

視覺系統引導之機器手臂採果之研究

Using Vision-Guided Robot Arm to Pick Fruit on the Tree

國立中興大學農機所碩士

鍾瑞永

Jui-Yung Chung

國立中興大學農機系副教授

李芳繁

Fang-Fan Lee

摘 要

本文主要目的在於建立樹果自動化採收系統之機器手臂採果系統之基本模式，研究內容包括機器手臂運動學及反運動學之相關理論，以期利用機器視覺定位值做為控制機器手臂動作之依據，使其能精確摘取果物。

本機器手臂系統以視覺系統之定位值為控制依據，經視覺系統體座標與機器手臂系統座標轉換後，利用反運動學方程計算出工作空間點之各關節轉角，使機器手能精確摘取果物，同時避免對樹體造成損害。

關鍵詞：機器手臂，採果。

ABSTRACT

The main purpose of this study is to establish a basic model of robot arm system for an automatic citrus fruit picking device. A five-axis robot arm was used in this study. The robot arm was guided by the vision system to the location of the fruit.

The robot system utilized the position values calculated by vision system for the moving control of its arm. After transferring the position values of the target fruit from the world coordinate system of the vision system to the robot coordinate system, the inverse kinematics was applied to compute the rotating angles of each joints of the robot arm. Then, the robot arm moved accurately to the position where the target fruit was located and picked it without damaging the tree.

Keywords: Robot arm, Fruit picking.

一、前 言

近年來，由於勞工短缺，勞力不足，導致工

資上漲、生產成本增加；各產業為了解決這個問題，相繼推動自動化生產，以促進產業升級，提高生產效率，降低生產成本。同時，各種自動化技術

與產品亦相繼問世，機器手臂即為其中之一。機器手臂已被廣泛應用於工業上以取代人工。目前政府有關單位正積極推動農業自動化，因此機器手臂在農業上的應用亦逐漸增加。本研究使用由立體視覺系統偵測出的樹果3D位置導引機器手臂採摘果物，希望建立以機器人自動採收樹果的技術。

二、文獻探討

(一)機器手臂[4]

機器手臂基本上可視為一系列連桿(link)的組合，在其相鄰兩連桿之間，係由關節(joint)加以連接。關節的型態大致可分為旋轉型關節(rotational joint)與平移型關節(prismatic joint)兩種，因旋轉型關節運動時各連桿間可能產生互動現象，故一般認為其精度較平移型關節者為差。

通常實用性的機器手臂具有六個關節，可任意決定所攝取物體在空間中的位置及方向，其中三個關節的運動決定機器手臂手指夾持的物體在3D空間中的位置，另外三個則用以決定其方向。超過六個關節的機器手臂則泛稱為重複式機器手臂(redundant arm)，表示其中六軸以外的其他關節運動，可以用以避免手指夾持物體在行進運動中碰撞到其它障礙物。

(1)連桿座標轉換系統

機器手臂以一個關節來決定其運動方向或運動位置，因此一般定義其為一個自由度(degree of freedom)。其連桿間的座標轉換通常由四個轉換矩陣所組成，其中包括對Z軸的平移(d)和旋轉(θ)以及對X軸的平移(a)和旋轉(α)，其通式如(2.1)式所示：

$${}^{i-1}A_i = T_{z,d} T_{z,\theta} T_{x,a} T_{x,\alpha} \dots \dots \dots (2.1)$$

若機器手臂具有六個自由度，則其指尖相對於基座之轉換矩陣(0T_6)，如(2.2)式：

$${}^0T_6 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 \dots \dots \dots (2.2)$$

(2)尤拉角(Euler Angle)轉換矩陣表示法

此法假設 ϕ 為對Z軸旋轉之角度， θ 為對X軸旋轉之角度， ψ 為對Y軸旋轉之角度，其優點是可將物體位置與方向的儲存參數減低至六個元素(XYZ ϕ θ ψ)，但因本法不考慮各軸的平移

量，所以僅能表示出機器手臂指尖相對於基座之方向。其轉換矩陣如(2.3)式：

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} c\phi c\psi - s\phi c\theta s\psi & -c\phi s\psi - s\phi c\theta c\psi & s\phi s\theta & P_x \\ s\phi c\psi + c\phi c\theta s\psi & -s\phi s\psi + c\phi c\theta c\psi & -c\phi s\theta & P_y \\ s\theta s\psi & s\theta c\psi & c\theta & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.3)$$

