

機器人操縱器

數理、程式與控制

Robot Manipulators

原著者：R P. Paul

譯述者：許 政 行

科技圖書股份有限公司

PDC

本叢書導言

人工智慧，是研究使用計算觀念與方法的智慧。不幸，因智慧是對衆多資訊處理及資訊重現能力的混合。故人工智慧的定義，在目前似乎尚不可能得有定論。

當然，在心理學、哲學、語言學以及相關學科分別提供各種配合與方法以研究智慧。但在這領域中，絕大部分所提出的理論是不完整的，且對計算的形式也非常含混曖昧的。雖然數值的觀念、關係與限制，可由研究的傳佈蒐集，但仍需加以補充。畢竟在事實上，何謂智慧，可能有明確與已成事實來證明。

人工智慧，提供新的配合與新的方法。其中心目標是使電腦具有智慧，並使其更有用途，更能了解定律以完成智慧。有智慧的電腦，明顯地有極大用途。而人工智慧的重點，在於了解使用計算觀念與方法為目的的理性過程，提供理論結構一個全新而不同的基礎。大多數從事人工智慧研究的人們，相信這些理論能應用到任何不論是生物學或固態學上具有智慧的資訊處理。

有些其他影響因素仍需注意。任何能成功地模擬小部分智慧的程式，都是龐大而複雜的。故人工智慧是持續影響着電腦科技的極限。在此所提出的問題是非常困難，但非常有趣而吸引人工智慧研究人們熱心工作着。很自然的，由人工智慧有了穩定的流程觀念傳到電腦科學，沒有絲毫減少的趨勢。

這本人工智慧的MIT叢書，其目的是提供在許多領域的教授們與學生們，有着全世界各個研究中心最合時、最詳細的資料。

Patrick Henry Winston

Mike Brady

溫士敦

布雷台

序 言

本書由許多領域收集有關機器人操縱器的理論：電腦繪圖、機動學、動力學、控制與程式學等。本書是用教科書形式編寫，用來教導工程與電腦科學研究生與大學生的機械人學。機械人學的領域是簇新的，由許多領域所引入幾成等量的定理交互連繫學科（interdisciplinary）。本書在每一領域中，只提出一個定理。這些定理是經由選擇，因其可組合起來提供機器人操縱器控制所有問題的完整工作方法。大部分在本書中的資料是用三角學程度，但在觀念上是新而且不同的。在動力學一章，假定學生已能接受動力學上的 Lagrange 公式。已能使用 Laplace 轉換在控制那一章，並在程式設定章中要具 PASCAL 知識。

本書提供十年的機器人學的經驗，大部分的內容曾經實驗的測試並具驗證，且用在今日仍在運轉的機器人操縱器上。有些內容，澄清了或簡化了已往的系統，並予延伸早期的定理。在觀念上，所有定理均藉數位電腦發展。計算速度、捨入以及記憶的需要，決定許多定理方法的選擇。由於 VLSI 的問世，更深廣的計算技巧是能達成的。

本書以課堂筆記作基礎，將過去四年內在普渡大學與麻省理工學院人工智慧實驗室的協助下所發展的加入而成。攝影複製，則由 Knuth's TEX 系統完成。在本書中所列的定理，大多數是在史丹福大學人工智慧實驗室所發展的。作者極感激 John McCarthy 與 Jerome Feldman 兩位的鼎力協助完成此項研究。也感謝 Antal Bejczy 對動力學一章的奠基工作，Bruce Shimano 對衆多理論的發展。另由 Mike Brady 與 Eric Grimson 的協助。使本書能順利付印。John Birk, Mike Brady, William Fisher, Tomas Lozano Perez, Johnson Luh,

William Perzley 與 Bruce Shimano協助閱讀原稿，並改正不少誤失，作者也非常感謝其他參與協助的人們。Mel Paul 協助校對，並作編排方式的變更。

