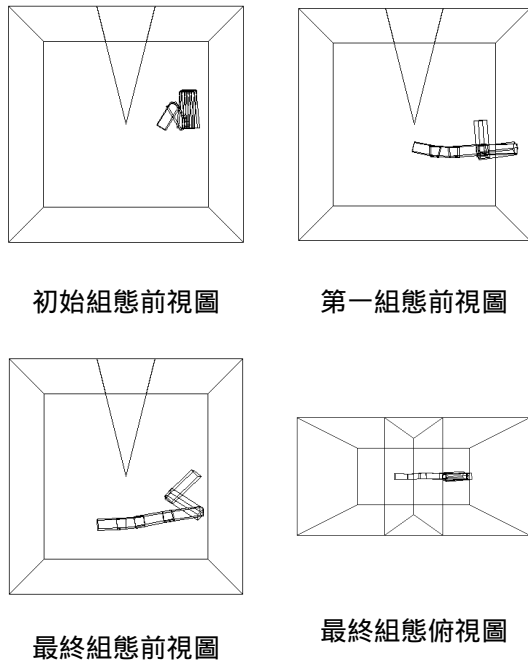
(3) 而後機械手臂再以遞迴的方式，由與末端相連的一節開始往基座，逐一做細微的角度調整，直至倒數第三節為止。我們對關節角度調整的方式，也是採用二元搜尋法來找出機械手臂組態的位能最小值。(4) 最後，機械手臂再由末端開始往基座，逐一做角度調整，直至倒數第三節為止 (如圖四)。



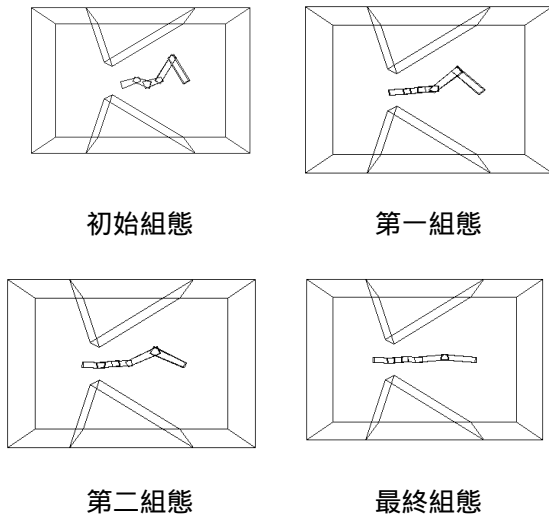
圖四 關節角度調整示意圖

我們使用 Pentium-II 233 的電腦做實驗，記憶體為 64MB，使用來實作的程式語言是 Microsoft 的 Visual C++ 6.0，結果的直接顯示在螢幕上，使用的繪圖應用程式介面是 Microsoft Foundation

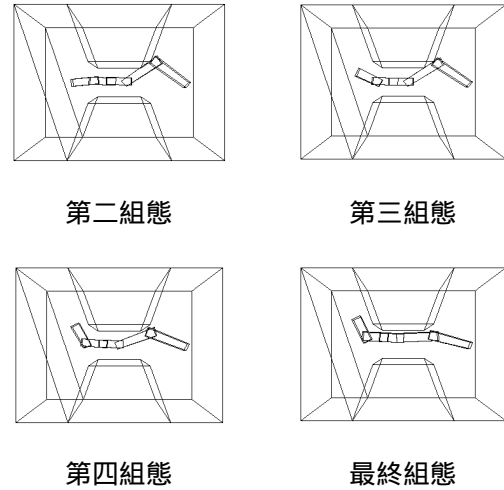
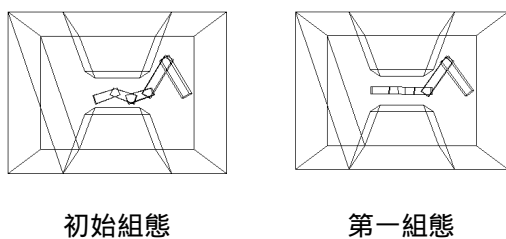
Call GDI 介面，支援平行投影與透視投影兩種顯示方式。