其中， $s\phi = \sin\phi$ ， $c\phi = \cos\phi$ ，餘類推。

(3)RPY轉換矩陣表示法

此法定義 ψ 為對X軸旋轉之角度(yaw)， θ 為對Y軸旋轉之角度(pitch)， ϕ 為對Z軸旋轉之角度(roll)，此法如尤拉角法，亦僅能表示出指尖之方向。其轉換矩陣如(2.4)式所示：

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} c\phi c\theta & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi & P_x \\ s\phi c\theta & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & P_y \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.4)$$

(4)機器手臂反運動學

機器手臂反運動學主要用於當給定一空間位置時，能夠以此位置推算出各軸之轉角，使機器手臂之指尖運動到此一給定點上。由於能夠到達某一指定點之各軸轉角可能有兩組以上，亦即有數條路徑可到達，因此需考慮機器手臂硬體限制及其工作路線有無障礙物，來加以做適當的路徑規劃。

以尤拉角法為例，在求解前可先定義(2.2)式中的轉換矩陣(0T_6)之轉動矩陣部份為：

$$\begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix} = R_{z,\phi} R_{y,\theta} R_{x,\psi} \dots \dots \dots (2.5)$$

其中，n係normal vector，以平行夾爪之機器手臂為例，其方向與機器手臂爪指正交(orthogonal)；s代表sliding vector，方向與爪指關閉方向平行；a則表示approach vector，方向定義為指尖所指方向。

若以前乘法(premultiply)求解反運動方程，則可將(2.5)式中之 $R_{z,\phi}$ 矩陣，移到方程式的左邊成 R_z^{-1} ，以方程式左右兩側之矩陣元素對稱相等性質，分別求出三轉角 ϕ 、 θ 、 ψ 。若以後乘法

(postmultiply) 求解反運動方程，則可將 (2.5) 式中之 R_w, ϕ 矩陣，移到方程式左側第二項變成爲 R_w^{-1}, ϕ ，以方程式左右兩側之矩陣元素對稱相等性質，分別求出三轉角 ϕ 、 θ 、 ψ 。至於，前乘、後乘法的決定，則取決於使用者直覺所定的方向，定義出一適當求解機器手臂反運動方程的方法。

(二) 機械手臂在農業上之應用

隨著科技的進步及勞力的短缺，有關機器手臂在農業上的應用之研究逐漸增加。Trevelyan等 (1984) [10] 使用機器手臂修剪羊毛。Hwang與Sistler (1986) [6] 把一具5個自由度的機器手臂裝置於一臺商用機械式移植機上，將甜椒苗從苗盤上抓起，之後將苗投入移植機的導孔進行移植。Kutz等 (1987) [7] 使用Puma560機器人將種苗盤中的種苗移植到生長苗盤上，植滿一36孔穴之生長苗盤需時3.3分鐘。Simonton (1990) [8] 發展一機器人工作室，使用機器人將天竺葵之切枝加以修剪、去葉、分級與插植。Harrell等 (1990) [5] 設計一具由視覺系統導引之特殊機器手臂進行柑橘採摘研究。Ting等 (1990) [9] 對種苗移植機器人工作室之不同佈置及物料流程進行研究。張與陳 (1993) [1] 使用機器手臂將由視覺系統分級的水果移至不同的位置。

三、理論模式

本研究討論以機器手臂就視覺系統給定的空間位置點，利用機器手臂反運動方程，計算出各軸轉動角度，使機器手臂爪指到達所定位樹果處，以建立自動化果物採收系統之基本模式。欲達成此項目標，必須對機器手臂運動學及反運動學有所了解[4][3]。

(一) 機器手臂運動學

如(1)節所述，連桿座標系統i-1與座標系統i之轉換矩陣爲：

$${}^{i-1}A_i = T_{z,d} T_{z,\theta} T_{x,\alpha} T_{x,\phi} \dots \dots \dots (3.1)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中

$$T_{z,d} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3.1a)$$

$$T_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3.1b)$$

$$T_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3.1c)$$

$$T_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3.1d)$$

其反矩陣如 (3.2) 式：

$$({}^{i-1}A_i)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 & -a_i \\ -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & \sin \alpha_i & -d_i \sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i \sin \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & \cos \alpha_i & -d_i \cos \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3.2)$$

