

"對一般型機器手進行軌跡模式化，碰撞檢知，及運動規劃"[@]

"Trajectory Modeling, Collision Detection, and Motion Planning for General Robot Manipulators"

* **
林啓芳、蔡文祥

Chi-Fun Lin and Wen-Hsiang Tsai

* 國立交通大學資訊工程研究所

** 國立交通大學資訊科學研究所

摘要

本研究的重點在於協調並規劃兩部機器手的運動，使其不因彼此工作區域的重疊而發生碰撞，藉以提昇機器手的智慧能力。所使用的技巧包括(1) 以一次雲形函數來擬合機器手上亮點影像的運動軌跡；(2) 提出碰撞圖的觀念，並以交叉時段檢驗方式來建立；(3) 提出二個不同層次的過濾方法，避免不必要的碰撞檢驗；以及(4) 轉換避碰的運動規劃問題，成為在二度平面上對固定障礙物的避碰問題，並以在可視圖形上尋找最短路徑的方法加以解決等。最後並以機器手在二種不同操作模式下避碰問題的解決，來說明本研究所提供方法的優越性。

一、前言

按照美國機器人協會 RIA(Robot Institute of America) 對機器人所作分類中，智慧型機器人是各類型機器人中最具智慧能力與自動化程度 [1]。所謂智慧型機器人必須具備二項基本要件：(1) 具有感知能力，能自動查覺周遭環境的改變；及(2) 能做出正確的決策以適應環境的改變。在最近幾年當中，有愈來愈多的研究集中在如何提昇機器人的智慧程度，以便應用到各類型的工作環境。研究中所使用的感知器，最常用的便是以攝影機 (camera) 做為機器人(手) 的視覺資料來源。按照攝影機的裝置方式，大體上可以分成兩類。第一類是將攝影機固定在機器人上，每一部機器人都有它自己的視覺，各自獨立運作，以這種方式來提昇機器人智慧能力，是一種分權式 (decentralized) 的作法，例如 [2-4]。第二類則將攝影機固定在某些位置上，監視在整個工作環境中活動的自動機械，包括機器人(手)、自動車、輸送帶、旋轉平台、及工作人員等，是一種集權式 (centralized) 的作法，例如 [5-7]。

在本研究中將採第二類集權式的作法，以數部固定架設的攝影機做為整個運作環境的監控系統，主要目的在協調各機器手的運動，避免彼此因相互碰撞而遭致損壞。在一個高度自動化的工作環境，往往會大量使用各種型式與功能的機器手，甚至有慢慢走向“無人工廠”的趨勢，在這種情況下，(1) 機器手的工作空間 (work-volume) 若能允許相互重疊，則能提高整個空間的使用效率；(2) 使用多部機器手來共同合作，有時會比各自單獨運作來得有效率。因此如何協調在此情況下運作的機器手不使碰撞，並以提高產能 (使待讓或閒置時間為最少) 為目標，便是本研究的重點。為簡化問題的複雜性起見，我們將只討論如何使兩部固定機器手避開碰撞，而事實上我們所提供的方法也可推廣到解決超過二部機器手的避碰問題。

在第二節中將定義我們所要研究的問題，過去研究的回顧，以及我們所要採用的方法。第三節討論如何建立機器手在三度空間中移動軌跡的資料。第四節探討如何偵測出兩部機器手是否會相互碰撞及何時碰撞等問題。第五節研究如何協調二部機器手的運作，錯開二者互相碰撞的時間，且使相互待讓的時間為最少，並針對各種不同的需求提出不同的協調方式。第六節為實驗結果。最後第七節將做簡短的結論。

二、問題定義

我們的目的主要是要使兩部在重疊的工作空間運作的機器手，利用外圍攝影機取像分析，及協調彼此運作時間行程 (time schedule)，以避開任何可能發生的避碰。一般這種運動規劃 (motion planning) 或軌跡規劃 (trajectory planning) 研究必須考量許多因素與限制，現定義我們所要研究問題的內容如下。

(1) 機器手本身

a. 固定型機器手 (stationary robot)；

[@] 本研究由國科會補助，計畫編號為 NSC78-0404-E009。

- b. 任何自由度，在三度空間運作。
- (2) 移動路徑限制
 - a. 任何曲線(包括直線)的移動；
 - b. 移動路徑固定，不得改變。
- (3) 時間限制
機器手完成一項工作的開始與結束時間可以改變，過程中允許或不允許加入待讓時間的情況都將分別考慮。
- (4) 目標函數的訂定
總待讓時間為最小。
- (5) 二部機器手均從事週期性工作，主/從關係有否均分別加以考慮。

2.1 相關研究回顧

以下介紹幾篇有關對移動障礙物避碰問題的研究。Canny [12]以四元數(quaternion)來描述多面體在三度空間移動情形，並確切計算出與障礙物碰撞時間及位置，同時可以處理移動障礙物的情形，但沒有提出任何避碰的方法。Keh̄arnavaz and Li [13]利用自動迴歸模式 (Autoregressive model) 來預測移動障礙物可能出現位置，達到避碰效果。Lee and Chien [14]概略描述四種可用來解決對移動障礙物避碰的方法，並說明其優缺點。Lee and Lee [10] 提出一套針對兩部固定型機器手避碰的方法。機器手的資料模式以腕(wrist)處所擬合的圓球來描述，並有主/從之分且分別做直線運動。利用碰撞圖(collision map)與時間排程(time scheduling)來達成避碰運動規劃(collision-free motion planning)。Kant and Zucker [11]將軌跡規劃問題分解成路徑規劃問題與速度規劃(velocity planning)問題。在路徑規劃問題中，只考慮對固定障礙物的避碰，傳統的解決方法如 VGRAPH(可找出最短路徑)，或自由空間法(可找出較安全的路徑)都可應用。在速度規劃問題中，利用物體行走距離及與障礙物碰撞時間長短，可將此問題轉化成二度空間的路徑規劃問題，降低求解過程的複雜度。最後，Fujimura and Samet [15]提出一套在移動障礙物中尋出行走路徑的方法。主要精神是對障礙物的移動路徑(限定直線運動)加入時間維度，並以八分樹(quadtrees)結構來描述。考慮在速度、加速度、及離心力的限制下，利用此八分樹結構來規劃行走路徑。

2.2 解決方法與特色

我們利用多部固定架設的攝影機，以及裝置在機器手上的小燈泡在取像時所產生的亮點，做為建立機器手移動軌跡的依據，並使用一次雲形函數(linear spline function)來擬合

這些亮點所產生的軌跡。簡單的空間幾何關係配合 [8]或[12]所述碰撞分類與條件，很容易便可檢驗出兩部機器手是否會相碰，何時相碰，以及碰在何處。我們另外提供兩種不同層次的過濾(filtering)方法，過濾掉一些不必要的檢驗，來加快整個處理速度。最後以上述的檢驗結果產生兩部機器手的碰撞圖，再利用對可視圖形找尋最短路徑的觀念，考慮機器手有無主/從關係，及運作過程中允不允許加入等待時間(waiting time)等各項因素，在碰撞圖內找尋最佳的協調結果。

我們所提出的這套避碰方法具有列特色：

- (1) 以數個多面體來描述機器手，在大部份的例子裡，失真情形遠比以點、線段、圓球或圓柱體所描述來得小；
- (2) 真實地以攝影機及影像處理技術來記錄機器手的移動軌跡，而不是以模擬(simulation)方式進行，因此我們所提供的方法更具實用價值；
- (3) 所提供方法的複雜度，不會因為機器手的關節不同而有所不同，例如旋轉型關節(rotary joint)與平移型關節(prismatic joint)的處理方式都是一樣，因此所提方法的彈性程度較大；
- (4) 不會因為機器手自由度的改變而大幅增加方法的複雜度(例如在Lozano-Perez [9]所提方法中，機器手若多一個自由度則相當於所要處理資料量的維度多加一維，影響複雜度頗大)，因此我們的方法適合處理高自由度的機械手(例如多餘關節型機器手)；及
- (5) 機器手的運動不限定是直線，可做任何曲線運動，較符合一般情況。

三、建立機器手的移動軌跡

我們在本文中將介紹一種記錄(或建立)物體移動軌跡的方法。藉助於黏貼在機器手臂上的小燈泡，影像處理技術，以及一次雲形函數擬合觀念，我們將建立機器手在三度空間從事週期運動的軌跡。

3.1 機器手資料模式

機器手的種類很多，要確實描述出機器手的外型結構不是一件容易的事，因此一般研究不是以模擬方式，便是以簡單的幾何圖形(如點、線、圓或球等)來代表，使得大部份這類避碰研究只能停留在紙上作業而無法應用到實際的操作上。我們則不同，利用多部攝影機來“看”機器手實際運作過程，藉由此來建立機器手資料模式與移動軌跡，因此不會有上述不能實際應用的缺點。所使用的技巧是利用一些小燈泡黏貼在機器手臂

的重要部位(例如在各個頂角上)。這些燈泡在影像上將呈現出一團“亮”點資料,取其中心位置稱為“特徵點”。利用多部攝影機取像,計算出每一特徵點所對應燈泡在三度空間的座標,很容易便可描述出機器手的型狀。另外為了簡化或方便處理起見,我們以這些特徵點所構成的多面體(polyhedra)來近似手臂外型。

3.2 攝影機的校正(camera calibration)

