

機 構 與 機 器 設 計

中華民國九十二年七月
行政院新聞局出版登記證
第執中字第9132號

7-82

- 立聯式機器人之構造分析 \ 陳致正、王瑞華
- 線性代數在機器人運動 / 靜力分析上的運用 \ 吳高平
- 研討會消息

本會為推廣機械工程學術，特設此刊物，歡迎各界人士踴躍投稿，以資交流。投稿請寄：嘉義縣民雄鄉中正大學機械工程研究所，黃以文先生收。電話：(05) 271-1211。

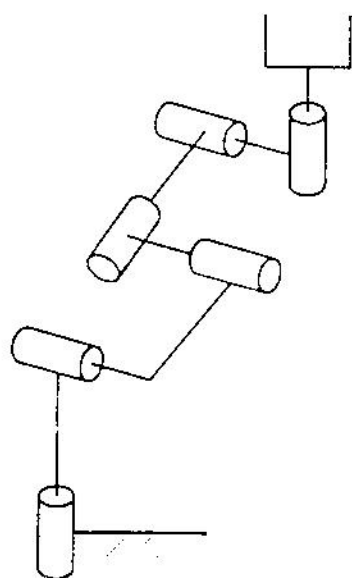
中華民國機械工程學原理學會
嘉義市郵政第59-80號信箱
TAIWAN 80424, R.O.C.

621
嘉義縣民雄鄉中正大學機械工程研究
所
黃以文先生收

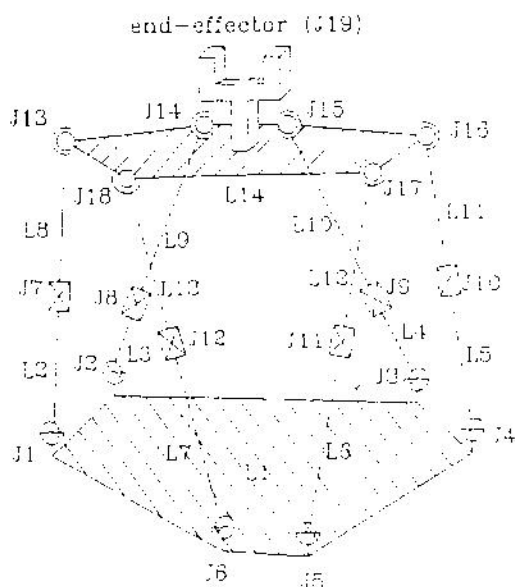
並聯式機器人之構造分析

工技學院 王勳群
工研院 陳致正

以機構學之觀點而言，機器人可視為一種可作三度空間運動之多自由度運動鏈。其構造可概分為三大類：第一類一般稱之為串聯式機器人 (Serial Robot)，如圖一為 PUMA560 型機器人之構造示意圖 (Schematic

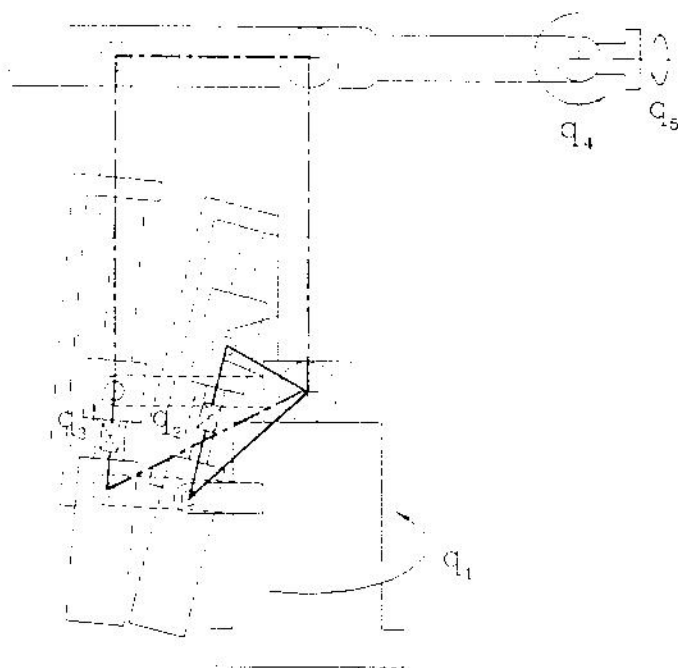


圖一 PUMA 560 之架構圖



圖二 Stewart 平台之架構圖

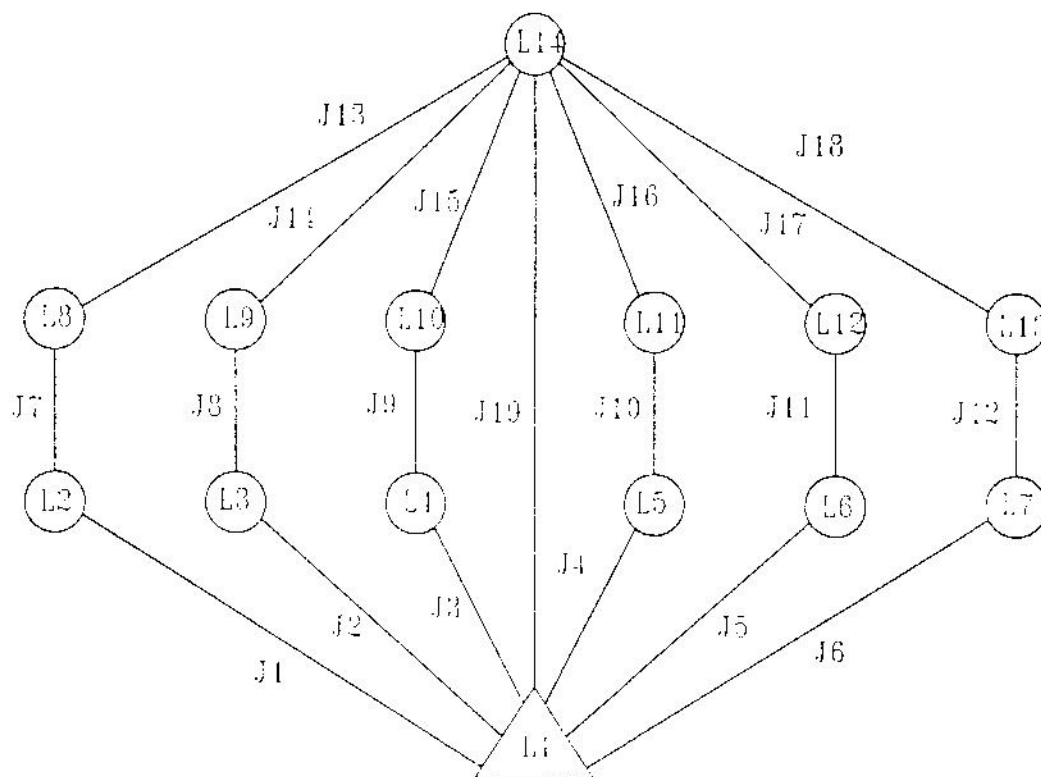
Diagram)，由圖中可知其為一種單一開迴路之運動鏈 (Simple Open Loop Kinematic Chain)。第二類為並聯式機器人 (Parallel Robot)，其構造中包含數個耦合之閉迴路運動鏈 (Coupled Closed Loop Kinematic Chain)。如圖二所示為 Stewart 平台 (Platform) 機器人之架構。第三類為混合串-並聯式機器人 (Hybrid Serial-Parallel Robot)，其構造為開迴路與閉迴路運動鏈之組合 (Combined Closed Loop and Open Chain Structure)，如 Yasukawa Motoman L-3 型機器人或工研院 U 型機器人，其構造如圖三所示。於本文中，吾人將第二類與第三類者統稱為廣義並聯機器人 (General Parallel Robot)。