若機器手臂具有五個自由度，則其指尖相對基座之轉換矩陣 (0T_5)，如 (3.3) 式：

$${}^0T_5 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 \dots \dots \dots (3.3)$$

本研究使用之機器手臂爲CS-113型，依研究用途定義其爲六連桿及五關節，如3.1節之討論，連桿編號係由基座起定義爲0，關節編號由基座與第一連桿(本體)間之關節起定義爲1，而座標系亦由此起定義爲座標系0。因關節5設定爲爪指之開閉關節，故運動學理論推導時，均設其 θ 轉角爲0。依3.2節之討論及上述之基本座標定義，求得連桿參數如表3.1。而各座標系統設定則如圖3.1所示。

依序將各連桿參數代入 (3.1) 式求出各座標系相互間的轉換矩陣： 0A_1 、 1A_2 、 2A_3 、 3A_4 以及 4A_5 ，再將這五個轉換矩陣代入 (3.3) 式，即可推導出機器手臂爪指相對於基座之方向與位置向

表 3.1 機器手臂連桿參數

關節	d_i	θ_i	a_i	α_i
1	-160	0	0	-90
2	0	45	197	0
3	0	-45	150	0
4	0	0	0	90
5	0	0	98	0

量，如下所示：

$$\begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中，左上角九個元素為方向旋轉矩陣， $\{P_x, P_y, P_z\}$ 則為位置向量矩陣。

(二) 機器手臂反運動學

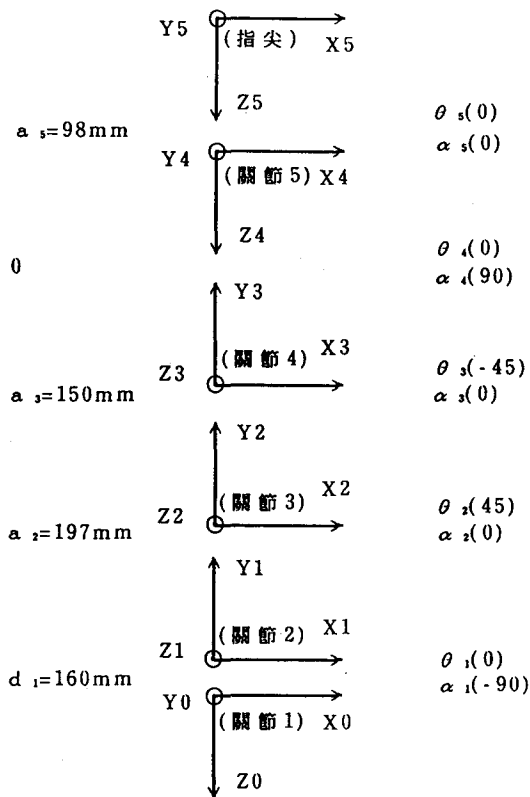


圖 3.1 機器手臂座標設定

當給定機器手臂爪指之空間運動點時，必須利用此點推算出各關節轉角 (θ)，使爪指能正確運動至該點位置，此推算過程即為反運動學方程推導。本研究使用運動方程 (3.3) 式，將A轉換矩陣移至方程式左側，利用前乘法求解反運動方程如下：

$$({}^0A_1)^{-1} {}^0T_5 = {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 \dots \dots \dots (3.4)$$

利用乘開後之左右兩矩陣各相對元素對應相等的方式，依次推算出各關節轉角，其左側矩陣為：

$$\begin{bmatrix} c_1 n_x + s_1 n_y & c_1 s_x + s_1 s_y & c_1 a_x + s_1 a_y & c_1 p_x + s_1 p_y \\ -n_x & -s_x & -a_x & d_1 - p_x \\ -s_1 n_x + c_1 n_y & -s_1 s_x + c_1 s_y & -s_1 a_x + c_1 a_y & -s_1 p_x + c_1 p_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

右側矩陣設 $\theta_5 = 0$ ，得：

$$\begin{bmatrix} c_{234} & 0 & s_{234} & c_{234} a_5 + a_3 c_{23} + a_2 c_2 \\ s_{234} & 0 & -c_{234} & s_{234} a_5 + a_3 s_{23} + a_2 s_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其中 $s_1 = \sin \theta_1$ ， $c_1 = \cos \theta_1$ ， $s_{234} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$ ， $c_{234} = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$ ，餘類推。