校正攝影機的主要目的在於求取攝影機的六個參數值:位置(X, Y, Z)及方向(α, β, γ)。利用燈泡在不同的二部攝影機上所呈現亮點位置,以及攝影機上個別的六個參數值,以三角測量技巧(Triangulation techniques),便可求出燈泡在三度空間的座標(參考 Nitzan[16])。由此引發了三個問題:(1)如何保證機器手上的燈泡在運作過程中的每一時刻,都能被至少二部不同位置的攝影機“看”到(否則便無法計算出正確的三度空間座標);(2)如何精確校正攝影機(不準確的校正將導致由此建立的機器手外形與軌跡嚴重扭曲,影響研究的準度);及(3)如何解決對應(correspondence)問題。

攝影機所“看”到的景像是連續的,而這種連續性的資料無法交由電腦來處理,必須經由取樣(sampling)及量化(quantization)等取像過程轉換成數位資料後,才能以影像技巧來加以分析及處理。取像間隔的長短也會影響到研究的結果。間隔過長將造成雲形函數擬合不準確(參考 3.3 節),間隔過短則因取像過多,不但浪費記憶空間,同時也增加處理時間。另外機器手的運動速度也是決定取像間隔長短的考慮因素之一,速度快則間隔短,速度慢則間隔長。因此適當的取像間隔必須以實際上機器手的工作情形來決定。

因此原先第(1)項問題改成:如何保證機器手上的燈泡在運作過程中的每一取像時刻,都能被至少二部不同位置的攝影機“看”到。Leou and Tsai [17]提供了這項問題的解答。他們以“貪心”法則(greedy algorithm)及 A^* 方法,能決定出最少攝影機的需求與擺放位置及方向,而滿足第(1)項的要求。也就是說,機器手上的任何一個燈泡的三度空間座標都可以計算出來,即機器手在任何取像時刻的外形資料,都可以由這些燈泡所形成的多面體近似而得。

前面提過在計算三度空間座標時,必須利用到攝影機的六個參數值,而這六個參數值必須藉由校正攝影機的過程中獲得。[18, 6] 提出只看共平面四點來校正攝影機的簡易方法。Tsai [19]提出另一種更精確校正攝影機的方法,不但校正前述六個參數值,同時還校正焦距、鏡頭扭曲係數、影像中心座標、及 X 軸不確定比例因子(uncertainty scale factor for

X)。前者稱為外在參數(extrinsic parameters),後者稱為內在參數(intrinsic parameters)。我們採用此法來校正攝影機,因為它是目前所有校正方法中效果最好的一種。

最後一項有關對應問題,可以分成二個層次來看:(1)同一取像時刻,不同攝影機的特徵點對應問題;及(2)不同取像時刻,相同攝影機的特徵點對應問題。這二項問題都很複雜且很難解決,因此我們以另一種處理方式來避開這項問題:在學習階段(即建立機器手移動軌跡階段)時,每一工作週期只建立一個點的移動軌跡。即原先只需要一個週期便能建完機器手的移動軌跡,現則需要數十個週期方能做完。雖然學習時間加長了,但問題難度卻簡化不少,且學習過程只須做一次,因此還是值得的。

3.3 曲線擬合(curve fitting)

一般而言,根據數值誤差的大小,有兩種不同的方式來處理曲線擬合。第一種是以曲線來代表數據的趨勢(當數據存在有相當誤差時),如最小平方迴歸法(least square regression)便是其中之一。第二種則是以曲線或曲線組(段段相連的曲線),經過各數據的方式來擬合,當然數據的誤差不能太大,否則所擬合出的曲線會不正確。常用的方法如牛頓插值法及雲形函數,二者的差別在於前者以一高階曲線來擬合,後者則採段段相連的低階曲線。由於使用高階曲線不但在往後處理起來相當不便,而且在數據變化太大時會有振盪(oscillation)現象產生,因此我們使用一次雲形函數來擬合。一般較常使用的是立方(三次)雲形函數(cubic spline function)。就效果上而言,以三次函數所擬合出的曲線會比較平滑,但在往後處理時,採用一次函數可以簡化問題的複雜度,因此我們仍以一次雲形函數來擬合燈泡的移動軌跡(也就是機器手的運作軌跡)。在第六章中,我們將以實際的實驗結果來比較一次與三次雲形函數的擬合差異。

四、碰撞檢知

碰撞檢知的應用範圍很廣,包括路徑或軌跡規劃問題、動畫(animation)分析、安全導航、及系統設置規劃等。根據物體移動與否,又有所謂靜態(static)與動態(dynamic)檢知之別。本文所提方法即屬後者。4.1 節中將對各種碰撞情形加以分類,並說明各類碰撞所應具備的條件。4.2 節利用機器手移動軌跡的擬合曲線,配合各類碰撞條件,進行碰撞檢知。4.3 及 4.4 節我們將提供兩種不同層次的過濾方法,來過濾掉

不必要的碰撞檢查，以加快處理速度。

4.1 碰撞分類及條件

在 3.1 節中我們曾說明如何以數個多面體來近似機器手的外型，因此二部機器手彼此相碰的情況，其實就和在三度空間中移動的多面體，彼此相碰的情形一樣。所以我們沿用 Lozano-Pirez [9] 或 Canny [12] 對多面體碰撞情形所做的分類。若以 A 表示物體(object)，B 表示障礙物，則 A 與 B 之間有下列三種碰撞可能(圖 1)：

- (1) 類型 A 碰撞：B 的頂點(vertex)和 A 的面(face)碰觸；
- (2) 類型 B 碰撞：A 的頂點和 B 的面碰觸；及
- (3) 類型 C 碰撞：A 的邊(edge)與 B 的邊碰觸。

任何在三度空間移動的多面體，其兩個之間的碰撞方式都可以這三種類型的碰撞表示出來。我們以 (T_x, T_y, T_z) 來表示點 $T=P, Q, R, S$ 的三度空間座標，配合圖 1 的標示，可以列出各類型碰撞之必要條件如下(1~3)：

$$(1) \text{ 類型 A } \begin{vmatrix} 1 & O'_x & O'_y & O'_z \\ 1 & P_x & P_y & P_z \\ 1 & Q_x & Q_y & Q_z \\ 1 & R_x & R_y & R_z \end{vmatrix} = 0; \quad (1)$$

$$(2) \text{ 類型 B } \begin{vmatrix} 1 & O_x & O_y & O_z \\ 1 & P'_x & P'_y & P'_z \\ 1 & Q'_x & Q'_y & Q'_z \\ 1 & R'_x & R'_y & R'_z \end{vmatrix} = 0; \text{ 及 } \quad (2)$$

$$(3) \text{ 類型 C } \quad \overline{P'P} \cdot (\overline{P'Q'} \times \overline{PQ}) = 0 \quad (3)$$

(即公垂線長度為 0)。

類型 A 與類型 B 的碰撞是屬於點與面的碰撞型態，類型 C 則是線段與線段的碰撞型態。因此碰撞點在滿足上述的必要條件之外，還需分別滿足“在面”(in-face)與“在線段”(in-edge)兩項充分條件，分述如下。

- (1) 在面條件：即在圖 1 中，類型 A 的碰撞條件除了(1)式必要條件外，點 O' 必須位於由 P, Q, R, S 所圍成的面上，此為充分條件。同樣，類型 B 的充分條件是點 O 必須位於由 P', Q', R', S' 所圍成的面上。
- (2) 在線段條件：即在圖 1 中，類型 C 的碰撞條件是(3)式之必要條件外，再加上碰撞點必須位於 \overline{PQ} 及 $\overline{P'Q'}$ 線段內之充分條件。

4.2 以擬合軌跡進行碰撞檢知


在上節 4.1 中介紹了檢驗三種型態碰撞的方法((1)~(3)式)，這些檢驗方式都是針對固定不動的多面體，屬於靜態碰撞檢驗。但是機器手是動態的，重複做週期性的運動，因此並不適用於上述的檢驗方式。解決方法是利用某一參數，例如時間參數 t 或距離參數 s ，來描述機器手上每一個頂點(即燈泡所在位置) P 的移動軌跡，表示成 $P(t)$ 或 $P(s)$ 。因為頂點 P 的路徑是固定的，且移動方式具有週期性，因此 $P(t)$ 及 $P(s)$ 可以事先求得。我們採用以時間參數 t 的描述方式，實際上我們是以段段相連的 t 之一次多項式(一次雲形函數)來描述頂點 P 的移動路徑。因此在做各類型碰撞檢驗時，就必須以分段個別討論的方式進行，因為每一段所擬出的多項式並不相同，而每一段事實上就是一個取像間隔。假設對機器手 1 及機器手 2 各取 $(n+1)$ 及 $(m+1)$ 張影像，取像時刻分別是 (t_0, t_1, \dots, t_n) 及 (t_0, t_1, \dots, t_m) ，為簡化問題起見，假設取像間隔為一固定常數 h ， $h=t_1-t_0=t_2-t_1=\dots=t_n-t_{n-1}=t_m-t_{m-1}$ 。現修正(1)式如下：

$$\text{類型 A } \begin{vmatrix} 1 & O'_x(t) & O'_y(t) & O'_z(t) \\ 1 & P_x(t) & P_y(t) & P_z(t) \\ 1 & Q_x(t) & Q_y(t) & Q_z(t) \\ 1 & R_x(t) & R_y(t) & R_z(t) \end{vmatrix} = 0, \quad (4)$$