本書內容一部分取材於由國家科學基金會贊助的研究，其許可號碼為 APR 77-14533, APR 75-13074 及 APR 74-01390。本書中的任何意見、發現與結論或介紹，均是作者的見解，未必反應國家基金會的觀點。

R.P. Paul. 鮑爾

機器人操縱器

目 錄

本叢書導言

序 言

第零章 簡 介

第一章 齊次轉換

1.1 簡 介.....	8
1.2 符 號.....	8
1.3 向 量.....	10
1.4 平 面.....	12
1.5 轉 換.....	13
1.6 平移轉換.....	14
1.7 旋轉變換.....	16
1.8 座標框.....	21
1.9 相對轉換.....	22
1.10 工作物.....	24
1.11 反轉換式.....	26
1.12 一般旋轉變換.....	27
1.13 旋轉的等效角與軸.....	31
1.14 擴展與尺度.....	37
1.15 透視轉換式.....	38

2 機器人操縱器

1.16 轉換方程式	40
1.17 摘要	42
1.18 參考資料	43

第二章 運動方程式

2.1 簡介	45
2.2 方位的制定	47
2.3 Euler角	48
2.4 滾動、俯仰與偏移	50
2.5 位置的制定	52
2.6 圓柱座標系	52
2.7 球座標系	54
2.8 T_0 的制定	55
2.9 A矩陣的制定	55
2.10 以A矩陣為項制定的 T_0	60
2.11 Stanford 型操縱器的運動方程式	61
2.12 肘節操縱器的運動方程式	65
2.13 摘要	68
2.14 參考資料	68

第三章 解運動方程式

3.1 簡介	69
3.2 Euler 轉換的解	69
3.3 RPY 轉換式的解	75
3.4 Sph 轉換式的解	77
3.5 Stanford 型操縱器的解	78
3.6 肘節操縱器的解	84
3.7 摘要	89

3.8 參考資料	90
----------	----

第四章 微分關係

4.1 簡 介	91
4.2 導 數	91
4.3 微分平移與旋轉	92
4.4 座標框間微分變化的轉換	99
4.5 轉換表示式中的微分關係	104
4.6 操縱器的 Jacobian	109
4.7 反 Jacobian	117
4.8 摘 要	125
4.9 參考資料	127

第五章 移動軌跡

5.1 簡 介	128
5.2 工作物描述	128
5.3 作業描述	129
5.4 視 覺	137
5.5 程 式	138
5.6 輸送帶追蹤	140
5.7 位置間的移動	142
5.8 關節移動	147
5.9 直角座標移動	149
5.10 摘 要	165
5.11 參考資料	167

第六章 動力學

6.1 簡 介	168
---------	-----

4 機器人操縱器

6.2	Lagrangian 力學——一個簡例	169
6.3	操縱器動力方程式	176
6.4	Stanford 型操縱器的動力學	192
6.5	摘 要	206
6.6	參考資料	208

第七章 控 制

7.1	簡 介	209
7.2	單連桿操縱器的控制	209
7.3	穩定態的伺服誤差	215
7.4	穩態的速度誤差	218
7.5	加速度誤差	220
7.6	多連桿操縱器的控制	222
7.7	伺服參數的計算	225
7.8	數據取樣伺服的速率	225
7.9	扭矩伺服	226
7.10	摘 要	228
7.11	參考資料	229

第八章 靜 力

8.1	簡 介	230
8.2	力與力矩的表示	230
8.3	力在座標框間的轉換	231
8.4	力、力矩與等效關節扭矩	237
8.5	由關節扭矩決定負載的質量	239
8.6	由腕力感測器決定質量	242
8.7	摘 要	243
8.8	參考資料	243

第九章 應順性

9.1	簡 介	245
9.2	應順性的移動座標框	245
9.3	力下終止	247
9.4	旋 力	249
9.5	更新實界模式	255
9.6	不受限制的移動	258
9.7	摘 要	259
9.8	參考資料	259