其轉角反推次序如下：

(1) 求 θ_1 ：

利用矩陣元素(3,4)對應相等得：

$$-s_1 p_x + c_1 p_y = 0,$$

$$\text{所以 } \theta_1 = \tan^{-1} \frac{p_y}{p_x} \dots \dots \dots (3.5)$$

(2) 求 θ_{234} ：

利用元素(1,3)對應相等得：

$$c_1 a_x + s_1 a_y = s_{234},$$

利用元素(2,3)對應相等得：

$$-a_x = -c_{234},$$

$$\text{得 } \theta_{234} = \tan^{-1} \frac{c_1 a_x + s_1 a_y}{a_x} \dots \dots \dots (3.6)$$

(3) 求 θ_3 ：

利用元素(1,4)對應相等得：

$$c_1 p_x + s_1 p_y = c_{234} a_5 + a_3 c_{23} + a_2 c_2,$$

利用元素(2,4)對應相等得：

$$d_1 - p_x = s_{234} a_5 + a_3 s_{23} + a_2 s_2,$$

$$\text{令 } C = c_1 p_x + s_1 p_y - c_{234} a_5 = a_3 c_{23} + a_2 c_2 \quad (3.7)$$

$$D = d_1 - p_x - s_{234} a_5 = a_3 s_{23} + a_2 s_2 \quad \dots \quad (3.8)$$

$$\text{可得 } c_3 = \frac{C^2 + D^2 - a_3^2 - a_2^2}{2a_2a_3}$$

$$s_3 = \pm \sqrt{1 - c_3^2}$$

$$\text{所以 } \theta_3 = \tan^{-1} \frac{\pm 2a_2a_3\sqrt{1 - c_3^2}}{C^2 + D^2 - a_3^2 - a_2^2} \dots\dots\dots (3.9)$$

(4) 求 θ_2 :

利用(3.8)及(3.9)二式, 得 :

$$C = a_3c_{23} + a_2c_2 = (a_3c_3 + a_2)c_2 - a_3s_3s_2$$

$$D = a_3s_{23} + a_2s_2 = a_3s_3c_2 + (a_3c_3 + a_2)s_2$$

$$\text{得 } c_2 = \frac{(a_3c_3 + a_2)C + a_3s_3D}{(a_3c_3 + a_2)^2 + (a_2s_3)^2}$$

$$s_2 = \frac{(a_3c_3 + a_2)D - a_3s_3C}{(a_3c_3 + a_2)^2 + (a_2s_3)^2}$$

$$\text{所以 } \theta_2 = \tan^{-1} \frac{(a_3c_3 + a_2)D - a_3s_3C}{(a_3c_3 + a_2)C + a_3s_3D} \dots (3.10)$$

$$(5) \theta_4 = \theta_{234} - \theta_2 - \theta_3 \dots\dots\dots (3.11)$$

若反運動方程運算時之已知條件僅有位置向量, 亦即未知 $[n_x, n_y, n_z]$ 、 $[s_x, s_y, s_z]$ 及 $[a_x, a_y, a_z]$ 三方向向量, 則上述各轉角計算式將出現許多未知數, 而無法順利求解。因此, 本研究求解反運動方程時, 先設定 θ_5 為 0, 再以 p_x 及 p_y 值求解 θ_1 , 而 θ_{234} 之轉角計算式因含 a_x 、 a_y 、 a_z 等未知數, 故以 -180 至 $+180$ 之角度疊代, 以求出 θ_2 、 θ_3 以及 θ_4 等轉角。

(三) 體座標與機器手臂座標之轉換

由立體視覺系統定位出之目標物 3D 位置, 係相對於以左側攝影機之轉軸中心為原點之體座標, 因此在給予機器手臂爪指工作位置前, 需先將視覺系統定位值轉換成以機器手臂基座為原點之三維空間座標值, 方能進行各軸轉角之反運動學推導。其轉換方程式如下:

$$C_{robot} = R^{vision} T_{robot} C_{vision} \dots\dots\dots (3.12)$$

其中, C_{robot} 為機器手臂座標系統值, R 為自視覺體座標系統轉換至機器手臂座標系統時, 三座標軸之旋轉轉換矩陣; C_{vision} 為視覺系統體座標值; 而 $^{vision}T_{robot}$ 則為此兩座標系統間之平移轉換矩陣, 如下所示:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -T_x \\ 0 & 1 & 0 & -T_y \\ 0 & 0 & 1 & -T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