圖三 Yasukawa 機器人之架構圖

如前所示，並聯式機器人之構造特徵在於其驅動機構中可能含有一個或數個耦合之閉迴路運動鏈，且其中可能包含許多多自由度之接頭如圓柱接頭、萬向接頭與球接頭等等，及多接頭之連桿。因此其各連桿上之局部座標系統 (Local Coordinate System) 無法如串聯式機器人般按順序排列。此外，各接頭之變數亦非完全獨立而須符合閉迴路之運動限制條件 (Kinematic Constraints)。因此必須先對其做一完整之構造分析 (Structure Analysis) 之後，方能進行運動與動力分析。

一般並聯機器人之驅動機構皆由二基本元件，即連桿 (Link) 與接頭 (Joint) 所組



圖四 Stewart平台機器人之運動圖畫

合而成。且一接頭僅連接兩根連桿，但一連桿上可有數個接頭¹。此與圖畫 (Graph) 中之二個基本元件，即頂點 (Vertex) 與邊 (Edge) 之性質相同 [1]。因此，若將機器人之末端致動器視為一種與固定連桿相連接之特殊接頭，再將連桿表為圖畫中之頂點，而接頭表為圖畫中之邊，並將其分別加以編號，吾人即可將任何並聯機器人之運動構造 (Kinematic Structure) 轉換為一運動圖畫 (Kinematic Graph) [2]。以圖二之 Stewart 平台為例，其運動圖畫如圖四所示。圖中 L_{xx} 表連桿編號而 J_{xx} 表接頭編號。如此所得之運動圖畫有一重要之特點為其必為一連接圖畫 (Connected Graph)，即由圖畫中之任一頂點出發皆可經由一個或數個邊所組成之路徑 (Path) 到達另一頂點。此外，該機器人之固定桿所對應之頂點不可能為一分解頂點 (Seperating-Vertex)。因為若拆除此頂點可將其運動圖畫分離為兩個獨立之子圖畫 (Subgraph)，則此機器人對固定桿將有兩個獨立之構造，而可視為分開的機器人。

並聯機器人驅動機構中之獨立運動迴路 (Independent Kinematic Loop) 相當於其運動圖畫中之基礎迴路 (Fundamental Circuit)，而其數目可由下式決定之 [1]，即

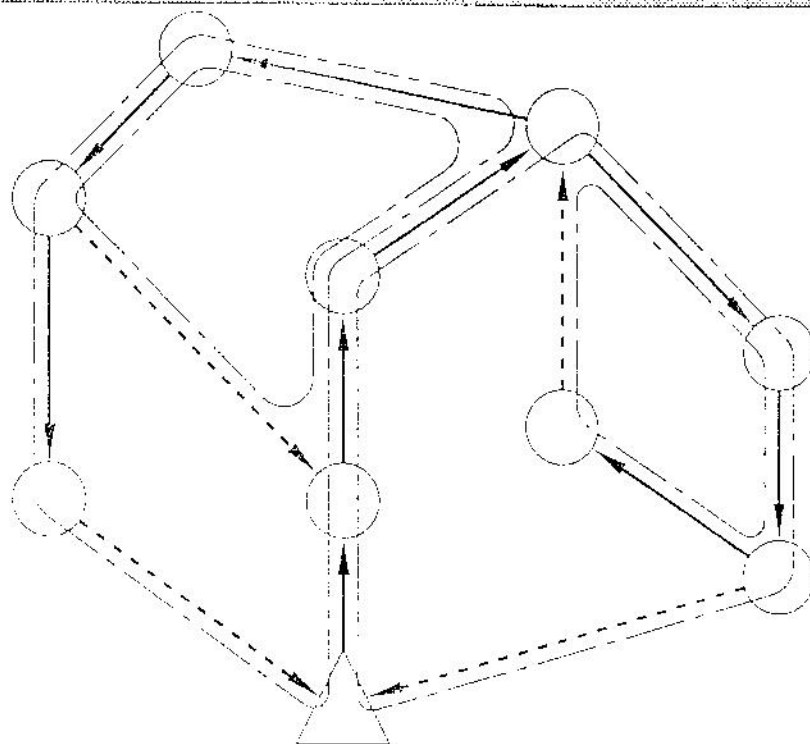
$$L = n_j - n_l + 1$$

其中 n_j 與 n_l 分別代表機器人之接頭總數 (含末端致動器) 及連桿總數。

於本文中，複接頭是以單接頭與虛擬連桿 (Virtual Link) 之組合來表示。

由圖論中可知任一圖畫之基礎迴路可經由將該圖畫分解為一張樹 (Spanning Tree) 與一組拆解邊 (Cut Edge) 決定之。雖然一圖畫可能有許多張樹，每一株張樹各對應一組不同之基礎迴路，但吾人發現一種特殊形式之張樹，即所謂之棕櫚樹 (Palm Tree) [1]，對機器人之構造分析十分有用。

任一圖畫之棕櫚樹為一具有方向性之張樹 (Directed Spanning Tree)，而其上各邊之方向為經由深度優先搜尋法 (Depth First Search Algorithm)，簡稱 DFS，所求得者。DFS 之詳細步驟可參閱 [1]，在此僅舉一例以說明棕櫚樹之特性。於圖五所示之圖畫中，由實線所組成之子圖畫即為一棕櫚樹， Δ 符號表示該樹之根 (Root)，而虛線為拆解邊，該圖畫之基礎迴路則以點虛線表示。此圖顯示二項棕櫚樹之重要特性。其一為除根外，所有之頂點都祇有一個進入邊 (Inlet



圖五 棕櫚樹之示意圖

Edge)，亦即其方向為進入頂點之方向。其次，於圖論中已被證明，若根不為一分解頂點，則其上僅有一個外出邊（Outlet Edge）〔3〕。若有人選擇固定連桿所對應之頂點做為根，則此條件即成立。於本文中，吾人將此種棕櫚樹所對應之機構定義為並聯機器人之輔助樹狀機構（Complemental Tree-type Mechanism），簡稱為CTM，而被拆解的邊稱之為該機器人之拆解接頭（Cut Joint）。此外，各頂點之進入與外出邊分別定義為其所對應連桿之入接頭（Inlet Joint）與出接頭（Outlet Joint）。

如前所述，運動圖畫之基礎迴路與機構之獨立迴路性質相同。故經由DFS法則所搜尋出之獨立迴路具有以下之幾種特性：

1. 各個通過固定桿之獨立迴路皆經由同一出接頭離開，而由不同之入接頭回到該桿，且每一入接頭皆為拆解接頭。因此，於本文中將此類迴路稱為接地迴路（Grounded Loop），而固定連桿為它們之基桿（Base Link）。
2. 若任一可動連桿僅有一個入接頭，則所有經過此桿之迴路皆經由此接頭進入該桿。
3. 若一可動連桿具有多個入接頭，則其中僅有一個不為拆解接頭。且其上之各拆解接頭所對應之迴路皆始於該桿之出接頭，並且不會經過固定桿。於本文中，吾人將此類迴路定義為浮動迴路（Floating Loop），而此可動桿為其基桿。