第十章 程式規畫

10.1	簡 介	261
10.2	宣告與數據結構	262
10.3	將操縱器移動帶入 PASCAL 中	272
10.4	軟體組織	274
10.5	設定應順性	276
10.6	移動過程	281
10.7	函數化定義的移動	283
10.8	摘 要	288
10.9	參考資料	289

第零章 簡 介

本書是說明有關機器人 (robot) 的操縱器 (manipulators)、程式以及與感測器 (sensors) 間的相互關聯。全書將涵蓋機器人操縱器的程式設定與控制方面的細節。至於外接的感測系統，如視覺等類，只有與操縱器有關聯時才提出處理。爲能對以後各章節的主題有通盤認識，先考察一些工業機器人的起源，以及將其能力擴充後所產生的問題。

工業机器人的前身，是遙控操作器 (teleoperator)，與數值控制工具機 (numerically controlled machine tool) 兩種。遙控操作器或稱 (telecheric)，是允許操作員每隔一段距離來執行工作的一種裝置。數值控制工具機，是基於數位編碼的切削數據，可自動的將金屬成形。

遙控操作器是在二次世界大戰時所發展，用來處理輻射性物質〔 Goertz 〕。操作員與輻射性工作間用一道混凝土牆隔開，藉着一個或多個觀察口 (ports) 可看到工作的進行。遙控操作器用來取代操作員的雙手，其中包含內部的一對鉗子〔 僕件 (the slave) 〕以及外部的兩隻把柄〔 主件 (the master) 〕。鉗子與把柄兩者用六個自由度的機構連接，使主件與僕件可任意定位與定向。此機構是用來控制僕件，使其能模仿主件的運動。

第一部伺服電力遙控操作器 (servoed electric-powered teleoperator) 發展在 1947 年，其僕件使用伺服控制以便尾隨主件的位置。由於操作員無法獲得作用力的資料，因此即使操作員可看到工作的進行，他也很難執行將零件接觸在一起工作。〔 Goertz 〕氏對遙控操作器曾做過適當的描述：“這種通用操作器 (general purpose manipulator) 可用來移動物體、移動槓桿或把手、組合零件以及操縱扳鉗等。所有這些操作過程中，操縱器必需在調整適量的力與力矩之前，與目標物

2 機器人操縱器

作實質接觸，而在接觸瞬間會發生撞擊。通用操縱器，基本上包括不需要的力所帶來的連串撞擊、需要的力所造成的應用，以及需要移動的應用。撞擊力，應儘可能低，其餘不需要的力也應儘可能的小”。〔Goertz〕。

於 1948 年，亦即位置控制遙控操作器問世後的一年，發展出新的遙控操作器系統，可將鉗子的作用力，傳送給操作器，倒驅（back driving）主件。因此，操作器可再度感受將要發生些什麼事。

於 1949 年，面臨着改良航空器的需要，其零件要設計成機製（machined）方式而不再用鉚接法。因此美國空軍資助數值控制銑床（numerically controlled milling machine）的發展〔Rosenberg〕。這項研究是將複雜的伺服系統專業知識，與新發展的數位計算機技巧結合一起。將所要切削的樣式用數位形式存在打孔磁帶上，然後用伺服控制的銑床切削金屬。MIT 輻射實驗室在 1953 年用這樣的機器作為實地施教用。

於 1960 年代，George Devol 展示一部後來成為第一代 Unimate 工業機器人（industrial robot）的機器〔Engelberger〕。這是將遙控操作器的關節連桿（articulated linkage）與數值控制銑床（numerically controlled milling）的伺服軸結合起來。我們可用手帶動工業機器人，機器人會把工作位置順序錄在數位記憶體內，藉此可指使機器人執行任何簡單工作。其工作在於重演這些經由伺服機器人各關節軸得到的正確位置。工作的交互作用，受制於鉗子或末端效應器（end effector）的開合，以及傳出信號給外接設備，或等待同步信號。這種工業機器人用在拾放（pick and place）式工作方面，是很理想的，如用作壓鑄機卸件等類。零件與機器人的相對位置要放得準確，才能被機器人拾取、移出模外，並放在輸送帶上。工業機器人是否成功，就像數值控制銑床一樣，依其精確而具高重複性的數位伺服迴路（servo loops）。機器人與其工作件之間並無交互作用。若壓鑄機移動位置，機器人不能調整到新位置，不比 NC 銑床在切削時，若任意重