四、試驗設備與方法

(一) 試驗設備

- (1) 彩色 RGB CCD 電視攝影機 (XC-711, SONY)
- (2) 彩色影像擷取器 (CFG, Imaging Technology Inc.)
- (3) 主電腦 (精英 PC-80486)
- (4) 影像監視器 (PVM-1342Q, SONY)
- (5) 多關節機器手臂 (CS-113, 固特企業公司)

本型機器手臂具有五個自由度, 亦即具有五個關節, 其關節均為旋轉型關節, 由步進馬達驅動。圖 4.1 表示此型機器手臂左側視圖。

如圖, 若以人體手臂構造與機器手臂對照, 則 CS-113 機器手臂可分為: 本體 (main body)、肩部 (shoulder)、肘部 (elbow)、腕部及手指 (gripper), 其作動範圍分析如下:

本體: 係由馬達 1 所驅動, 藉齒輪傳動使本體左右旋轉, 範圍為 ± 120 度, 以順時針為正 (因座標系 Z_0 方向向下)。本體定義為連桿 1。

肩部: 由馬達 2 配合齒輪組驅動使肩部上下彎曲運動, 範圍為 ± 70 度, 以向上為正。肩部定義為連桿 2。

肘部: 由馬達 3 驅動配合鏈條、滾軸與齒輪組之傳

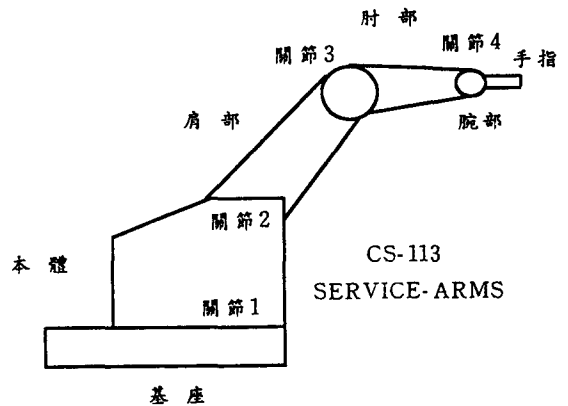


圖 4.1 機器手臂左側視圖及參考位置

動，使其上下彎曲運動，範圍為±50度，以向上為正。軸部定義為連桿3。

腕部：本研究設定其動作方向為上下運動，並定義其為連桿4，其運動範圍為±90度，向上為正。

手指：配合鋼絲控制手指閉、合，定義其為連桿5，張開最大距離為45mm。

(一)目標果物3D位置之析出[2]

本研究使用由雙眼立體機器視覺系統求出的目標果物三度空間位置，以引導機器手臂進行採摘。本機器視覺系統使用通用立體攝影機幾何模型，以分置不同位置之兩部攝影機同時擷取目標區之影像。之後，以果物的色相及彩度值為標準分割原始影像，判別影像中是否含有目標果物。若影像中含有果物，則打出雷射光點，以便搜尋不同兩張影像之對應點。對應點找出後，才能使用3D定位計算式，求出目標果物之三度空間位置。

(二)機器手臂系統研究方法

由於本手臂並未加上任何回授 (feed-back) 元件作位置檢測，因此上述有關其操作範圍係為各關節相對參考位置的最大操作範圍，其參考位置圖如圖(4.1)，至於其定義則如3.3節機器手臂運動學理論推導之座標設定以及連桿參數設定所示。

當各關節同時轉動時，此時關節2、3、4將會互相影響。以關節2轉動時為例，若關節3、4不做適當轉動，則連桿2（肩部）與連桿3（肘部）以及連桿3與連桿4（腕部）之相對關係將會變化，而不符合機器手臂運動學理論，致使指爪尖端無法正確到達工作位置。為校正此一誤差，本研究推導出關節2、3、4轉動時之相對關係分別如下：

(1)關節3對關節2：

當關節2轉動1度時，關節3需相對轉動0.510197度，其計算式如下：

$$(0.083333/0.116667)^2=0.510197$$

其中0.116667及0.083333係關節2與關節3轉動角度與轉動步數之轉換比值，當關節2轉動1步時等於轉動0.116667度，關節3轉動1步時等於轉動0.083333度。