根據以上三項特性，一旦經由DFS定出一並聯機器人之CTM後，由固定桿至該機器人中任一可動桿之路徑即可沿其CTM之各分枝經由反向追蹤（Backward Tracking）求得。而該機器人之各個獨立運動迴路亦可輕易的由各個拆解接頭反向追蹤至其所對應之基桿求出〔4〕。

待各桿之路徑與獨立迴路皆求出後，此機器人上之各座標系統與其間之遞迴式轉換關係及各迴路之封閉條件（Loop Closure Condition）即可系統化的導出，並進而對其做運動學與動力學之分析，有興趣之讀者可參閱〔4〕。

參考資料

1. N. Deo, Graph Theory and Applications to Engineering and Computer Science, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1974.
2. S. Even, Graph Algorithm, Computer Science Press, Inc., 1979.
3. E. Freudenstein, and L. Dobrjanskyj, "On a Theory for the Type Synthesis of Mechanisms", Proceedings of the 11th International Congress of Applied Mechanics, 1964, pp420-428.
4. S. Even, Graph Algorithm, Computer Science Press, Inc., 1979.
5. 陳致正, "並聯式機器人之運動與動力分析", 博士論文, 國立台灣工業技術學院機械系, 1993。

線性代數在機 器人運動 / 靜力分析上的應用

國立台灣工業技術學院機械系

蔡高岳

一、前言

日前在一般學術研究上，對機器人之速度及靜力分析皆以螺旋理論 (screw theory) 為基礎。大體上而言，此理論並不為一般大專生所熟悉，在本文中吾人將先探討螺旋理論與線性代數之關係，然後利用線性代數來作開路式機器人 (open-loop manipulators) 之運動與靜力分析。

二、螺旋理論與線性代數之關係

一個螺旋 (screw) 是由六個實數所構成，對於物體之運動分析而言，我們稱螺旋為一 twist $\underline{T} = [\underline{w}, \underline{v}]$ ，其中 $\underline{w}$ 為物體之角速度，而 $\underline{v}$ 為物體中一參考點之速度。另一方面在作物體之靜力分析時，我們稱螺旋為一 wrench $\underline{W} = [\underline{E}, \underline{M}]$ ，其中 $\underline{E}$ 為作用力，而 $\underline{M}$ 為作用力矩 (torque)。當一個 wrench 對一 twist 所作之功為零時，我們稱此兩個螺旋為 reciprocal，或

$$\underline{T} \circ \underline{W} = \underline{w} \circ \underline{M} + \underline{v} \circ \underline{E} = 0 \quad (1)$$

其中 " $\circ$ " 表一般向量之內積。在本文中吾人將以線性代數取代螺旋理論，故在此將 wrench 定義為 $\underline{W} = [\underline{M}, \underline{E}]$ 而公式 (1) 之交乘 " $\circ$ " 改為內積 " $\cdot$ "，故公式 (1) 可寫為

$$\underline{T} \cdot \underline{W} = \underline{w} \cdot \underline{M} + \underline{v} \cdot \underline{E} = 0 \quad (2)$$

$\underline{T} \cdot \underline{W}$ 在此已變為六度空間向量之一般內積。

其次吾人將把向量之外積推廣至 n 度空間，並以此廣義向量外積作為此節之理論基礎，我們知道一般三度空間向量之外積可表示為

$$\underline{c} = \underline{a} \times \underline{b} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{vmatrix} \quad (3)$$

其中 $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ 為 R^3 之標準基底 (standard basis)，而一向量 $\underline{a}$ 與 $\underline{c}$ 之內積可表示為

$$\underline{a} \cdot \underline{c} = \begin{vmatrix} d_1 & d_2 & d_3 \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{vmatrix} \quad (4)$$

我們可把公式 (3) 及 (4) 推廣到 n 度空間，令 $\underline{v}_1, \underline{v}_2, \dots, \underline{v}_{n-1} \in R^n$ 且為線性獨立，則定義廣義向量外積 (general cross product) 為

$$\underline{v}_n = (\underline{v}_1 \times \underline{v}_2 \times \dots \times \underline{v}_{n-1}) =$$

$$\begin{vmatrix} \hat{e}_1 & \hat{e}_2 & \dots & \hat{e}_n \\ v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ v_{n-1,1} & v_{n-1,2} & \dots & v_{n-1,n} \end{vmatrix} \quad (5)$$

其中 $\hat{e}_1, \hat{e}_2, \dots, \hat{e}_n$ 為 R^n 之標準基底，則 $\underline{v}_n$ 垂直於 $\underline{v}_i$ ($i = 1, 2, \dots, n-1$)。任一向量 $\underline{p} \in R^n$ 則

$$\underline{p} \cdot \underline{v}_n = \begin{vmatrix} p_1 & p_2 & \dots & p_n \\ v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ v_{n-1,1} & v_{n-1,2} & \dots & v_{n-1,n} \end{vmatrix} \quad (6)$$

我們將用公式 (5) 及 (6) 來證明螺旋理論導出之運動及靜力公式，實際上為矩陣運算之 Cramer Rule 及反矩陣。

對一六軸機器人而言，其手端 (end-effector) 運動之 twist $\underline{T} = \sum \theta_i \hat{S}_i$ ，其中 θ_i 為 i 軸

速率，而 $\hat{S}_i$ 為 i 軸之單位直線向量 (unit line vector)，通常 $\hat{S}_i$ 以 Plucker 座標表示為 $(\hat{e}_i, \underline{r}_i \times \hat{e}_i)$ 其中 $\hat{e}_i$ 為 i 軸方向之單位向量，而 $\underline{r}_i$ 為從手端至 i 軸上任何一點之向量，若以矩陣表示可寫成

$$\underline{T} = \begin{bmatrix} \underline{w} \\ \underline{v} \end{bmatrix}_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} \hat{S}_1 & \hat{S}_2 & \hat{S}_3 & \hat{S}_4 & \hat{S}_5 & \hat{S}_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \end{bmatrix} = \underline{J} \underline{\theta} \quad (7)$$

假若 $[W, V]$ 為已知而欲求 θ_1 ，我們使用螺旋理論以下述方法求解（以求 θ_1 為例）

(i) 先找出一 wrench $\underline{W}_1$ 其對 $S_2, S_3, \dots, S_6$ 螺旋所作之功為零。

(ii) 利用求得之 wrench $\underline{W}_1$ 對公式 (7) 之左右兩端交乘可求得 θ_1

$$\text{或 } \theta_1 = \frac{\underline{W}_1 \cdot \underline{T}}{\underline{W}_1 \cdot \underline{S}_1} \quad (8)$$

如果我們使用 wrench $W=[M, E]$ 則可利用公式 (5) 及 (6) 來轉換公式 (8)，步驟如下：

(i) 先找出一 wrench $[M, E]$ 正交於 $S_2, S_3, \dots, S_6$

$$\text{即 } \begin{bmatrix} S_2^t \\ S_3^t \\ \vdots \\ S_6^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M \\ E \end{bmatrix} = 0$$

再利用公式 (5) 我們可求得

$$\underline{W}_1 = \begin{bmatrix} M \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \dots & \theta_6 \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & \dots & S_{36} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{61} & S_{62} & \dots & S_{66} \end{bmatrix}$$