定進料位置，仍可成功地切削零件。但若壓鑄機移動位置，可重新指使機器人。工業機器人的成功背景，是基於作業位置已有絕對定義，並依可靠度 (reliability) 與定位重覆性來取代調適 (adaptation) 工作。

1961 年另一項發展在 MIT 的 Lincoln 實驗室中進行 [Ernest]。遙控操作器的僕件臂 (slave arm)，裝有觸覺感測器 (touch sensors)，連接到電算機。在這種情況下，從鉗子回授的觸覺，並不是絕對位置，而由回授信號引導機器人執行工作。雖然手 (hand) 在空間的絕對位置無法獲知，但也不需採用這種資料；因，人不必為要知道手的位置而執行三角計算，取而代之的是用一連串由觸覺定態 (touch-defined states) 方式來定義這工作。缺乏目標物位置的任何整體概念，對機器人造成的限制，有如工作資料全然缺乏對位置控制工業機器人的限制一樣。

在 1963 年，Roberts 氏 [Roberts 63] 展示用景物的數位化半調色圖 (halftone picture) 獲得景物中塊狀目標物的數學描述。用齊次 (homogeneous) 座標轉換，表示其位置與方位 [Roberts 65]。此項工作的重要因素有二：它顯示目標物可用數位化半調色圖來辨認並示明位置，再引用齊次轉換，可作為描述目標物間的相對位置與方位的適當數據結構。若用齊次轉換表示目標物間的相對位置與方位，則轉換的矩陣乘法運算即可建立各目標物間的整體關係。在第一章中將介紹齊次轉換法。這觀念貫徹全書，用來描述目標物間與目標物與操縱器間的位置與方位。

觸覺回授 (touch feedback)，因其緩慢與摸索的天性，在作為輸入機構方面，沒有視覺那樣受人歡迎。1967 年時，已有配備電視照相機作為輸入機構的計算機，可用作實時 (real time) 辨認目標物與其所在位置 [Wichman]。去除觸覺感測器的操縱器，必需依賴位置伺服關節軸 (position-servoed joint axes)。但齊次轉換用直角座標 (Cartesian coordinates) 表示末端效應器 (end effector) 的位置與方位，而不是用一連串非正交 (unorthogonal) 的操縱器關節間的角度來表示。

4 機器人操縱器

Pieper 氏應用閉連桿鏈 (closed-link chains) 的理論，獲得這個問題的解，如此，操縱器可受命移動到工作件的直角座標位置〔Pieper〕。在第二章中，展示對任何已知關節座標作為輸入的操縱器，獲得末端效應器的直角座標位置與方位的方法。位置與方位係用齊次轉換來表示。在第三章中研究其逆反問題，由已知末端效應器直角座標的操縱器，如何獲得其關節座標。這問題相當困難，需要直覺，而且只有幾種簡單的操縱器才有可能用解析法得解；幸而，大部分工業用操縱器都用這種型式，而且為可解的（見圖 3-2，4-3，6-2 與 9-1）。

1970 年時，在 Stanford 大學有一部附有照相機與臂裝備的計算機能玩實地 (real-world) 遊戲，並成功地解出“瞬間錯亂”(instant insanity) 謎題〔Feldman〕。在這謎題中，要將四個正方塊堆疊起來，這些正方塊有不同顏色的面，堆疊後必需使任何一側都沒有相同的顏色。在 MIT 可做到觀察一個方塊結構，並摹繪出來。在日本，研究導向一個“手-眼系統”(hand-eye system)，當向其展現裝配圖時，它能裝配塊狀結構。首先它觀察裝配圖，傳送材料，然後建立所需結構〔Ejiri〕；此項研究的應用潛力，呈現在深入太空探針 (deep spaceprobe) 以及工廠自動化方面、與這些目的相符合的是，將視覺研究導向辨認鑄件以及岩石等更複雜的工作，並將操縱器的研究導向物件的裝配上。