(2)關節4對關節2：

當關節2轉動1度時，關節4需相對轉動0.734690度，其計算式如下：

$$(0.1/0.116667)^2=0.734690$$

其中0.1為關節4角度與步數之轉換比值。

(3)關節4對關節3：

當關節3轉動1度時，關節4需相對轉動1.2度，其計算式如下：

$$(0.1/0.083333)=1.2$$

當視覺系統計算出的目標物體座標定位值經(3.12)式轉換為機器手臂系統座標後，便可以目標物相對機器手臂基座的空間位置，利用反運動學方程理論推導出各軸轉角，使爪指正確擷取到目標果物。至於反運動學推導各軸轉角時必須考慮各關節轉角限制、機器手臂硬體結構限制以及上述關節2、3、4之相對關係，因此實驗定義各關節轉角極限如下：

$$\text{關節1：} |\theta_1| < 120^\circ$$

$$\text{關節2：} |\theta_2 - 45^\circ| < 70^\circ$$

$$\text{關節3：(1) } \theta_3 < 0^\circ$$

$$\text{：(2) } |(\theta_2 - 45^\circ)1.510197 + \theta_3 + 45^\circ| < 50^\circ$$

$$\text{關節4：} |(\theta_2 - 45^\circ)0.734690 + (\theta_3 + 45^\circ)1.2 + \theta_4| < 90^\circ$$

四果物擷取路徑

由於果物定位點位於其表面，因此為正確擷取果物，其3D定位值之Z分量需再加上果物之半徑，使定位點位於目標果物之形心處。另外，若機器手臂直接運動至定位點其爪指勢必會碰觸到果物，為避免此一動作對果物的傷害，本研究規劃機器手臂爪指先運動至果物下方，待張開爪指後，再運動至目標果物定位點。

(五)實驗流程

本實驗使用視覺系統析出之果物定位值做為機器手臂計算各軸轉動角度之依據。其流程包括視覺系統3D定位值之析出、視覺系統座標轉換至機器手臂系統座標、反運動學運算、路徑規劃、機器手臂擷取目標果物以及機器手臂返回參考位置等，如圖4.2實驗操作流程所示。

五、結果與討論

由視覺系統析出之目標果物3D位置經前述之實驗方法求出各軸轉動角度，將爪指移至果物所在位置。實驗結果列於表5.1至表5.3，包括目標果物相對視覺系統座標之位置，到達第一工作點各軸轉動角度以及到達第二工作點各軸轉動角度。如4.3節之敘述，第一工作點係在目標果物之下方，第二工作點係在目標果物之形心處。

如機器手臂運動學之討論，因旋轉型關節之機器手臂運動時，各連桿間可能產生互動現象，故一般認為平移型關節之機器手臂動作精度優於旋轉型關節之機器手臂。以本研究所使用之CS-113型機器手臂為例，因係屬旋轉型關節機器手臂，其關節除本體獨立旋轉外，其他關節2、關節3及關節4則會相互影響。當關節2轉動時，會影響關節3及關節4，而關節3轉動時會影響關節4。

為校正上述之誤差，本文於4.2節推導出關節2、3、4轉動時之相對關係，但此相對關係式係屬經驗公式，因此仍會有些許誤差，當各關節轉動

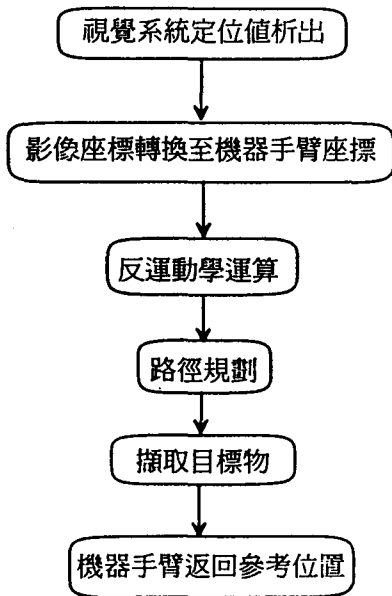


圖 4.2 實驗操作流程

角度大時，所造成的誤差將較大。所以本研究機器手臂動作之誤差主要在於關節2、3、4之轉動誤差，而所造成的結果則是爪指抓取目標果物時，其工作位置可能略低或略高於定位值（誤差小於4mm），但均能抓取到果物，只是抓取點並不位於果物之形心處。至於抓取點之左右方向，則因關節1係獨立轉動，所以甚為準確。

六、結 論

本研究使用由立體機器視覺系統求得的樹果

表 5.1 實驗結果(-)