(ii) 以 $\underline{W}_1$ 交乘公式 (7) 之左右兩端，若我們使用公式 (6) 則

$$\underline{W}_1 \cdot \underline{T} = \underline{W}_1 \cdot \underline{T}$$

$$= \begin{bmatrix} W_x & W_y & W_z & V_x & V_y & V_z \\ S_{21} & S_{22} & \dots & \dots & \dots & S_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{61} & S_{62} & \dots & \dots & \dots & S_{66} \end{bmatrix}$$

$$\text{而 } \underline{W}_1 \cdot \underline{S}_1 = \underline{W}_1 \cdot \underline{S}_1$$

$$= \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & \dots & \dots & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & \dots & \dots & S_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{61} & S_{62} & \dots & \dots & \dots & S_{66} \end{bmatrix}$$

故公式 (8) 可寫成

$$\theta_1 = \frac{\begin{bmatrix} W_x & W_y & W_z & V_x & V_y & V_z \\ S_{21} & S_{22} & \dots & \dots & \dots & S_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{61} & S_{62} & \dots & \dots & \dots & S_{66} \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & \dots & \dots & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & \dots & \dots & S_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{61} & S_{62} & \dots & \dots & \dots & S_{66} \end{bmatrix}}$$

$$\begin{bmatrix} W_x & S_{21} & \dots & \dots & \dots & S_{21} \\ W_y & S_{22} & \dots & \dots & \dots & S_{22} \\ W_z & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_x & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_y & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_z & S_{26} & \dots & \dots & \dots & S_{26} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} & \dots & \dots & \dots & S_{61} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & \dots & \dots & S_{62} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{61} & S_{62} & \dots & \dots & \dots & S_{66} \end{bmatrix}$$

(9)

此公式 (9) 恰為公式 (7) 之 Cramer's Rule 之解，故我們可用 Cramer's Rule 直接解公式 (7) 而無需訴諸於螺旋理論，因為此兩個方法在計算效率上是等效的，而 Cramer's Rule 更可為一般大專生所接受。

對靜力方面，利用虛功原理可導出

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1^t \\ S_2^t \\ \vdots \\ S_6^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M \\ E \end{bmatrix} = [J]^t \underline{W} \quad (10)$$

若 $\underline{Z}$ 已知而要求得 $\underline{W}$ ，依螺旋理論可導出下列公式（因篇幅有限，不提供推導過程，有興趣之讀者可參閱 (3)）

$$\overline{W} = \sum_{i=1}^5 Z_i \frac{\underline{W}_i}{\underline{W}_i * \underline{S}_i} \quad (11)$$

當 $i = 1$ 時

$$A_1 = \frac{\underline{W}_1}{\underline{W}_1 * \underline{S}_1} = Z_1 \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{bmatrix}$$

(註：使用 $\underline{W}_1$ 的話，行列式內之前三行與後三行需互換)

同理可求得 i 項

$$Z_i = \frac{\text{ith column of } \text{adj} [J^T]}{\text{Det} [J^T]}$$

故公式 (11) 為

$$\overline{W} = \sum_{i=1}^5 Z_i \frac{\underline{W}_i}{\underline{W}_i * \underline{S}_i} = \frac{\text{adj} [J^T]}{|J^T|} Z = [J^T]^{-1} Z \quad (12)$$

由式 (9) 及 (12) 我們可知利用螺旋理論導出之速度及靜力關係式，基本上與 Cramer's Rule 或反矩陣是等效的。而事實上，此兩種方法來解線性方程式並不比其他矩陣基本運算（如高斯消去法）來得有效率，因此對一般大專生而言，在機器人或機構之速度及靜力分析上，並不需訴諸於螺旋理論。

三、機器人之速度及靜力分析

在此節中，吾人將以矩陣原理對 n 軸機器人之速度及靜力分析作廣義的探討，其使用之關係式為

$$[A]_{m \times n} [P]_{n \times 1} = [Q]_{m \times 1} \quad (13)$$

$$\text{在速度分析時 } [A] = [J], [P] = \dot{\theta}, [Q] = \begin{bmatrix} \dot{W} \\ \dot{V} \end{bmatrix}$$

，而在靜力分析時 $[A] = [J]^T$, $[P] = \overline{W}$ 及 $[Q] = \underline{Z}$ 。首先吾人先以圖一來說明速度分析及靜力分析之主要不同點



圖一 速度分析與靜力分析之差異

如圖一所示，一活塞由一馬達驅動，此系統有一個自由度，即活塞只能沿 $\underline{v}_1$ 方向運動，除此方向之外，所有運動均不可行 (not admissible)。對於靜力分析而言，此活塞可承受任何方向之 wrench $\overline{W}$ ，所有 wrench $\overline{W}$ 理論上可分為兩個分量

$$\overline{W} = \overline{W}_L + \overline{W}_T \quad (14)$$

其中 $\overline{W}_L$ 表示 $\overline{W}$ 在 $\underline{v}_1$ 方向之分量，而 $\overline{W}_T = \overline{W} - \overline{W}_L$ 為 $\overline{W}$ 在 $\underline{v}_1$ 之零空間 (null space) 之分量，此零空間由五個線性獨立向量 $\underline{v}_i$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) 所跨 (span)， $\underline{v}_i$ 滿足 $\underline{v}_i \cdot \underline{v}_1 = 0$ 。在靜力分析時，馬達僅需平衡 $\overline{W}_L$ 分量，而 $\overline{W}_T$ 為結構所吸收，此分量無需以馬達來平衡它，但此分量會使系統產生內應力。反過來說，當活塞對外作功時，僅能產生 $\underline{v}_1$ 方向之 wrench，而對 $\underline{v}_1$ 零空間內之任何方向所作之功均為零。以下吾人以此觀念先作 n 個自由度機器人之運動 / 速度分析，其次再作其靜力分析。

(1) 運動 / 速度分析

一般而言，機器人的手端能沿指定的 twist $\underline{I} = [\underline{v} \ \underline{\omega}]$ 方向運動（或解出 $\underline{I}$ 之充分及必要條件為

$$\text{Rank} [J] = \text{Rank} [J \ \underline{I}] \quad (15)$$

或者說 twist T = 賈氏矩陣之行向量所跨之空間。

當賈氏矩陣 $(J)_{n \times 6}$ 之行向量線性獨立, (full column rank), 在 $n \leq 6$ 之情況且滿足公式 (15) 時, $[W, V] = 0$ 有唯一之解 (0 有解則表示機器人手端可沿 twist $T = [W, V]$ 方向運動)。但對多餘軸機器人 (redundant manipulators) $n > 6$ 之情況下 (註: 此處 n 表 n 軸機器人), 賈氏矩陣則為

$$\begin{bmatrix} W \\ V \end{bmatrix}_{n \times 6} = \begin{bmatrix} J \\ 0 \end{bmatrix}_{n \times 6} \dot{\theta}_{n \times 1} \quad (16)$$

此時 0 有無限多組解, 此解可寫成

$$\dot{\theta} = \alpha_1 \dot{\theta}_1 + \alpha_2 \dot{\theta}_2 + \dots + \alpha_{n-6} \dot{\theta}_{n-6} + \dot{\theta}_{n-5} + \dot{\theta}_{n-4} + \dots + \dot{\theta}_n$$