其中 $t \in [t_{i-1}, t_i], i=1, 2, \dots, \min(m, n)$ 。

化解(4)式可得 t 的 3 次(頂多)一元方程式，利用卡爾丹(Cardan)公式可解得 t 值為 t^* 。 t^* 必須介於 t_{i-1} 與 t_i (目前所檢驗的時段)之間，此必要條件才算成立。另外充分條件是必須滿足在面(in-face)條件，即 $O'(t^*)$ 必須位於 $P(t^*)$ 、 $Q(t^*)$ 、 $R(t^*)$ 、及 $S(t^*)$ 所圍成的面上(以圖 1 為例)。其他各類型(B 及 C)的檢驗方式亦同，在此略過。從這裡我們可以看出前述(3.3 節)擬合軌跡時，使用一次而非三次雲形函數的理由就是在避免因化解(4)式時，產生高次一元方程式。到目前為止，我們已提供如何對同時運作的機器手，進行碰撞檢驗的方法，碰撞時間(即上述 t^*)與碰撞位置都可求得。本篇研究更進一步提供方法來協調物體的運作，以避免碰撞，詳述如下。


假設我們限制每次所能延遲的時間長度，是以取像間隔(即 h)為基本單位，例如延遲 $4h$ 時間長度。我們可以事先對二部機器手(設為 $R1$ 與 $R2$)所有的時段做交叉檢驗，即對 $R1$ 的每

一時段 $[t_{i-1}, t_i]$, $i=1, \dots, n$, 分別對 R_2 的每一時段 $[t_{j-1}, t_j]$, $j=1, 2, \dots, m$, 二者的運動軌跡進行碰撞檢驗, 並將結果建成如圖 2 R_1 與 R_2 的碰撞圖(假定 $n=12, m=10$)。空白的格表示“非碰撞”區域, 有“”記號之方格表示經由各類型(A、B及C)碰撞檢驗後, 有碰撞情形發生, 是屬於“碰撞”區域。在第五節中我們將說明如何利用此碰撞圖達到避碰的效果。

現修改類型 A 碰撞檢驗的式子, 以便能處理交叉時段的檢驗方式。假設 R_1 是物體 A, 時段是 $[t_{j-1}, t_j]$, R_2 是障礙物 B, 時段是 $[t_{i-1}, t_i]$ 。若 B 在 $[t_{i-1}, t_i]$ 移動的路徑延遲至 $[t_{j-1}, t_j]$ 進行, 則與 A 在 $[t_{j-1}, t_j]$ 移動路徑的碰撞檢驗式子如下(取 $\Delta=t_j-t_i$):

$$\text{類型 A} \quad \begin{vmatrix} 1 & 0'_x(t-\Delta) & 0'_y(t-\Delta) & 0'_z(t-\Delta) \\ 1 & P_x(t) & P_y(t) & P_z(t) \\ 1 & Q_x(t) & Q_y(t) & Q_z(t) \\ 1 & R_x(t) & R_y(t) & R_z(t) \end{vmatrix} = 0, \quad (5)$$

其中 $t \in [t_{j-1}, t_j]$, $j=1, 2, \dots, m$ 。

(5) 式為 t 之 3 次(項多)方程式, 因此同樣可以卡爾丹公式來解, 假設得 t^* , 則 t^* 必須介於 t_{j-1} 與 t_j 之間, 此必要條件便得以成立。另充分條件是 $0'(t^*-\Delta)$ 必須位於由 $P(t^*)$ 、 $Q(t^*)$ 、 $R(t^*)$ 及 $S(t^*)$ 所圍成的面上。另外類型 B 與類型 C 的處理方式亦同, 在此略過。檢驗過程中, 只要一檢驗出有碰撞情形發生, 便在碰撞圖對應的方格上記下“”, 並進行下一個方格的檢驗, 直到所有方格檢驗完畢。

由上面敘述得知, 整個檢驗過程需要耗費許多計算時間。而且通常在碰撞圖上, 絕大部份的方格, 很明顯的屬於“非碰撞”區域, 因此如何儘快找出這種明顯的“非碰撞”區域, 並減少各類型碰撞檢驗的次數, 以加快處理速度, 便是以下兩節我們所要研究的重點。

4.3 碰撞剛體的過濾

在 3.1 節中, 我們曾提過機器手的外形資料是由數個多面體所近似而得, 因此在檢驗機器手是否會相碰時, 事實上就是在檢驗這些多面體是否有相交。這些多面體我們稱之為剛體 (rigid body), 因其在運作過程中不會改變形狀。基本觀念是以最小的圓球來包容每一個剛體。二個剛體相碰的先決條件是包容他們的圓球必先碰撞, 但反之則不一定成立。我們以一次雲形函數來擬合每一個圓球球心的移動軌跡, 利用球心距離與


半徑和的關係, 可容易便可決定二個圓球是否會相碰, 藉此過濾掉那些不可能會相碰的剛體。

4.4 碰撞面的過濾

經由 4.3 節的處理, 我們已把所需檢討的對象, 限定在兩個可能碰撞的剛體(多面體)上。如此一來, 檢驗次數會減少許多, 同時也能很快的找出碰撞圖上, 所謂明顯的“非碰撞”區域。而這一節中我們更進一步將需要討論碰撞的對象(點、線及面), 限定在剛體的幾個面上(通常是 2 個面), 使得各類型碰撞檢驗的次數更加減少, 同時也減少“假警訊”(false alarm)的次數。所謂“假警訊”指的是兩個剛體經由 4.3 節的過濾, 認為有可能碰撞, 但是經過碰撞檢驗之後, 結果並不會相碰。在下文中首先提出以圓球包容面的作法, 同時說明如何利用此圓球來判斷面與面之間是否可能相碰。

假定 f 為剛體上的一個面, 其“朝外”(即指向剛體外部)的法向量為 \vec{n} , 利用此面(多邊形)的頂點, 可以決定出包含此面之最小圓。以此圓為內接圓的球體有無窮多個, 但若給定 d 值(內接圓在 \vec{n} 方向與外接圓球之最長距離), 則此圓球唯一確定, 其球心與半徑都可經由計算而得。我們以此圓球來包容剛體上的一個面 f , 並且由 f 所在平面橫切此圓球成為前部與後部: 與 \vec{n} 同向者為前部, 反向則為後部, 其大小由 d 值來決定(圖 3)。上述圓球便是用來檢驗兩面是否會碰撞的依據。其原理是任何二面相碰, 其先決條件是包容此二面的圓球, 其前部(根據上述定義)必先接觸。相同於 4.3 節的作法, 我們以討論二個圓球的距離關係, 來決定此二面是否需要進行各類型的碰撞檢驗, 因此圓球的移動軌跡同樣要以一次雲形函數來擬合。

五、避碰策略研究

利用前一章所敘述的方法對二部機器手的運作路徑進行碰撞檢知, 並建立如圖 2 的碰撞圖。根據此碰撞圖很容易就可看出此二部機器手在實際運作時有無碰撞可能。方法是只要定出各自的起動時間, 並在碰撞圖上找出對應的點來, 劃出夾角是 45° 的直線, 只要此直線不穿過任何“碰撞”區域(即有“”記號之方格), 則表此二部機器手若在定好的起動時間開始運作, 就不會有碰撞的情形發生。但是這種任意決定出的規劃方式, 並不能保證能使等待時間為最少。因此在本章中我們將提出新的方法, 一方面規劃出兩部機器手避碰的運動方式, 另一方面則保證此規劃方式能使彼此待讓時間總和為最少。

5.1 節中我們介紹可視圖形(visible graph)的觀念, 並

將此觀念應用在碰撞圖上。5.2 節將介紹如何在不同操作模式 (operation mode) 的要求下, 利用定義在碰撞圖上的可見圖形, 以及在圖形上找尋最短路徑的技巧, 達到避碰運動規劃的目的, 並使等待 (待讓) 時間為最少。

5.1 可視圖形與應用

定義可視圖形 $UG(N, L)$, 其中 $N = V \cup (S, G)$, V 是所障礙物的頂點所成的集合, S 和 G 分別是某移動物體的起點與終點, $L = \{(n_i, n_j) \mid n_i, n_j \in N \text{ 且 } \overline{n_i n_j} \text{ 不穿過任何障礙物}\}$ 。所謂 "可視" 的意思就是 N 中每個元素, 彼此都能 "看" 到對方。對於圖形上的每一個環節 (link) 若賦予距離成本, 則一般在圖形上尋找最短路徑的方法都可用來決定由 S 到 G 的最短路徑, 其時間複雜度 (time complexity) 是 $O(|N|^2)$, $|N|$ 表在 N 集合中的元素個數。底下我們提出一種新的方法, 利用定義在碰撞圖上的可視圖形, 來轉換原來的避碰運動規劃問題, 成為在此可視圖形上尋找最短路徑問題, 同時能滿足最少等待時間的要求。

首先在碰撞圖上定義障礙物, 所謂障礙物是指由一個或是數個相連 "碰撞" 區域組合而成。假設二部機器手的取像時刻分別為 (t_0, t_1, \dots, t_n) 及 (t_0, t_1, \dots, t_m) 定義 $n_i = (x_i, y_i)$ 為碰撞圖上的某一方格點, 其中 $x_i \in (t_0, t_1, \dots, t_n)$, $y_i \in (t_0, t_1, \dots, t_m)$ 則在碰撞圖上定義可視圖形如下。

可視圖形 $UG = UG(N, L)$, 其中

$$N = V \cup (S, G),$$

$$S = (t_0, t_0),$$

$$G = (t_n, t_m),$$

$$V = \{\text{所有障礙物之頂點}\},$$

$$L = \{(n_i, n_j) \mid n_i, n_j \in N, \overline{n_i n_j} \text{ 不穿過任何障礙物}\};$$

而環節上的成本定義如下:

$$\text{COST}(n_i, n_j) = \max(|x_j - x_i|, |y_j - y_i|) - \min(|x_j - x_i|, |y_j - y_i|) \quad (6)$$