圖五 一個路徑規劃的例子



圖六 狹窄瓶頸面路徑規劃的例子



圖七 三個瓶頸面路徑規劃的例子

不可諱言地，我們的演算法還有一些尚待研究的問題，例如取樣點的數目。由於我們的移動物體是用一組取樣點來代表，所以當我們取樣點的個數太少時，可能會造成不能精確偵知碰撞的不正確結果(未在報告中顯示出)，另一方面，當取樣點的數目越多時，物體通過瓶頸所花費的時間就越久。因此究竟要如何對移動物體進行取樣，才能達到既快速又正確的結果，是一個重要的課題。另外，本計劃的瓶頸定義方式是從二維空間的路徑規劃的定義而來的，在計劃中我們都假設瓶頸為一平面，並且假設已經由別的方法求得。但事實上，在三維空間中瓶頸的定義到目前為止都還沒有明確的定論，例如同樣的障礙物對於不同大小形狀的移動物體而言將有著截然不同的瓶頸觀念，而有待進一步的研究。

四、計劃成果自評

位能場模型在電腦視覺，影像處理等領域中已有許多方面的應用，例如：物體的骨架抽取，物體的比對與辨識等。而在路徑規劃這領域上，首先要面對的是如何對多瓶頸的障礙物環境找出一套有系統的演算法。接下來，除了本計劃中所提及的機械手臂的路徑規劃外，還可研究如不同型態的關節對機械手臂運動的影響；兩個以上的機械手臂協同工作之路徑規劃；動態的障礙物下的路徑規劃；關節活動角度的限制等問題。諸如此類的應用不勝枚舉，足以證明這是一個兼具理論與實用的模型。

五、參考文獻

- [1] P. C. Chen and Y. K. Hwang, "SANDROS: a dynamic search algorithm for motion planning," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 3, pp. 390-403, Jun. 1998.
- [2] E. S. H. Hou and D. Zheng, "Mobile robot path planning based on hierarchical hexagonal

- decomposition and artificial potential field,” *Journal of Robotic Systems*, vol. 11, no. 7, pp. 605-614, 1994.
- [3] J.-C. Latombe, *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [4] T. C. Hu, A. B. Kahng, and G. Robins, “Optimal robust path planning in general environments,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 6, pp. 775-784, Dec. 1993.
- [5] S. R. Maddila, “Decomposition algorithm for moving a ladder among rectangular obstacles,” in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, California, Apr. 1986.
- [6] R. A. Brooks and T. Lozano-Perez, “A subdivision algorithm in configuration space for findpath with rotation,” *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Karlsruhe, Germany, 1983.
- [7] J. C. Zamiska, D. T. Kuan, and R. A. Brooks, “Natural decomposition of free space for path planning,” in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, Missouri, Mar. 1985.
- [8] J. H. Chuang and N. Ahuja, “An analytically tractable potential field model of free space and its application in obstacle avoidance,” *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Part B*, vol. 28, no. 5, pp. 729-736, Oct. 1998.
- [9] Y. K. Hwang and N. Ahuja, “Gross motion planning – a survey,” *ACM Computing Survey*, vol. 24, no. 3, pp. 219-292, Sep. 1992.
- [10] J. Guldner and V. I. Utkin, “Sliding mode control for gradient tracking and robot navigation using artificial potential fields,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 2, Apr. 1995.
- [11] P. Khosla and R. Volpe, “Superquadric artificial potentials for obstacle avoidance and approach,” in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia, Pennsylvania, Apr. 1988.
- [12] Y. K. Hwang and N. Ahuja, “A potential field approach to path planning,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 1, pp. 23-32, Feb. 1992.
- [13] J.-H. Chuang and N. Ahuja, “Path planning using Newtonian potential,” in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, CA, Apr. 1991.
- [14] J.-H. Chuang, “Potential-based modeling of three-dimensional workspace for obstacle avoidance,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 5, pp. 778-785, Oct. 1998.
- [15] J.-H. Chuang, J.-F. Sheu, C.-C. Lin and H.-K. Yang, “Shape Matching and Recognition of 3D Object Using Potential Field,” *Computers and Graphics*, vol. 25, no. 2, Oct. 2001.
- [16] C.-H Tsai, J.-S. Lee and J.-H. Chuang, “Path Planning of 3D Objects Using A New Workspace Model,” Accepted by *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*.
- [17] J.-H. Chuang, L.-W. Kuo and C.-C. Lin, “Potential Based Path Planning for Robot Manipulator,” submitted to *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*.