操縱器與視覺感測器的聯合工作，通常是作小量調適移動 (small motion of accommodation) 時所需者。在第四章中考慮做這些移動時的物體當操縱器在擁擠的環境下工作時，就不足直接從一位置移動到另一位置，因而發展出軌跡的觀念。在第五章中，發展用齊次轉換表示直角座標作業的描述，然後發展移動軌跡的兩個基本形式，關節與直角座標間的相關理論，隨着軌跡的引介，用來控制操縱器的簡單點對點伺服 (point-to-point servo) 已不敷使用。第六章發展操縱器的動力學，作為第七章討論控制的基礎。操縱器的動力學十分複雜；主要的問題是如何辨認那些控制操縱器時的重要款項。我們引用 Lagr-

angian 力學獲得動力方程式，然後基於第四章的微分關係簡化方程式，獲得數學形式的關鍵控制方程式。控制這一章，引用古典方法以便讀者對問題有一整體概念。任何特殊操縱器的控制，總是一個單獨問題，而一般性原理只能作為指引。

雖然，視覺在零件與操縱器作相對定位時可做得相當優秀，但在使零件放在一起，却無能為力。這方面所需的是力的回授，也就是前述的純粹位置控制系統發展一年後加在遙控操作器上者。在日本，

Inoue 氏展現一部可轉動曲柄的操縱器〔Inoue〕，這是用定值扭矩驅動適當的操縱器關節來代替通常使用的關節軸位置伺服控制。在Stanford 大學也發展一套系統，當其對直角座標標示的應順性方向 (direction of compliance) 的指令發生反應時，係採用 Inoue 的方式而非位置伺服方式，由計算機自動選擇操縱器的關節，而且採用力伺服〔Paul 72〕。在第八章中我們審視各種座標架中力與扭矩間的關係，以及操縱器的關節扭矩。在第九章，藉着將關節配合自由度的方法，討論提供裝配時所需的應順性〔Shimano〕。Stanford 大學使用這種方式發展一套稱為 WAVE 系統的語言，其中可用直角座標的數學來表示聯合所需力的應順性與握夾 (gripper) 指令來標明一項工作〔Paul 77a〕。1972 年，一個水泵的裝配，作為這種方式的教學展示〔Bolles〕。WAVE 系統所以重要的原因是：它首先將力、觸覺、視覺與位置回授併在一起，並以一現世模型 (world model) 使其互相關聯。此模型用齊次轉換的方式，展現其數據。

以上這些發展均在實驗室中進行。而機器人工業則日漸依賴移動的精確控制，並嘗試以加快操作速度的方式，以改進位置控制機器人 (position-controlled robot) 的經濟效益。為要擴充這些機器人的可能工作範圍，必需更集中注意力在工具的設計上。第一部由計算機控制的機器人是由 Cincinnati Milacron 所發展成功〔Hohn〕。這部機器人可對移動中的輸送帶產生交互作用。這過程係用數位式編碼器 (digital encoder) 來感測輸送帶的位置，並用計算機提供固定座標與移動

座標間的轉換工作。

在第十章中，討論操縱器的程式語言。但不擬發展一套程式語言，代之以將操縱器的控制嵌入 PASCAL 中，以便顯示設定方式的基礎觀念。計算機與程式語言，是工業機器人的基本部分，它們提供在少數通用感測器與一個通用致動器 (actuator) 之間的邏輯方面、數學方面以及轉換方面的界面 (interface)。

由計算機控制的工業機器人，是代表第一種真正通用自動化設備。工業機器人可接受被設定程式來執行任何數量的工作，並取消習慣上設計的高價自動化設備的需要；它可提供產物裝配的自動化，且其價格低廉，使少量生產站的自動化也成為可能。這類工業機器人對未來的社會有重大影響，與今日簡單而重覆性的裝配線工作一般，其理想的性能，是由我們對機器人，而不是對人類的構想以表現其特徵，將來會被淘汰。