其中, $(n_i, n_j) \in L$ 。

此種定義成本方式有別於一般以距離為成本的定義。(6) 式事實上就是以等待時間 (waiting time) (或是延遲時間

(delay time, 二者相同) 做為環節上的成本。

5.2 各種操作模式之避碰

現在實際運用上述(5.1節)的觀念, 來解決在下列三種不同操作模式下之避碰問題。

模式1: 兩部機器手無主/從之分, 起動以後的運作過程中, 可以加入等待時間來避開碰撞。

在這種模式下的避碰運動規劃問題, 其實就和在定義於碰撞圖上的可視圖形中, 尋找由 S 到 G 的最短路徑問題一樣。其解決方法在 5.1 節中已有敘述, 最後處理所得結果如圖 4。

模式2: 同模式 1, 但機器手有主/從的區別, 假設以 $R1$ 為主, $R2$ 為從。

由於 $R1$ 的次序高於 $R2$, 所以只能在 $R2$ 的運作過程加入等待時間以避開碰撞。作法是對附著在 S 及 G 上環節除外的其餘環節, 若與橫軸之夾角高過 45° , 則其成本定為無窮大, 再由 S 到 G 找尋最短路徑。最後處理結果如圖 5.4。

以上這二種操作模式最後規劃所需等待時間分別是 4h 及 6h, 時間複雜度都是 $O(|N|^2)$, 而所尋出的最佳規劃方式 (即可視圖形上之最短路徑) 有時並不唯一。

六、實驗結果

在整個機器手監控系統中, 我們使用 5 部 CCD 攝影機來取像, 以保證使所有黏貼在機器手上的燈泡, 在任何取像時刻都能被至少二部攝影機所 "看" 到, 以便計算其在三度空間的座標。整個系統架構如圖 6。實驗中所使用的機器手是屬於關節型的, 如圖 7 (a), 而以燈泡呈像所構成的多面體來近似機器手外形的結果如圖 7 (b)。近似的程度令人滿意, 唯一的缺失便是有不連續的感覺。這是因為在機器手上的某些部位 (如關節轉動處) 無法黏貼燈泡之故。解決方法是我們可加入一些非剛性 (nonrigid) 的多面體來連接因上述限制而致分離的多面體, 結果如圖 7 (c)。這些非剛性的多面體將隨關節的轉動而改變形狀。

圖 8 則是以一次與三次雲形函數來擬合某一顆燈泡移動軌跡的比較結果。由圖上可以看出二者的差異並不大, 這是因為我們取像間隔短的緣故。目前的取像間隔定為 1 秒, 若再予以

減半成爲 0.5 秒，則上述二者的擬合效果將會更爲接近，但是必須付出幾乎是加倍的處理時間成本。由以上的實驗結果，我們選擇以一次雲形函數來擬合機器手的任何曲線運動軌跡。選用直線擬合的最大好處便是在碰撞檢知時可以使用公式（卡爾丹公式）來求解，節省處理時間。

七、結 論

以往在設置一部機器手時，通常都是給予完全獨立的活動空間，並以各項防護設施，例如在四周圍起柵欄，來防止其他人員或機具的進入。而最近幾年來，基於下列二項因素的考慮，(1) 空間的使用效率；及 (2) 工作效率，有愈來愈多的研究投入如何設立多手臂機器手，或允許機器手的工作空間重疊，共同以合作方式來完成某些工作。但因工作空間相互重疊的結果，造成機器手在工作過程中，有相互碰撞的可能。當然我們不能以實際的操作來驗證這項可能性，或是已經獲知確實會碰撞，希望能以最有效率的方式來安排機器手的運動，以避開碰撞。這些就是我們提出這項研究的主要目的。

本研究的主要貢獻列述如下：

- (1) 提供以機器手表面亮點影像建立機器手外型資料模式及擬合移動軌跡的方法；
- (2) 對機器手做動態碰撞偵測，並以交叉時段檢驗方式建立碰撞圖，做為規劃二部機器手運動之依據；
- (3) 提供二個不同層次的過濾方法，來濾掉不必要的碰撞檢知，以加快處理速度；
- (4) 在碰撞圖上定義障礙物，並轉換此避碰運動規劃問題成爲在碰撞圖（二度平面）上，避開固定障礙物的問題，簡單的方法例如在可視圖上尋找最短路徑的方法，便可用來解決此問題；及
- (5) 解決機器手在二種不同操作模式下的避碰運動規劃問題。

在未來展望上，我們所使用的技巧可繼續擴展，用來解決超過二部機器手的避碰與運動規劃問題，或是針對不定週期運動的機器手，或活動機器人，進行避碰研究，以提昇機器手或機器人的智慧能力。

參 考 文 獻

- [1] D. N. Smith and R. C. Wilson, Industrial Robots: A Delphi Forecast of Markets and Technology, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, 1982.
- [2] W. Tech and X. D. Zhang, "An inexpensive stereoscopic vision system for robots," Int. Conf. on Robotics, Atlanta, Georgia, pp. 186-189, 1984.
- [3] Y. Kuno, et al., "Three-dimensional vision techniques for an advanced robot system," Int. Conf. on Robotics and Automation, Missouri, U. S. A., pp. 11-16, 1985.
- [4] W. F. Clocksin, et al., "An implementation of model-based visual feedback for robot arc welding of thin sheet steel," Int. J. of Robotics Research, Vol. 4, No. 4, pp. 13-26, 1985.
- [5] J. Y. S. Luh and J. A. Klaasen, "A three-dimensional vision by off-shelf system multi-ameras," IEEE Trans. on PAMI, Vol. PAMI-7, No. 1, pp. 35-45, 1985.
- [6] P. S. Yeh, S. Barash, and E. Wysocki, "A vision system for safe robot operation," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1461-1465, 1988.
- [7] J. J. Leou and W. H. Tsai, "A new approach to 3-D robot monitoring by multiple 2-D camera views," MIST Technical Report, No. TR-MIST-C77003, National Chiao Tung Univ., Hsinchu, Taiwan 30050, R. O. C., July 1988; also submitted for publication.
- [8] T. Lozano-Perez, "Spatial planning: a configuration space approach," IEEE Trans. on Computers, Vol. C-32, No. 2, pp. 108-120, 1983.
- [9] T. Lozano-Perez, "A simple motion-planning algorithms for general robot manipulators," IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 3, pp. 224-238, 1987.
- [10] B. H. Lee and C. S. G. Lee, "Collision-free motion planning of two robots," IEEE Trans. on SMC, Vol. SMC-17, No. 1, pp. 21-32, 1987.
- [11] K. Kant and S. W. Zucker, "Toward efficient trajectory planning: the path-velocity decomposition," Int. J. of Robotics Research, Vol. 5, No. 3, pp. 72-89, 1986.
- [12] J. Canny, "Collision detection for moving polyhedra," IEEE Trans. on PAMI, Vol. PAMI-8, No. 2, pp. 200-209, 1988.

- [13] N. Kehtarnavaz and S. Li, "A collision-free navigation scheme in the presence of moving obstacles," IEEE Computer vision and Pattern Recognition, pp. 808-813, 1988.
- [14] B. H. Lee and Y. P. Chien, "Time-varying obstacle avoidance for robot manipulators: approaches and difficulties," Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1610-1615, 1987.
- [15] K. Fujimura and H. Samet, "A hierarchical strategy for path planning among moving obstacles," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 5, No. 1, pp. 61-69, 1989.
- [16] D. Nitzan, "Three-dimensional vision structure for robot applications," IEEE Trans. on PAMI, Vol. PAMI-10, No. 3, pp. 291-309, 1988.
- [17] J. J. Leou and W. H. Tsai, "Optimal sensor arrangement for robot operation monitoring by computer vision," to be accepted by Int. J. of Robotics and Automation after minor revision.
- [18] Y. Hung, P. S. Yeh, and D. Harwood, "Passive ranging to known planar point sets," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, St. Louis, pp. 80-85, 1985.
- [19] R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration techniques for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. 3, No. 4, pp. 323-344, 1987.