其中 $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dots, \dot{\theta}_{n-6}$ 為齊次解 (homogeneous solutions), 此組向量跨矩陣 J 之零空間, 而 $\dot{\theta}_n$ 為特解 (particular solution)。在運動規劃上, 我們習慣以 pseudo-inverse 來求 $\dot{\theta}$ (最佳解), 其所得到 $\dot{\theta}$ 之向量長度 (norm) 為最小, 亦即以最小能量來獲得所擬之 twist $[W, V]$ 。以下吾人略以 "正交" 之觀念導出數種求 $\dot{\theta}$ 之方法, 一般而言, 其計算均比 pseudo-inverse 來得有效率。首先我們由公式 (16) 之物理意義談起, 公式 (16) 在線性代數上代表一個 "affine space", 或者視為 n 度向量空間上的一個 $(n-6)$ 自由度的平面 P , 此平面 P 上之任一點為線性方程式 (16) 之解, 向量長度最小之解即為從原點到此平面 P 之最短距離之點, 以下提供數種求 $\dot{\theta}$ 之方法:

(a) 對任一特解 $\dot{\theta}_p$ 將其分解成兩個分量, 即

$$\dot{\theta}_p = (\dot{\theta}_p)_\perp + (\dot{\theta}_p)_\parallel$$

其中 $(\dot{\theta}_p)_\perp$ 為 $\dot{\theta}_p$ 在 $(\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dots, \dot{\theta}_{n-6})$ 所構成向量空間上之投影, 而 $(\dot{\theta}_p)_\parallel$ 為 $\dot{\theta}_p$ 在 J 之列向量所跨之子空間上之投影, $(\dot{\theta}_p)_\perp$ 即是所求之最佳解 $\dot{\theta}^*$ 。

欲求一向量 $\underline{V}$ 在任何一個子空間之投影 $\underline{V}_\perp$, 我們可利用 (a) QR factorization (b) $\underline{V} = \underline{Q}\underline{Q}^T \underline{V}$, $\underline{Q}$ 矩陣以跨此子空間之任一正交基底 (orthonormal basis) 作為其行向量, 或 (c) $\underline{V}_\perp = \underline{A}(\underline{A}^T \underline{A})^{-1} \underline{A}^T \underline{V}$,

$\underline{A}$ 矩陣以跨此子空間之任一基底 (無需正交) 作為其行向量。我們要求 $\dot{\theta}^*$, 可令 $\underline{A} = \underline{J}^T$ 直接求 $(\dot{\theta}_p)_\perp = \dot{\theta}^*$ 或令 $\underline{A} = (\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dots, \dot{\theta}_{n-6})$ 求 $(\dot{\theta}_p)_\perp$, 而 $\dot{\theta}^* = (\dot{\theta}_p)_\perp = \dot{\theta}_p - (\dot{\theta}_p)_\parallel$

(註: 若使用方法 (b) 求解的話, 我們首先需將 $\underline{A}$ 矩陣轉換為一正交矩陣 (orthonormal matrix) $\underline{Q}$)

(ii) 因 $\dot{\theta}$ 必需垂直於 $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dots, \dot{\theta}_{n-6}$ 故我們可令 $\dot{\theta} \cdot \dot{\theta}_i = 0$ 解出 $\alpha_i, i = 1, 2, \dots, n-6$ 再代回公式 (17) 求 $\dot{\theta}^*$, 以矩陣寫出其關係式為

$$[\alpha_i] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \vdots \\ \dot{\theta}_{n-6} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \dot{\theta}_p \cdot \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_p \cdot \dot{\theta}_2 \\ \vdots \\ \dot{\theta}_p \cdot \dot{\theta}_{n-6} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中矩陣第 i 列, j 行元素為 $\dot{\theta}_i \cdot \dot{\theta}_j$, $[\alpha_i]$ 為一對稱矩陣。

(例 1) 解 $\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$

用 RREF (Reduced Row Echelon Form) 之解法 (參閱 [1])

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \rightarrow \left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{array} \right]$$

則齊次解為 $(-1, -1, 1)$ 而特解為 $(1, 1, 0)$

$$\begin{aligned} x_1 &= -1 \\ x_2 &= -1 \\ x_3 &= 1 \end{aligned}$$

$[\alpha_i]$ 為 1×1 之矩陣, 為

$$[\alpha_i] = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} = 3$$

故公式 (18) 可寫為

$$3\alpha_i = - \begin{bmatrix} \dot{\theta}_p \cdot \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_p \cdot \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_p \cdot \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = 2$$

$$\alpha_i = \frac{2}{3}$$

$$\text{故 } \underline{X}_2 = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{5}{3} \\ \frac{5}{3} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ 為最佳解}$$

(III) 同(II), 因 $\underline{Q}^* \cdot \underline{V}_1 = 0$, 故我們可將公式(16)改寫成

$$\begin{bmatrix} \underline{W} \\ \underline{V} \\ -\underline{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{J} \\ \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \vdots \\ \underline{V}_{n-m} \end{bmatrix} = \underline{Q}_{n \times 1} = [\underline{J} \mid \underline{Q}] \quad (19)$$

故 $(\underline{x}^*) = [\underline{J}]^{-1} \begin{bmatrix} \underline{W} \\ -\underline{Q} \end{bmatrix}$ 為最佳解。

在此方法中, 吾人將用高斯消去法來解公式(19), 在一個過程中先解出 $\underline{V}_1$, 再繼續求出 $\underline{x}$ 之最佳解 $\underline{x}^*$, 其流程圖如圖二 (解 $[A] \underline{x} = \underline{b}$) 所示。

圖二中之 $\underline{x}$ -表 $\underline{V}_1$, 當 $[A]$ 矩陣之列向量為線性相依 (linear dependent) 時, 此法所得之答案不保證得到最佳解, 在此情況下必需利用 pseudo-inverse 方法才能得到最佳解。

(例二) 解

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & -2 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 2 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

其增廣矩陣 (augmented matrix) 為

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & -2 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 2 & -1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

再將此矩陣用列基本運算變為上三角矩陣

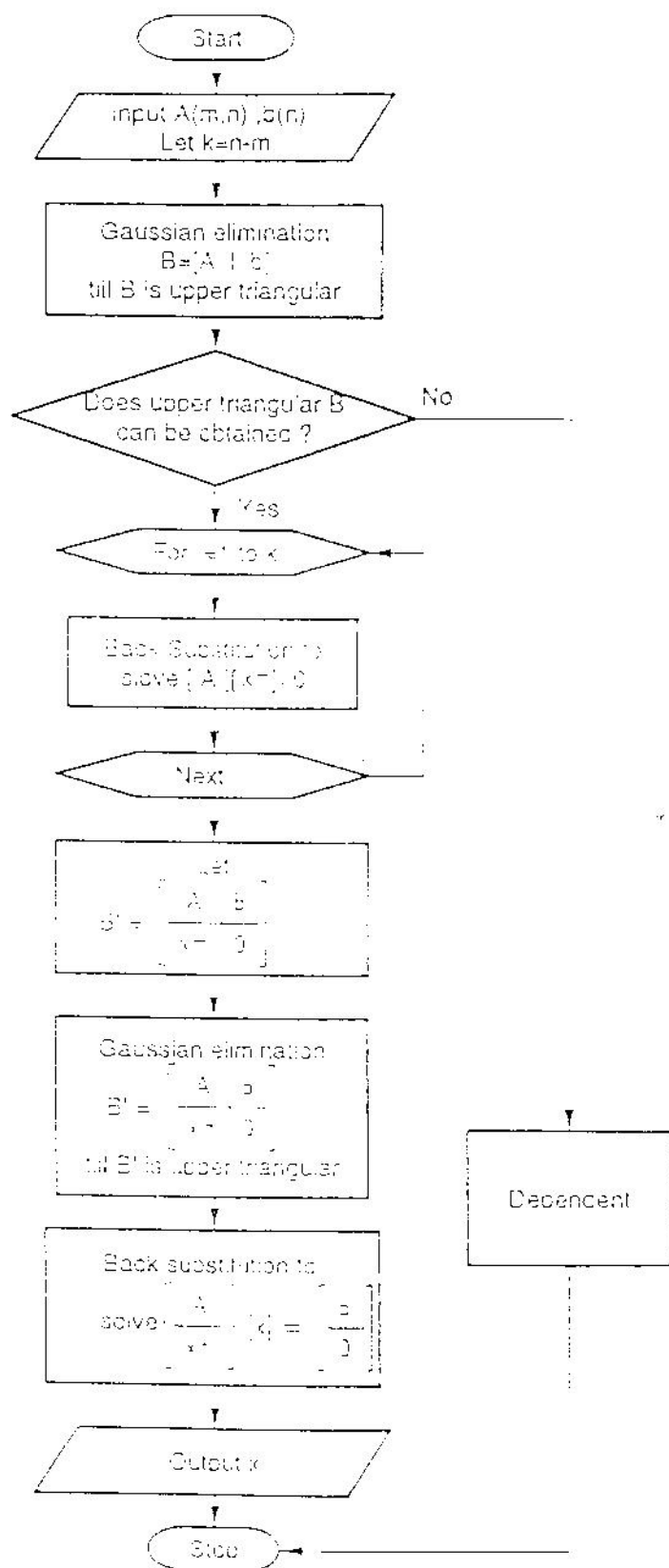
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & -2 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & -3 & 3 & 2 & -2 \\ 0 & 0 & 1 & -6 & 7 & 5 & 3 \end{bmatrix}$$