目標果物相對於視覺系統座標之位置	$X=-80.00\text{mm}$, $Y=-31.00\text{mm}$, $Z=926.00\text{mm}$
目標果物相對於機器手臂座標之位置	$x=253.687\text{mm}$, $y=-297.664\text{mm}$, $z=-298.961\text{mm}$
到達第一工作點各軸轉動角度	$\theta_1=-49.561^\circ$, $\theta_2=47.107^\circ$ $\theta_3=-62.857^\circ$, $\theta_4=15.750^\circ$
到達第二工作點各軸轉動角度	$\theta_1=-49.561^\circ$, $\theta_2=47.397^\circ$ $\theta_3=-42.016^\circ$, $\theta_4=-1.381^\circ$

表 5.2 實驗結果(-)

目標果物相對於視覺系統座標之位置	$X=-55.00\text{mm}$, $Y=-30.00\text{mm}$, $Z=881.00\text{mm}$
目標果物相對於機器手臂座標之位置	$x=193.442\text{mm}$, $y=-323.152\text{mm}$, $z=-311.212\text{mm}$
到達第一工作點各軸轉動角度	$\theta_1=-59.095^\circ$, $\theta_2=52.618^\circ$ $\theta_3=-68.354^\circ$, $\theta_4=15.736^\circ$
到達第二工作點各軸轉動角度	$\theta_1=-59.095^\circ$, $\theta_2=49.232^\circ$ $\theta_3=-48.464^\circ$, $\theta_4=-0.768^\circ$

表 5.3 實驗結果(三)

目標果物相對於視覺系統座標之位置	X=-156.00mm, Y=-32.50mm, Z=938.00mm
目標果物相對於機器手臂座標之位置	x=261.820mm, y=-223.164mm, z=-299.941mm
到達第一工作點各軸轉動角度	$\theta_1 = -40.443^\circ$, $\theta_2 = 60.210^\circ$ $\theta_3 = -87.332^\circ$, $\theta_4 = 27.122^\circ$
到達第二工作點各軸轉動角度	$\theta_1 = -40.443^\circ$, $\theta_2 = 59.665^\circ$ $\theta_3 = -72.017^\circ$, $\theta_4 = -12.352^\circ$

3D位置引導機器手臂採摘果物。樹果相對於視覺系統的座標值需先轉換為相對於機器手臂基座的座標值，然後代入機器手臂反運動方程計算出機器手臂各軸轉角，將爪指送至正確位置。因本研究所使用之機器手臂為一般教學用之旋轉型關節機器手臂，精度較差，所以在垂直方向誤差較大。雖然如此，爪指均能抓取到果物。若能改用精度較高之機器手臂，將可更精確地摘取目標物。

七、參考文獻

- 1.張文宏、陳世銘。1993。以機器視覺引導機器人選別水果。農業機械學刊 2(3):11-24。
- 2.鍾瑞永、李芳繁。1993。使用雙眼立體機器視覺定位樹果。中國農業工程學報39(4):74-89。

3. CS-113機械手臂教學實驗手冊。台北：固特企業股份有限公司。
4. Fu, K. S., R. C. Gonzalez and C. S. G. Lee, ROBOTICS: Control, Sensing, Vision, and Intelligence, 1987, McGraw-Hill.
5. Harrell, R. C., P. D. Adsit, T. A. Pool and R. Hoffman. 1990. The Florida robotic grove-lab. Tran. of the ASAE 33(2):391-399.
6. Hwang H. and F. E. Sistler. 1986. A robotic pepper transplanter. Applied Engineering in Agriculture 2 (1):2-5.
7. Kutz, L. J., G. E. Miles, P. A. Hammer and G. W. Krutz. 1987. Robotic transplanting of bedding plants. Tran. of the ASAE 30(3):586-590.
8. Simonton, W. 1990. Automatic geranium stock processing in a robotic workcell. Tran. of the ASAE 33(6):2074-2080.
9. Ting, K. C., G. A. Giacomelli and S. J. Shen. 1990. Robot workcell for transplanting of seedlings, part I-layout and materials flow. Tran. of the ASAE 33 (3):1005-1010.
10. Trevelyan, J. P., P. D. Kovesi and M. C. H. Ong. 1984. Motion control for a sheep shearing robot. Robotics Research: the First International Symposium. The MIT Press, Cambridge, MA, USA. pp. 175-190.

收稿日期：民國83年3月9日

修正日期：民國83年8月17日

接受日期：民國83年9月13日