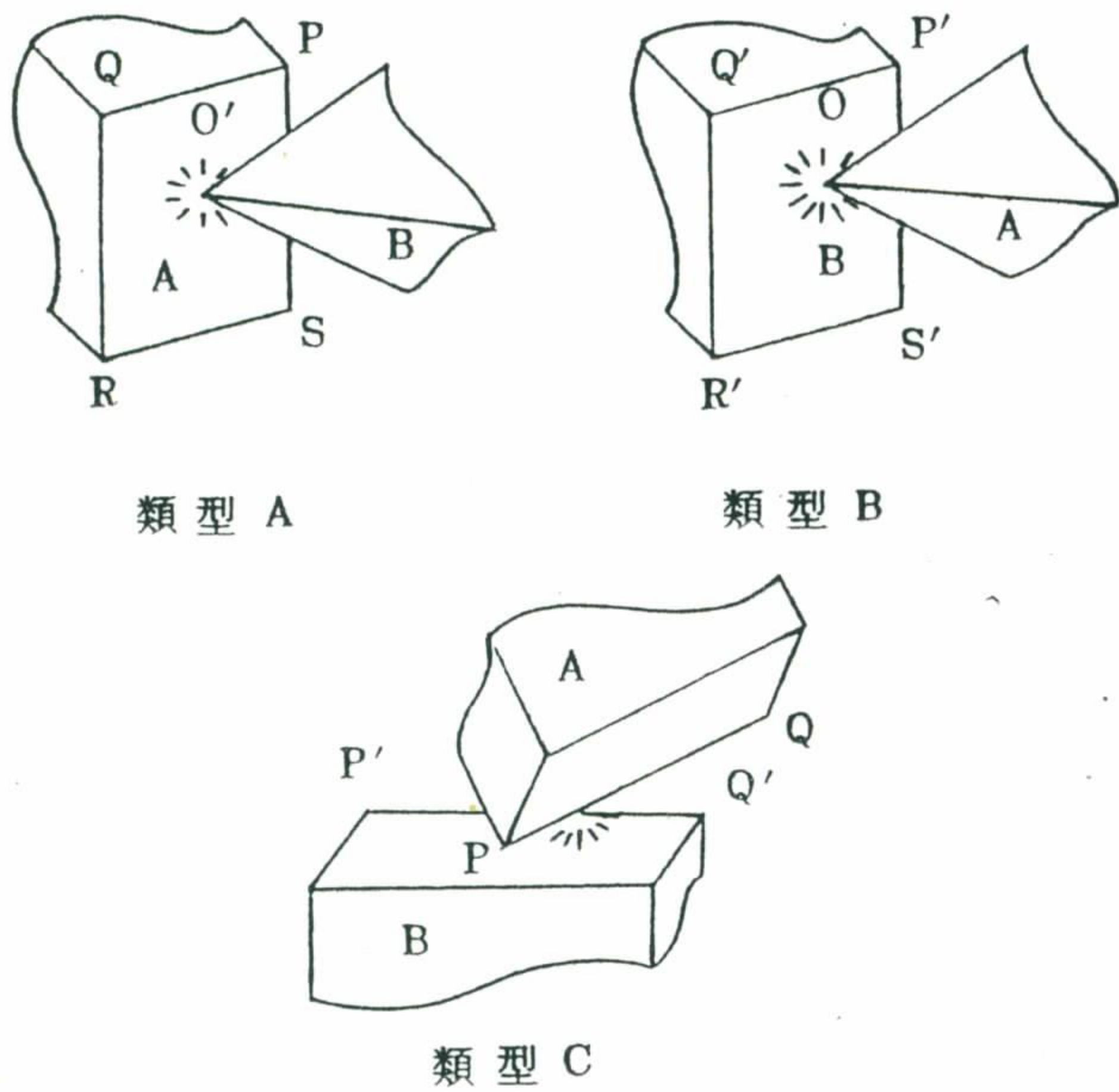


圖1 多面體各類型碰撞。

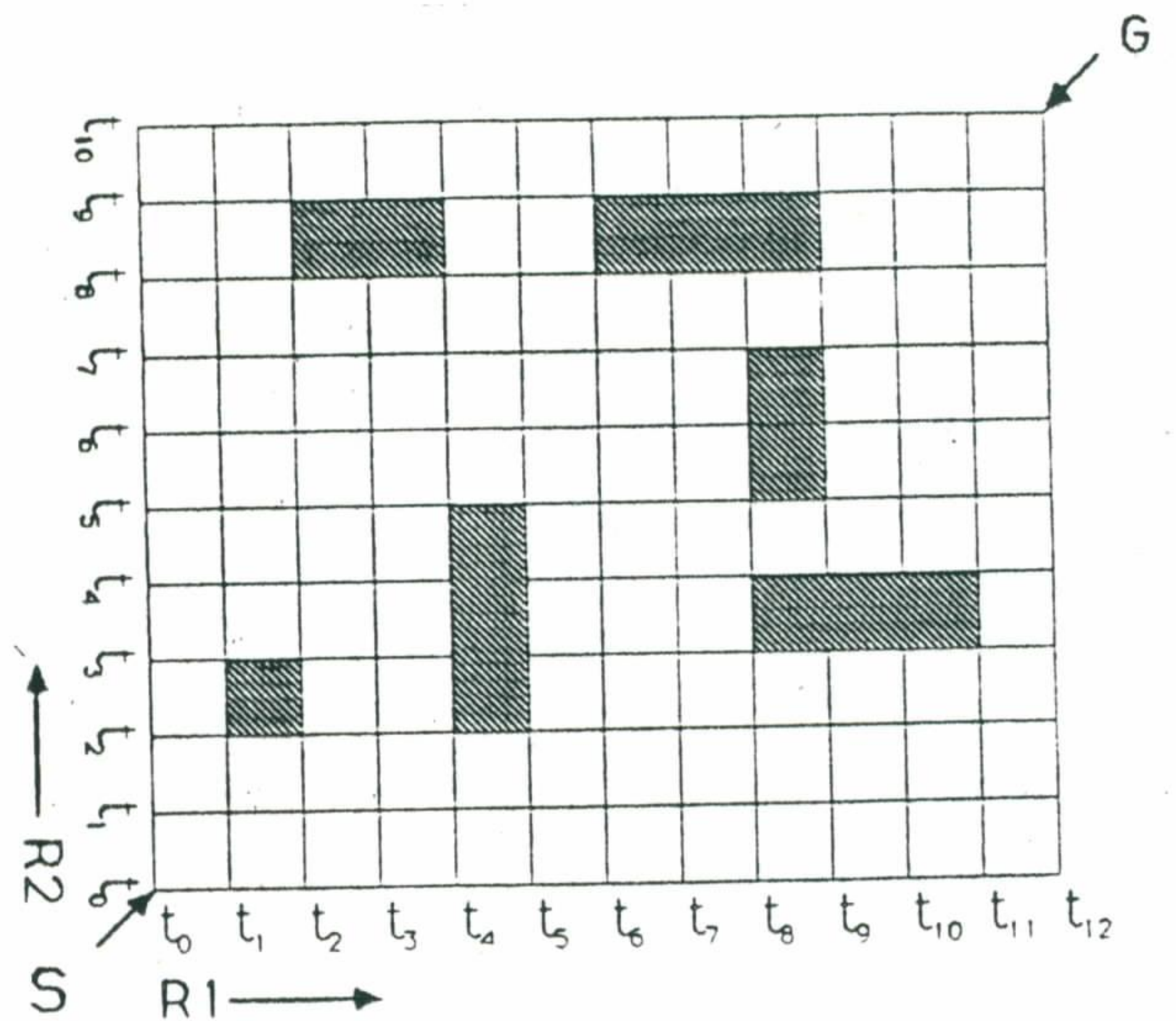


圖2 R1 與 R2 的碰撞圖。