參考資料

- Bolles, R. & Paul, R. P. The Use of Sensory Feedback in a Programmable Assembly System, The Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, AIM-220, Oct. 1973.
- Ejiri, M., Uno, T., Yoda, H., et al. "A Prototype Intelligent Robot That Assembles Objects from Plane Drawings," *IEEE Trans. Computers C-21*, 2 (Feb. 1972), 199-207.
- Engelberger, J. F. *Robotics in Practice*, IFS Publications Ltd., Kempston, England, 1980.
- Ernst, H. A. A Computer-Operated Mechanical Hand, Sc.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1961.
- Feldman, J. et al. "The Use of Vision and Manipulation to Solve the Instant Insanity Puzzle," *Proc. Second Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence*, London, England, 1971, 359-364.
- Goertz, R. C. "Manipulators Used for Handling Radioactive Materials," *Human Factors in Technology*, Chapter 27, edited by E. M. Bennett, McGraw-Hill, 1963.

- Hohn, R. E. Application Flexibility of a Computer Controlled Industrial Robot, SME Technical Paper, MR 76-603, 1976.
- Inoue, H. "Computer Controlled Bilateral Manipulator," *Bulletin of the Japanese Society of Mechanical Engineers* 14, 69 (1971), 199-207.
- Paul, R. P. Modeling, Trajectory Calculation and Servoing of a Computer Controlled Arm, Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, AIM 177, 1972.
- Paul, R. P. "WAVE: A Model-Based Language for Manipulator Control," *The Industrial Robot* 4, 1 (March 1977), 10-17.
- Pieper, D. L. The Kinematics of Manipulators Under Computer Control, Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, AIM 72, 1968.
- Roberts, L. G. Machine Perception of Three-Dimensional Solids, Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Report No. 315, 1963.
- Roberts, L. G. Homogeneous Matrix Representation and Manipulation of N-Dimensional Constructs, Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Document No. MS1045, 1965.
- Rosenberg, J. A History of Numerical Control 1949-1972: The Technical Development, Transfer to Industry, and Assimilation, U.S.C. Information Sciences Institute, Marina del Rey, California, Report No. ISI-RR-72-3, 1972.
- Shimano, B. E. The Kinematic Design and Force Control of Computer Controlled Manipulators, Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, AIM 313, 1978.
- Wichman, M. W. The Use of Optical Feedback in Computer Control of an Arm, Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, AIM 56, 1967.

第一章 齊次轉換

1.1 簡 介

機器人操縱器 (robot manipulation) 的研究, 是指有關工作物間的及工作物與操縱器 (manipulator) 間的關係。在本章中, 我們發展用來描述這些關係的表示法。此種相似的表示問題, 已在電腦繪圖的領域中解決, 其工作物間的關係亦需加描述。齊次轉換 (homogeneous transformation) 是用在這領域與電腦視覺 (computer vision) 中 [Duda] [Roberts 63] [Roberts 65]。Denavit 氏使用這些轉換來描述連桿 [Denavit], 現則用來描述操縱器 [Pieper] [Paul 72] [Paul 77b]。

我們首先確立向量與空間的符號, 並介紹其間的轉換。這些轉換, 包含最基本的平移與旋轉。我們將證明這些轉換, 能被視為用座標框 (coordinate frames) 來描述工作物, 並包含操縱器的本身。逆轉換 (inverse transformation) 也將提到。較後的幾章中將描述一般性旋轉變換, 表達與向量的相對旋轉。講解一種算法 (algorithm) 求得等效軸 (equivalent axis) 與任何設定的轉換所顯示的旋轉角。擴展到尺度轉換 (scaling transforms) 簡略地包含在透視轉換 (perspective transformation) 一節中。本章用轉換方程式一節作為結束。

1.2 符 號

在描述工作物間的關係時, 使用點向量 (point vector)、平面,