求 $A \underline{x}^2 = 0$ 得 $\underline{V}_1 = [8 \ -3 \ 6 \ 1 \ 0]^T$

$$\underline{V}_2 = [-9 \ 4 \ -7 \ 0 \ 1]^T$$

將 $\underline{V}_1, \underline{V}_2$ 置入矩陣之第四、五列, 並在向量 $\underline{b}$ 之第四、五元素填上零後, 得

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & -2 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & -3 & 3 & 2 & -2 \\ 0 & 0 & 1 & -6 & 7 & 5 & 3 \\ 8 & -3 & 6 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -9 & 4 & -7 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



圖二：高斯消去法一步流程圖

然後再將此矩陣變為上三角矩陣

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & -2 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & -3 & 3 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & -6 & 7 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -63/55 & -87/110 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 74/147 \end{bmatrix}$$

再以回代法 (back substitutions) 得

$$x = \begin{bmatrix} 1.2 \\ 4.9 \\ 10.1 \\ 29.4 \\ 4. \\ 21 \\ 3 \\ 1.4 \\ 7.4 \\ -14.7 \end{bmatrix} \text{ 為最佳解}$$

一般而言，方法 (I) 之計算效率並不比 pseudo-inverse 高，但方法 (II) 及 (III) 則較一般 pseudo-inverse 有效率（尤其是對 7 軸機器人，即 $n=7$ 時）。上述這些方法均有一限制，那就是矩陣之列向量必須線性獨立。如果我們所提供之 $\hat{u}$ 不為最佳解時，則 $\hat{u} = \hat{u} + \hat{u}^*$ 分量將使機器人產生內應力 (interaction forces)，其狀況將於下節中敘述。

(2) 靜力分析

靜力分析之關係式為

$$[Z] = [J]^T [W] = [J]^T [M] \quad (20)$$

或者是 $Z_i = \sum_j W_j$ ，第 i 軸所需之平衡力或力矩為 W 與第 i 軸單位螺旋之內積， $[J]^T$ 為一 $n \times 6$ 矩陣。我們此節研究重點為當機器人手端受一外力 W (wrench) 時，決定那些分量由機器人之結構吸收，那些分量需由馬達做功來保持平衡。在機器人靜止不動時，我們希望由結構所吸收之 wrench 比例愈大愈好。反過來說，當馬達輸入力矩 Z 對外作功時，被結構吸收之能量則愈小愈好。

(i) 當 $n < 6$ 時

如前節所述，我們理論上可找出矩陣 $[J]^T$ 之零空間，設此零空間為 $u_1, u_2, \dots, u_{6-n}$ 所跨（註： $u_1, u_2, \dots, u_{6-n}$ 為公式 (20) 之齊次解），則我們可利用前述之方法 (I) 直接求 W 或是先以公式 (20) 求 Z 再用方法 (II) 或 (III) 將 W 分為

兩個分量，一個為在零空間上之分量 W_T ，另一個為垂直於此零空間之分量 W_L ，即

$$W = (W)_L + (W)_T$$

則 W_T 分量由結構吸收，而 W_L 則需由馬達做功來平衡。當 W 為零空間內之向量時，所有 W 皆由結構承受，馬達不需給予任何 Z 即可平衡此 W 。反過來說，當馬達輸入之力矩 Z 已知，而要求在手端上對外作功之 wrench W 時，我們可解出如同公式 (17) 之關係式

$$W = \beta_1 u_1 + \beta_2 u_2 + \dots + \beta_{6-n} u_{6-n} + u_p$$

然後可以前面速度分析所使用的三種方法中任何一種求出 $W_L = W^*$ ，此 W^* 即為手端所產生之 wrench。當 $n < 6$ 時，所加之 Z 皆用來產生手端之 wrench（無任何分量被結構吸收）。

(ii) 當 $n=6$ 時

若 $\text{Rank}[J] = 6$ ，則公式 (20) 中 Z 及 W 為一對一之對應關係 $W = [J]^T Z$ ，此時無零空間存在，手端所受之 wrench 皆由馬達承受，同理馬達所加的 Z 亦全部用來對外作功。

如果 $\text{Rank}[J] = n < 6$ ，則我們可從 $[J]^T$ 選出任何 n 個線性獨立列向量，並沿用 (I) 之方法，將 W 分為 W_L 及 W_T ，則 W_T 分量由結構吸收，值得注意的是因 $[J]^T$ 的列向量線性相依，故不能以前述之方法求得 W^* ，此時需用 pseudo-inverse 來求 W^* 。

(iii) 當 $n > 6$ 時

其靜力關係式為

$$[Z]_{6 \times n} = [J]_{n \times 6}^T [W]_{6 \times 1}$$

在此情況下 $[J]^T$ 之零空間並不存在，故手端所受之 wrench W 全由馬達吸收，與速度分析不同的是，即使馬達輸入之力矩 Z 不在 $[J]^T$ 行向量所跨之向量空間內，我們仍可求出手端輸出之 wrench。輸入之 Z 可分為兩個分量

$$Z = Z_T + Z_L$$

其中 Z_L 為 Z 投影在 $[J]^T$ 行向量所跨子空間之分量，此分量產生手端輸出之 wrench W ；而 Z_T 分量由結構吸收（為 Z 投影在 $[J]^T$ 行向量之零空間上之分量），並不對外作功。 Z_T 或

Z_L 皆可由前述之投影方法求得。當 $Z_T = 0$ 時， $Z = Z_L = Z^*$ 為最佳值。我們可由 $[Z - Z_T] = [J]^T W$ 求出手端輸出之 wrench W （註：此時 $[Z - Z_T]$ 已在 $[J]^T$ 行向量所跨之空間內，我們可以得到唯一解）