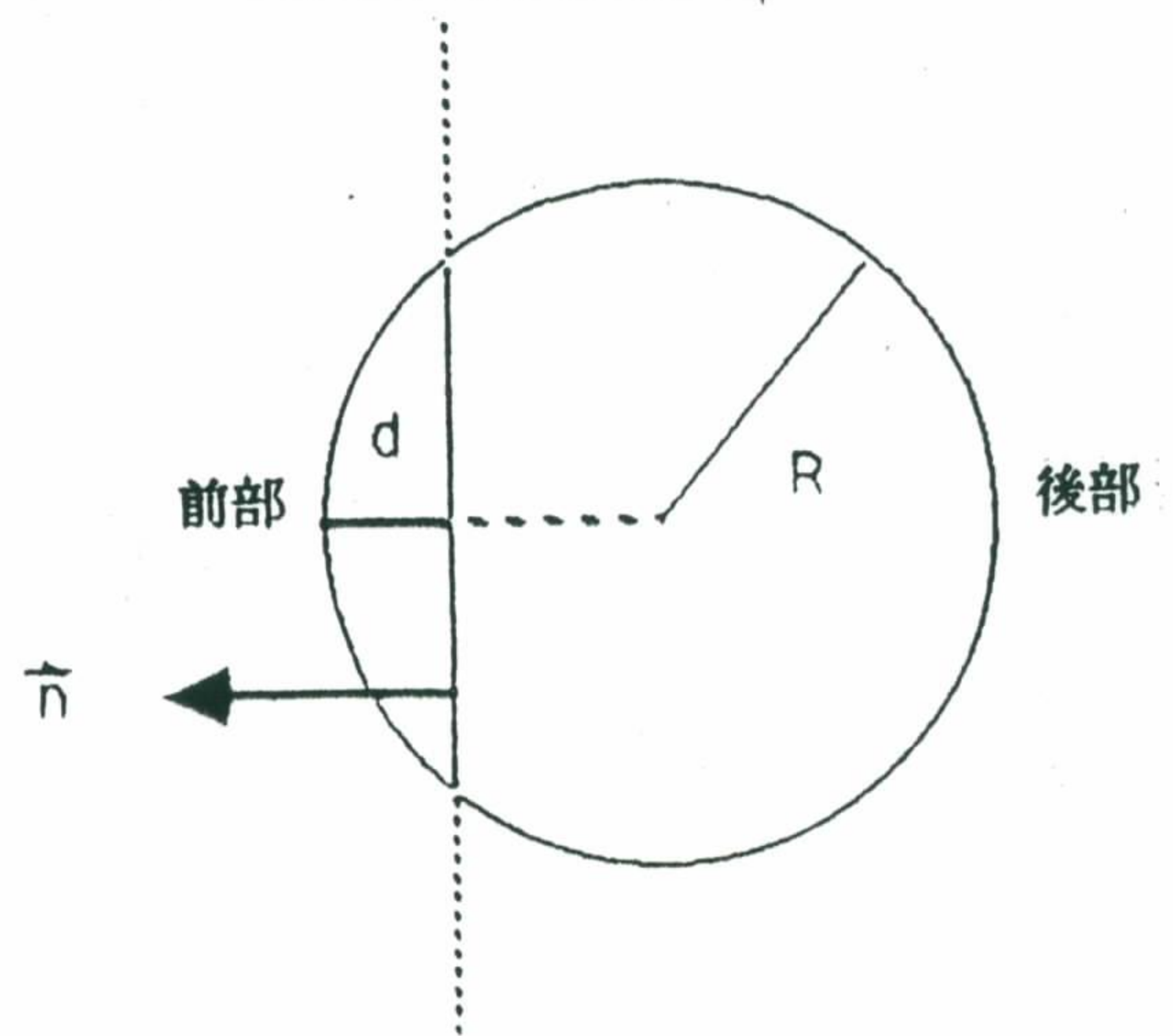


圖3 固定 d 值則外接圓球唯一確定。

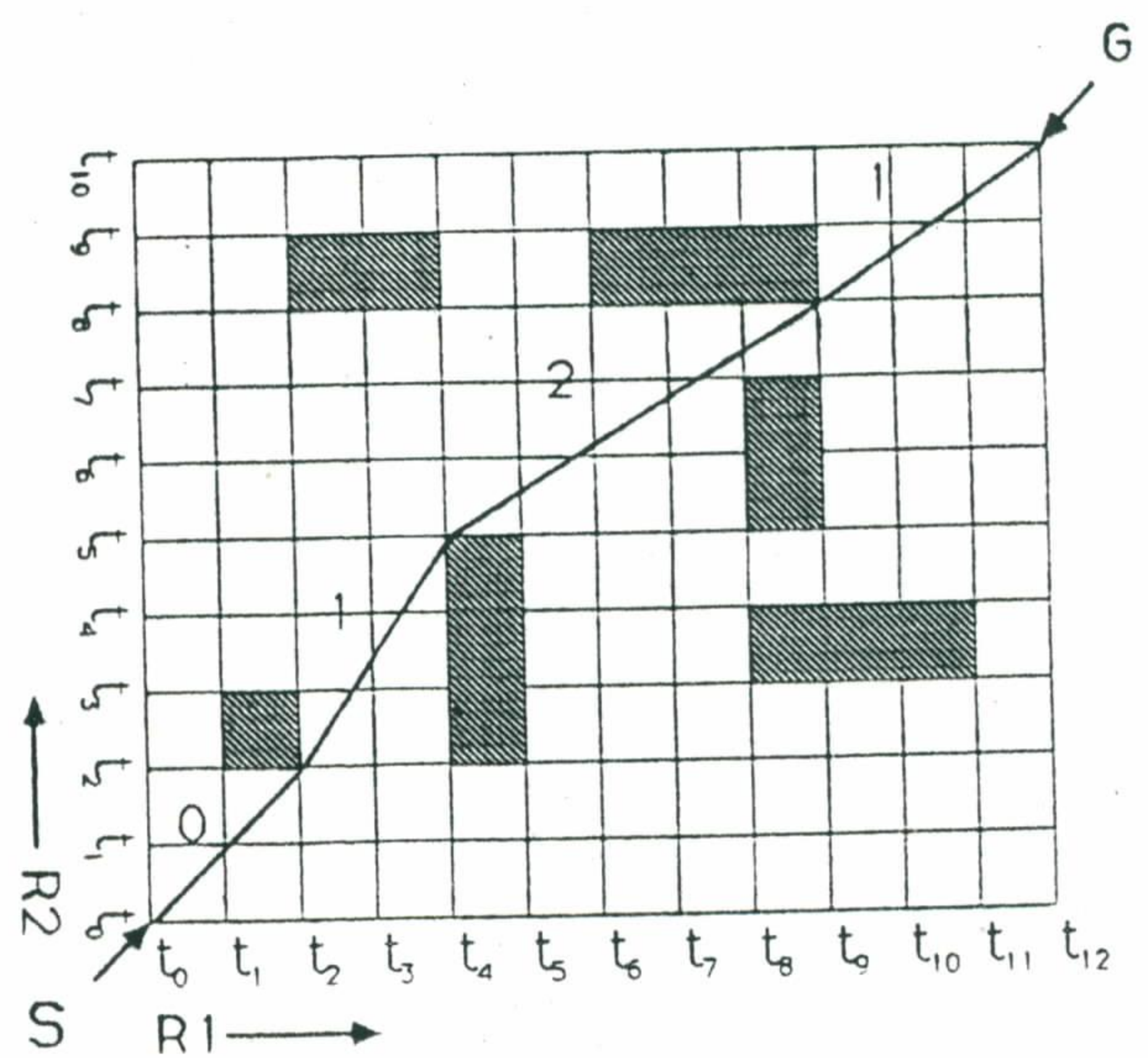


圖4 模式1的規劃結果。

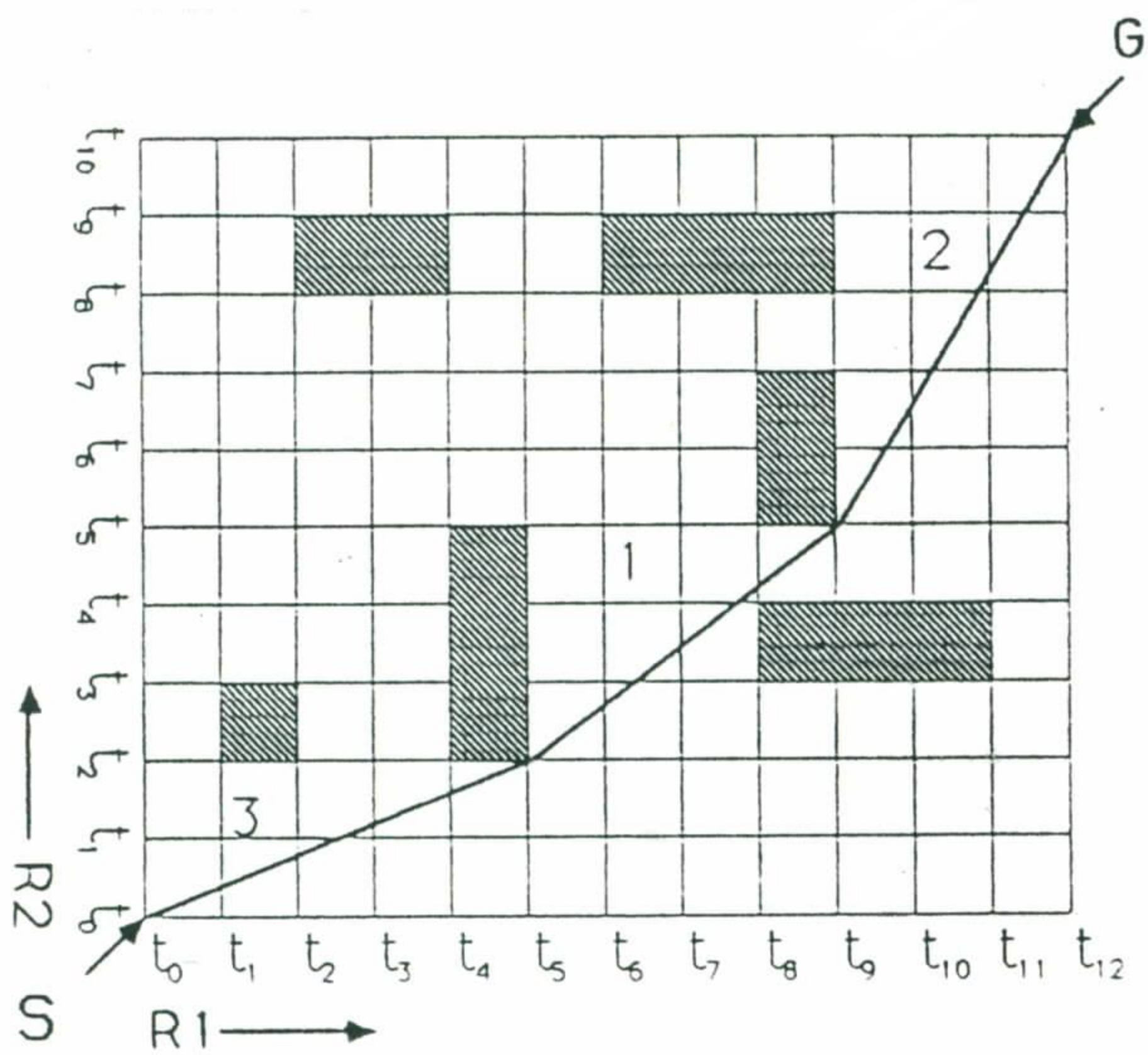


圖5 模式2的規劃結果。

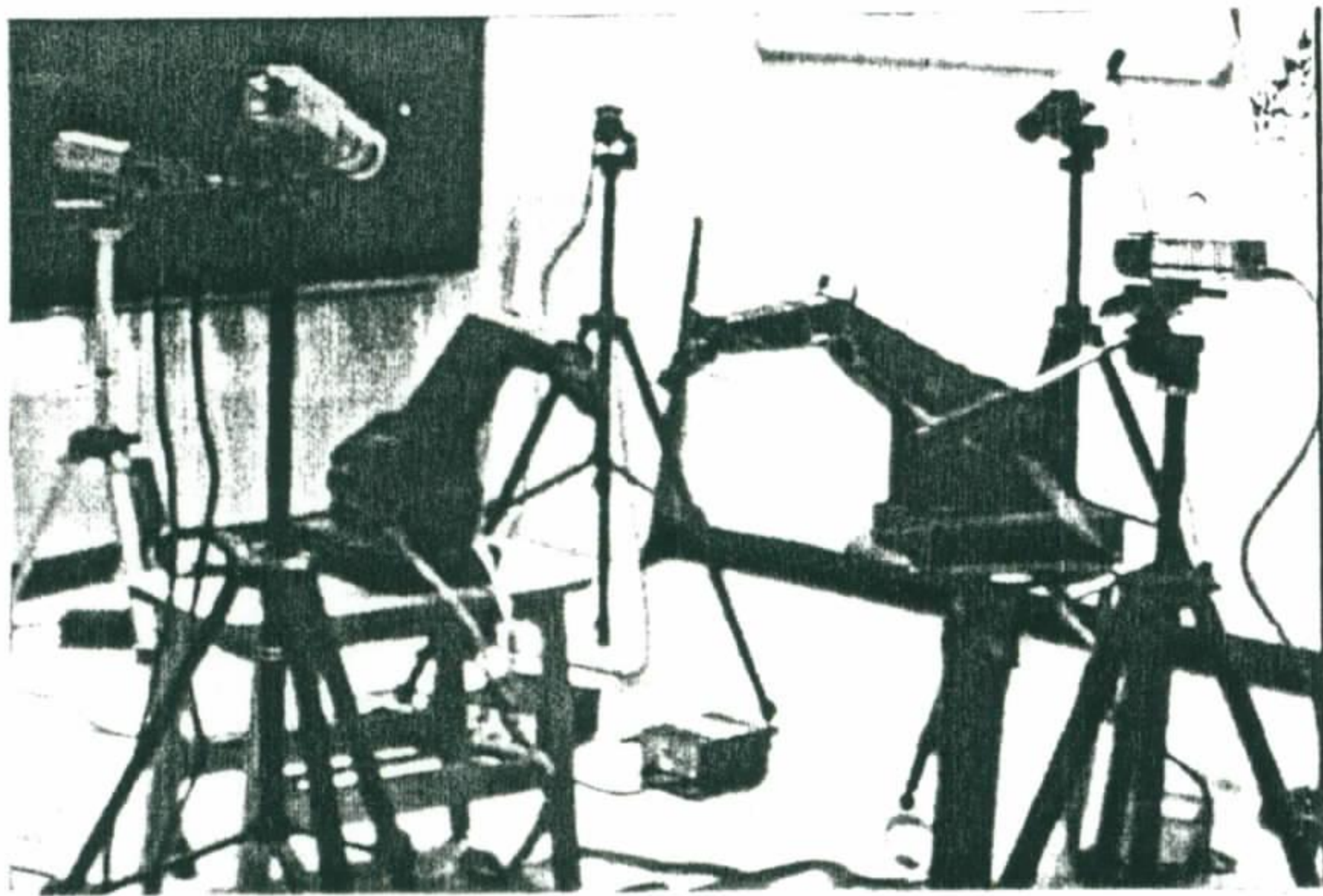
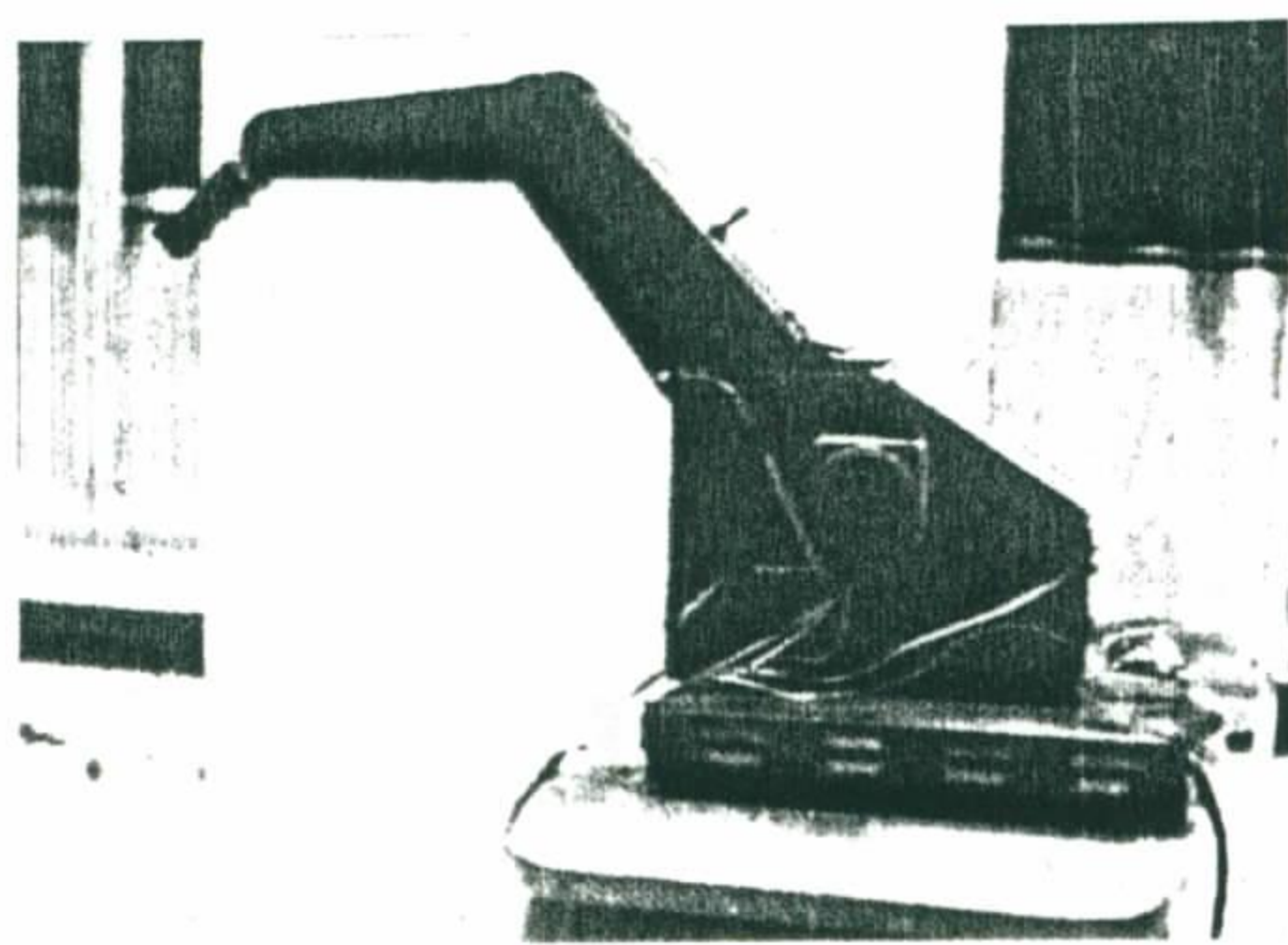