如此的結論與前節所述 $\dot{a} = \dot{a} - \dot{a}^*$ 分量會使機器人產生內應力之結論吻合，即或 $\dot{a}^*$ 或 Z 若與 $[J]$ 矩陣列向量之零空間垂直，則為最佳解 $\dot{a}^*$ 或 Z^* ，否則有部份多餘的能量會使機器人產生內應力。

四、結論

本文以矩陣及向量空間之基本原理來作機器人之速度及靜力分析。當機器人之自由度小於6時，則手端所受之外力可能有部份（或全部）被結構吸收，馬達無需作功來平衡被結構吸收之分量。另一方面，當機器人之自由度大於6時，則輸入之力矩 Z 亦可能有部份（或全部）被結構吸收，此部份力矩無法對外作功。其次吾人提供數種解多變數線性方程組（underdetermined linear system）： $b = [A]_{n \times m} X$, $n > m$ 之方法，來求 X 之最小之解 X^* ，這些方法唯一的限制為 A 矩陣的秩 $\text{rank}(A) = \text{Min}(m, n)$ ，唯一的列外為

- 作速度分析時 $[w \ z] = [J]_{n \times m} \dot{a}$, $n > m$ ，若 $[J]$ 之列向量線性相依， $\text{rank}[J] = K < m$ ，則 $\dot{a}$ 向量需存在 $(m-K)$ 個零元素，如此我們可捨棄相對於此零元素之列向量即可求得 X^* 。
- 作靜力分析時 $[Z - Z_T] = [J]^T_{n \times m} W$, $n > m$ ，若 $[J]^T$ 之行向量線性相依（即 $[J]$ 之列向量線性相依）， $\text{rank}[J]^T = K < m$ ，則需有 $(m-K)$ 個 $[J]^T$ 之行向量與 $[Z - Z_T]$ 之內積為零，如此我們可捨棄這些行向量而求得 W^* 。

參考文獻

- (1) Goldberg, J. Matrix Theory with Applications. McGraw-Hill, Inc. 1992
- (2) Sugimoto, K. and Duffy, J., "Application of Linear Algebra to Screw Systems", Mechanism and Machine Theory, Vol. 17, No. 1, pp. 73-83, 1982.
- (3) Kumar, V., "Instantaneous Kinematics of Parallel-Chain Robotic Mechanisms", ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 114 Sep. 1992, pp. 349-358.

介紹新進會員

姓名	謝晉洲
現職	成功大學研究生
專長與興趣	機器人學、電腦輔助設計、機構運動學、電腦輔助繪圖
姓名	黃良印
現職	成功大學研究生
專長與興趣	機器人學、機構運動學、電腦輔助繪圖
姓名	陳逢志
現職	成功大學研究生
專長與興趣	機器人學、機構運動學、電腦輔助設計
姓名	邱顯達
專長與興趣	機器人學、影像處理、機構運動學、電腦輔助設計、電腦輔助繪圖
姓名	李宏文
專長與興趣	機器人學、機構運動學
姓名	王凱睿
現職	中山大學研究生
專長與興趣	機構運動學、機器動力學、電腦輔助繪圖、電腦輔助設計、生物機構學
姓名	孫建勳
現職	成功大學研究生
專長與興趣	機器人學、機構運動學

☆ 啓示 ☆

投稿時請務必註
明圖表、方程式
之來源以免違反
著作權法

CALLS FOR PAPERS

1994 ASME Design Technical Conferences
1994 ASME International Computers in Engineering Conference
1994 ASME Database Symposium
Hyatt Regency, Minneapolis, Minnesota
September 11-14, 1994

Deadlines for Technical Papers for All Participating Conferences:
Foreign Manuscripts: January 1, 1994
Domestic Manuscripts: February 1, 1994
Notification of Acceptance to Authors: April 1, 1994

Six ASME Conferences will be held at the Hyatt Regency Hotel in Minneapolis, Minnesota, from September 11-14, 1994. The Design Technical Conferences include Mechanisms, Design Automation, Design Theory and Methodology, and Flexible Assembly systems. The 14th Annual Computers in Engineering Conference and the 8th Annual Database Symposium will be held simultaneously with the Design Technical Conferences for the first time. A single registration fee entitles registrants to move freely among all conferences. The synergistic topical content of all six conferences will lead to an exciting combined event.

A brief "Call for Papers" for each individual conference is provided below.

Design Technical Conferences

The Sixth International Conference on Design Theory and Methodology

Papers in all areas of mechanical design theory and methodology are solicited. Suggested topics include:

- | | | |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| • Design management | • Design representations | • Cognitive design theories |
| • Design for manufacture | • Design histories | • Product development methods |
| • Concurrent engineering | • Design for quality | • Life-cycle design |
| • Improved productivity methods | • Robust design | • Design tool development |
| • Design methods and models | • Design education | • Computational methods of design |
| • QFD | • Design teams | • Constraint Management |

All papers will be reviewed for simultaneous presentation at the conference and publication in the bound conference proceedings. Full length papers should be submitted for review. The papers title page must include the address and telephone number of a contact person along with key word(s) (from the list if possible) and an abstract. Two part papers will not be accepted. Four copies of the papers should be submitted to: Dr. Larry A. Stauffer, Dept. of Mechanical Engineering, University of Idaho, Moscow, Idaho 83843, U.S.A., +208/885-6037, FAX: +208/885-9031, e-mail: stauffer@uidaho.edu.

Papers of special note will be further reviewed for the best paper award.

Authors wishing papers of an archival nature to be considered for the *Journal of Mechanical Design* must submit five additional copies separately to the Editor, Dr. B. Ravani, independent of the conference review. The Editor's address and journal manuscript requirements may be found inside the back cover of this *Journal*. The conference reviews may be used to facilitate journal review unless specifically requested otherwise by the author.

The Twenty-Third Mechanisms Conference

Papers are invited in all areas of the analysis, synthesis, design and applications of mechanisms. Suggested topics include:

- | | | |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| • Planar mechanisms | • Spatial mechanisms | • Kinematic theory |
| • Geared mechanisms | • Cam/s | • Robotic and manipulator mechanisms |
| • Flexible mechanisms | • Machine dynamics | • Expert systems for mechanism design |
| • Machine elements | • Mechanisms in education | • CAD/CAM of mechanisms |

¹New instructions from the ASME Technical Publishing Department for preparing conference papers on 8.5" X 11" paper using a word-processing or page layout program and a laser printer are available by contacting Barbara Signorelli, Technical Publications, ASME, 345 East 47th Street, New York, NY 10017, 212/505-7779.

All papers will be reviewed for simultaneous presentation at the conference and publication in the bound conference proceedings. Two part papers will not be accepted. Four copies of the papers should be submitted to: Dr. Gordon R. Pennock, Papers Coordinator, School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, U.S.A., (317) 494-5728, FAX: (317) 494-5539.

Papers submitted for the conference will be eligible for the following awards. Mechanical Dynamics, Inc., Ann Arbor, MI, is sponsoring the *MDI Software Award* for contributions that significantly advance the state of the art in computer-aided design or analysis of mechanisms. The winning papers will share a cash prize of \$1000. The *ASME Mechanism Committee Best Paper Award* shall be given for significant original contributions to the design or theory of mechanisms. At least one author must be a corporate member of ASME to qualify for the latter award.

Authors wishing papers of an archival nature to be considered for the *Journal of Mechanical Design* must submit five additional copies separately to the Editor, Dr. R. Ravani, at the same time they submit it for conference review. The Editor's address and journal manuscript requirements may be found inside the back cover of this Journal. The conference reviews may be used to facilitate journal review unless specifically requested otherwise by the author.

A Student Mechanism Design Competition will be held during the conference. All students are encouraged to submit any project concerning the original synthesis and/or analysis of a mechanism of their choice. Interested students must submit a letter of intent to: Dr. John A. Murty, Department of Engineering, University of Denver, 2360 S York St., Denver, CO 80202, U.S.A., (303) 871-3522 on or before May 28, 1994.

For additional information, please contact Dr. Thomas R. Chase, Mechanisms Conference Chair, Mechanical Engineering Department, University of Minnesota, 111 Church St. SE, Minneapolis, MN 55455, (612) 625-0308, FAX: (612) 624-1198, e-mail: trchase@staff.umn.edu.

The Twentieth Design Automation Conference

The ASME Design Automation Conference studies papers in all areas of design automation related to mechanical systems. Suggested topics include:

- Artificial intelligence and knowledge based system in design
- Mechanical systems simulation and analysis
- Concurrent design and design for manufacturability
- Decomposition methods in design and simulation
- Geometric modeling and geometric tolerancing
- Finite element applications in design
- Feature based design
- Object-oriented design and analysis
- Parametric and variational geometry
- Design optimization
- Concurrent design
- Tolerance analysis and synthesis

All papers will be reviewed for simultaneous presentation at the conference and publication in the bound conference proceedings. Two part papers will not be accepted. Five copies of the papers should be submitted to: Dr. Brian Gilmore, Papers Review Chair, Department of Mechanical Engineering, Kim Dier, Pennsylvania State University, University Park, PA, 16802, U.S.A., (814) 863-4736. Suggestions for special session topics or inquiries related to the conference should be made to the Papers Review Chair.

Authors wishing papers of an archival nature to be considered for the *Journal of Mechanical Design* must submit five additional copies separately to the Editor, Dr. R. Ravani, at the same time they submit it for conference review. The Editor's address and journal manuscript requirements may be found inside the back cover of this Journal. The conference reviews may be used to facilitate journal review unless specifically requested otherwise by the author.

The Fourth ASME Conference on Flexible Assembly Systems

The objective of these series of conferences on Flexible Assembly Systems (FAS) is to promote early dissemination of research results and technology transfer. The conference has been extremely successful in attracting industries and universities from U.S. and abroad. The conference involves formal presentation of technical papers and special panel sessions on important topics concerning flexible assembly processes and systems.

Papers are invited from prospective authors from industries, universities, and government laboratories. These papers may cover one or more of the following subject areas:

- Kinematics of the FAS
- Dynamics of the FAS
- Control of the FAS
- Virtual reality
- Design methodology
- Robots programming & integration
- Vision System Integration
- Expert systems
- Assembly sequence analysis & synthesis
- Flexible/automated systems
- Specialized grippers for flexible assembly

All papers will be reviewed for simultaneous presentation at the conference and publication in the bound conference proceedings. Two part papers will not be accepted. Four copies of the papers should be submitted to: Dr. A. H. Soni, Conference Chairman, Department of Mechanical, Industrial & Nuclear Engineering, University of Cincinnati, Cincinnati, OH 45221-0010, (513) 556-2774, FAX: (513) 556-3394.

The papers may be reviewed further for their possible publication in the ASME Journal. Those who wish to have their papers considered for journal publication also, please contact Dr. A. H. Soni for further instructions.

14th Annual International Computers in Engineering Conference and Exposition

The 1994 International Computers in Engineering Conference and Exposition will focus on the computers and computer tools required to support the engineering enterprise. Four copies of papers should be submitted directly to the appropriate Co-Chair corresponding to the topical list presented below:

- Computer aided engineering, computer graphics, CAD/CAM integration and CIM, concurrent engineering:
Dr. Richard Crawford, Dept. of Mechanical Engineering, ETC T 5.160, University of Texas at Austin, Austin, TX, 78712-1063, (512)471-3030, FAX: (512)471-7682, e-mail: rhc@emx.utexas.edu
- Expert systems, knowledge based systems, design theory and methodology, design automation:
Dr. Yong Se Kim, Dept. of General Engineering, University of Illinois, 104 South Mathews Avenue, Urbana, IL 61801-2996, (217)333-1180, FAX: (217)244-5705, e-mail: yskim@ux1.eso.uiuc.edu
- Computers in energy systems, computational fluid mechanics, computational heat transfer, combustion modeling / diagnostics:
Prof. A. K. Gupta, Dept of Mechanical Engineering, University of Maryland, College Park, MD 20742, (301)405-5276, FAX: (301)314-9477
- Finite element techniques, computational mechanics, computational geometry:
Dr. Kenneth Bannister, US Army Research Lab, Weapons Technology Directorate, AMSRL-WT-PD (Ken Bannister), APD, MD 21005-5066, 410)278-6121, FAX: (410)278-6135, e-mail: kabx@brl.mil
- Robotics, real-time control, adaptive control, process control:
Dr. Tony De Sam Lazaro, Dept. of Mechanical Engineering, Washington State University, Pullman, WA 99164-7632, (509)335-4330, FAX: (509)335-4662, e-mail: lazaro@wsuvmi.csc.wsu.edu
- Computers in engineering education:
Dr. Mohammed Khosrowjerdi, School of Engineering, Western New England College, Springfield, MA 01119, (413)782-1337, FAX: (413)782-1746, e-mail: mkhosrowi@wnec.edu

All papers will be reviewed for simultaneous presentation at the conference and publication in the bound conference proceedings. Two part papers will not be accepted. Papers which are deemed to have lasting or archival quality will be recommended for forwarding to the appropriate ASME Journal for their review and potential publication.

For technical program information, contact: Dr. Kosaki Ishii, Technical Program Chair, Dept. of Mechanical Engineering, The Ohio State University, 206 West 18th Avenue, Columbus, OH 43210, (614)292-8486, FAX: (614)292-3163, e-mail: ishii.1@osu.edu. For additional conference information, please contact: Dr. Gary L. Kinzel, Conference Chair, Dept. of Mechanical Engineering, The Ohio State University, 206 West 18th Avenue, Columbus, OH 43210, (614)292-6884, FAX: (614)292-3163, e-mail: kinzel.1@osu.edu.

Eighth Annual Engineering Database Symposium

The theme of the 1994 Engineering Database Symposium is "Integrating the Engineering Enterprise". The purpose of the Symposium is twofold: to publicize recent industry and business successes in implementing integrated engineering enterprise solutions for product conceptualization, design, development, and support, and to present advances in research relevant to product engineering that is vital to the integrated engineering enterprise. Topics of interest include (but are not limited to):

- Engineering enterprise database implementation experiences
- CALS initiative and industrial enterprise integration programs
- Implementation of STEP/PDES and other product exchange standards
- Enterprise engineering integration frameworks and interfaces
- Evaluation of vendor database products
- Engineering applications of object oriented database technologies
- Engineering enterprise product and data modeling
- Engineering enterprise performance, integrity, and security
- Engineering image and document storage systems
- Management of legacy systems in the engineering enterprise

All papers will be reviewed for simultaneous presentation at the conference and publication in the bound conference proceedings. Two part papers will not be accepted. Four copies of the papers should be submitted directly to Peggy Boeks, Conference Chair, EDS, 3555 New King Street, Mail Stop 204, Troy, MI 48098, (313)696-7373, FAX: (313)696-2590. Papers which have archive quality will be forwarded to *Engineering with Computers*, an International Journal, for potential publication.

The Symposium is organized by the ASME Engineering Database Program.