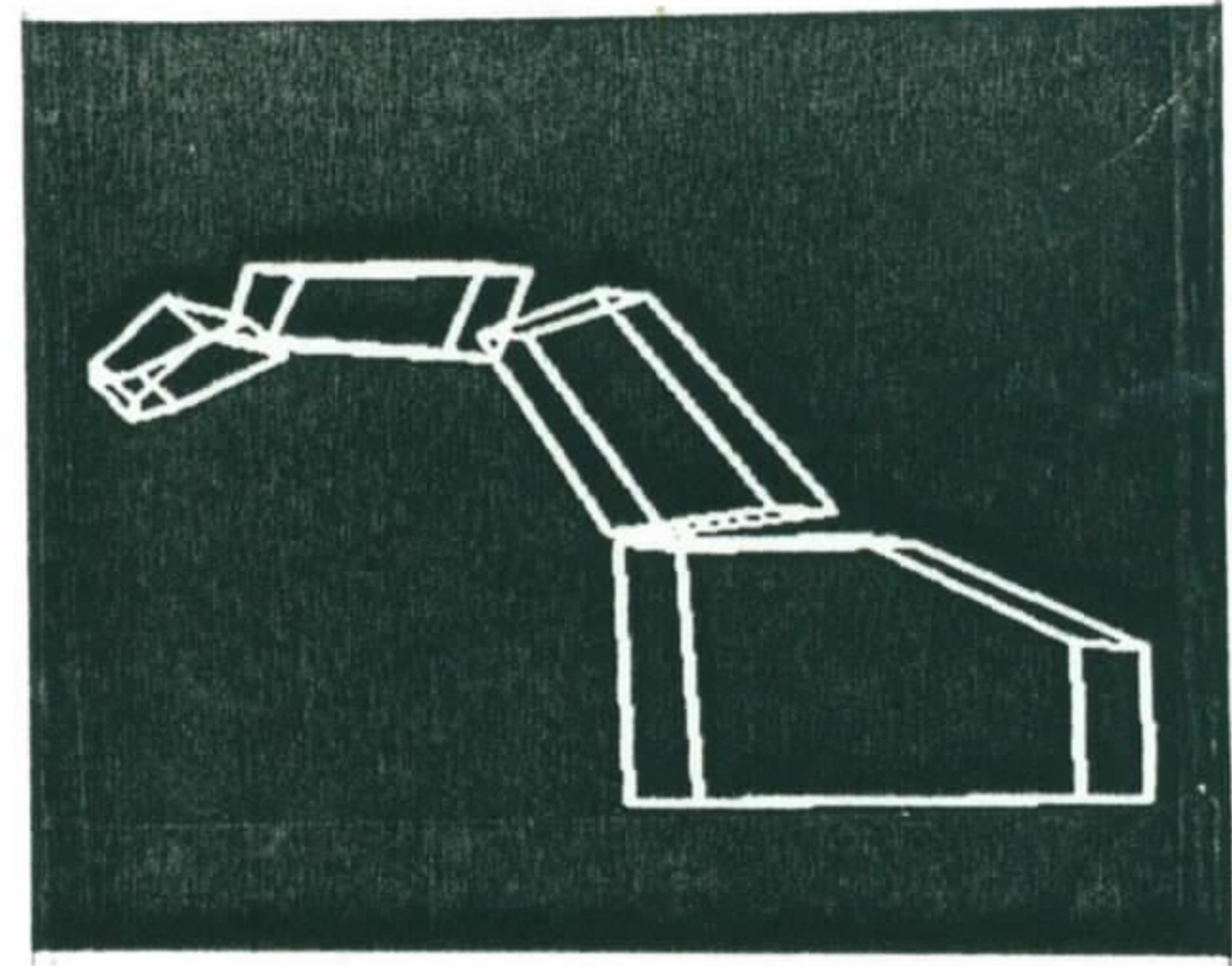
圖6 系統真實架構。



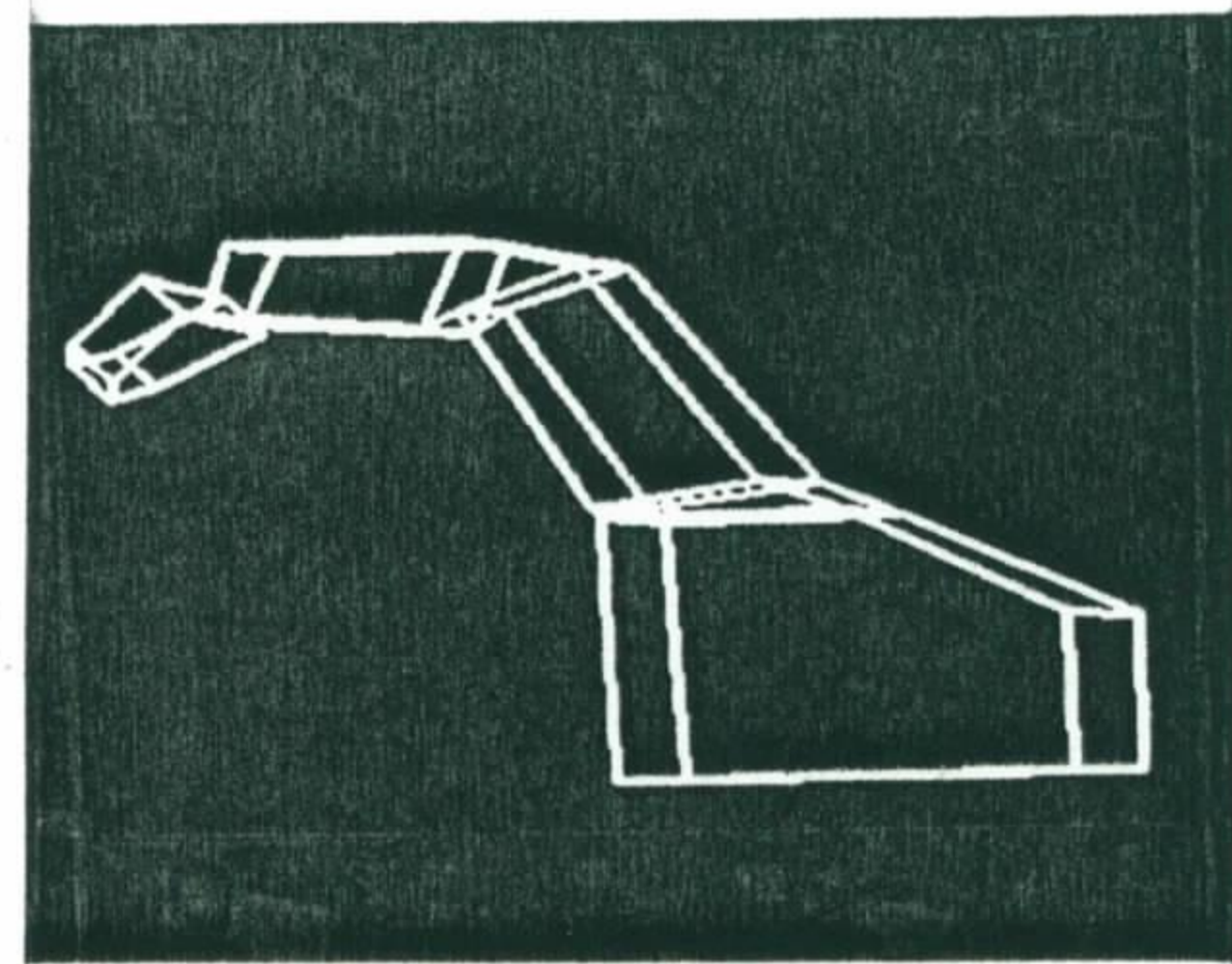
(a) 關節型機器手。

圖7 系統中所使用機器手與近似結果。

- (a) 關節型機器手。
- (b) 使用數個多面體的近似結果。
- (c) 修正後的結果。



(b) 使用數個多面體的近似結果。



(c) 修正後的結果。

圖7 系統中所使用機器手與近似結果。

- (a) 關節型機器手。
- (b) 使用數個多面體的近似結果。
- (c) 修正後的結果(續)。

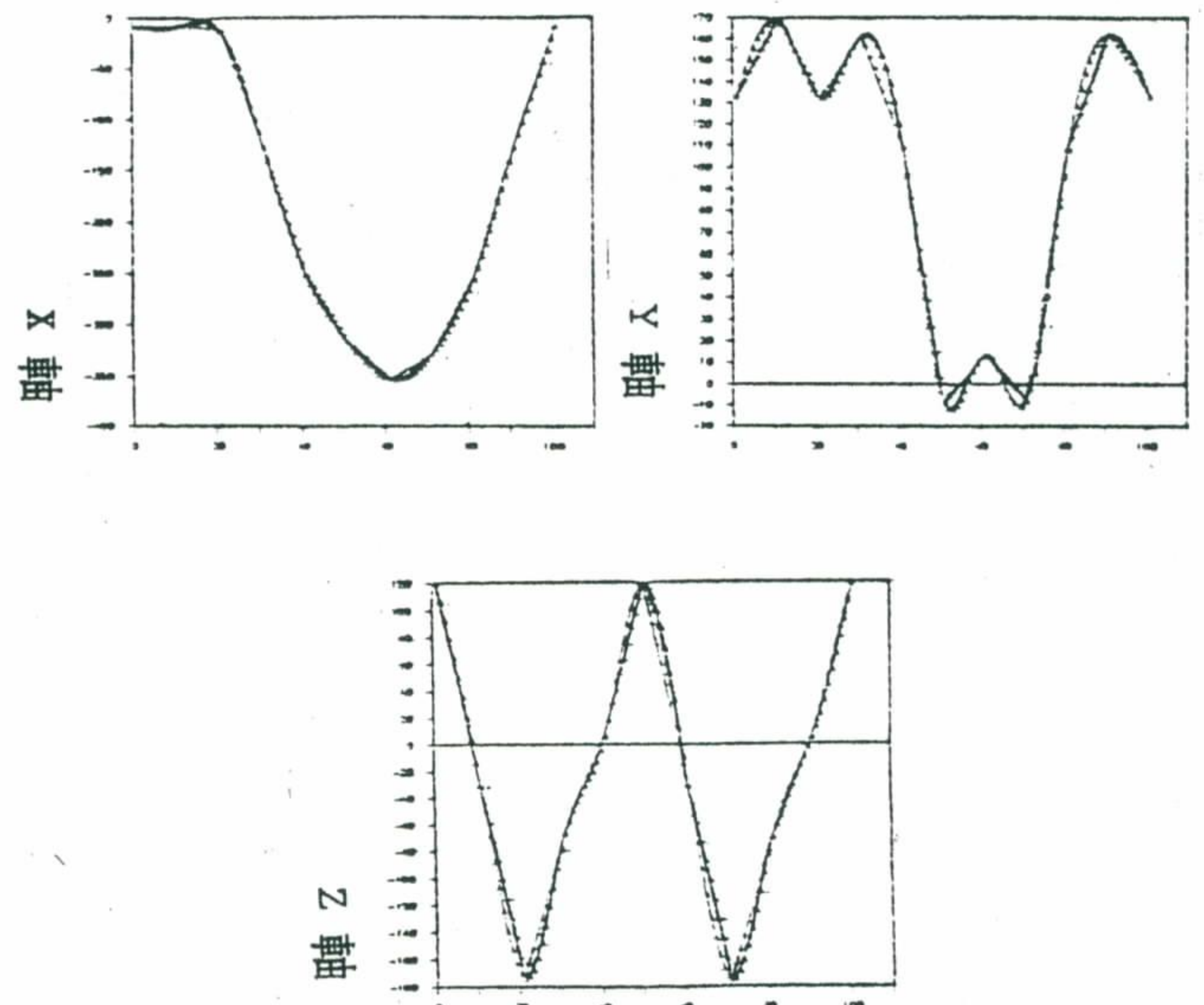


圖8 一次與三次雲形函數擬合軌跡的效果比較。