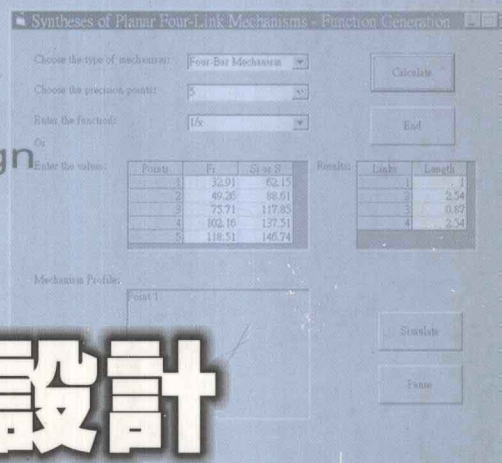


Mechanism · Manipulator | Design

機械設計實務

機構與機械手設計

吳宗謀 · 陳朝光 編著



全華科技圖書股份有限公司 印行

機械設計實務－機構與機械手設計

吳宗謀、陳朝光 編著



全華科技圖書股份有限公司 印行

國家圖書館出版品預行編目資料

機械設計實務：機構與機械手設計 / 吳宗謀,

陳朝光編著. -- 初版. -- 臺北市：全華，

2005[民 94]

面： 公分

ISBN 957-21-4791-9(平裝)

1. 機械-設計

446.19

93024596

機械設計實務－機構與機械手設計

作 者 吳宗謀、陳朝光

執行編輯 宋怡萱

封面設計 傅師達

發行人 陳本源

出版者 全華科技圖書股份有限公司

地 址 104 台北市龍江路 76 巷 20 號 2 樓

電 話 (02) 2507-1300 (總機)

傳 真 (02) 2506-2993

郵政帳號 0100836-1 號

印刷者 宏懋打字印刷股份有限公司

登記證 局版北市業第〇七〇一號

圖書編號 05632

初版一刷 2005 年 2 月

定 價 新台幣 320 元

I S B N 957-21-4791-9 (平裝)

全華科技圖書

www.chwa.com.tw

book@ms1.chwa.com.tw

全華科技網 OpenTech

www.opentech.com.tw

有著作權・侵害必究

序

機械是工業之母，是人類文明的助力。有別於其他萬物，人類能巧妙地利用機械工具以解決超越人類能力的事。暫且不論機械用途之好壞，發明且利用機械工具確實是人類得以驕傲的智慧。

本書將探討人們常用的機械工具中之基本構造，即所謂的機構(Mechanism)與機械手(Robot)。常用的機構分為連桿機構(Linkage mechanism)、凸輪機構(Cam mechanism)與齒輪機構(Gear mechanism)等三種。書中將於各章節分別以圖解法(Graphical method)與解析法>Analytical solution)詳細說明連桿機構、凸輪機構、齒輪機構、平面機械手以及空間機械手等之設計過程。

此外，另一個從事科學或工程研究的重要課題就是數學知識。我們知道數學乃科學之母，其重要性橫跨各個科學與工程領域，機構與機械手設計用到的圖解法與解析法就是應用數學的高度展現，本書會將機構與機械手設計時必要的數學方法獨立成章，以利讀者研習，冀讀者無須再參閱其他相關書籍亦能順利上手，輕鬆達到設計機構與機械手之目的。因此之故，建議數學方法之一章(第二章)以搭配方式學習，也就是設計機構或機械手需用時到再行參考。

再者，對於較困難之章節，如高階非線性設計之理論等，可做為進階研習之用。然本書所附之程式可幫助讀者直接獲取設計結果，為一方便有效之工具。唯程式之發展尚未臻完全之境界，仍有部分尚待開發。其餘疏漏、不足或繆誤之處在所難免，望諸先進、專家們惠予指正，不勝感激。

編輯部序

「系統編輯」是我們的編輯方針，我們所提供給您的，絕不是一本書，而是關於這門學問的所有知識，它們由淺入深，循序漸進。

本書探討機械工具中之基本構造，即機構與機械手。書中詳細說明連桿機構、凸輪機構、齒輪機構、平面機械手以及空間機械手等之設計過程，並將機構與機械手設計時必要的數學方法獨立成章，以利讀者研習，冀讀者無須再參閱其他相關書籍亦能順利上手，輕鬆達到設計機構與機械手之目的。本書適合大學、科大、技術學院機械、動力、航太、自控科系之『機構設計』課程使用及對此內容有興趣者。

同時，爲了使您能有系統且循序漸進研習相關方面的叢書，我們以流程圖的方式，列出各有關圖書的閱讀順序，以減少您研習此門學問的摸索時間，並能對這門學問有完整的知識。若您在這方面有任何問題，歡迎來函詢問，我們將竭誠爲您服務。

相關叢書介紹

書號：0103601

書名：機械設計製圖便覽

日譯：洪榮哲

20K/近期出書

書號：038577

書名：機械設計製造手冊(精裝本)

編著：朱鳳傳.康鳳梅.黃泰翔

施議訓.劉紀嘉.許榮添

簡慶郎.詹世良

32K/472 頁/400 元

書號：00764

書名：創意性機構設計

日譯：林信隆

16K/272 頁/280 元

書號：02734

書名：產品機構設計

編著：顏智偉

20K/255 頁/240 元

書號：01025

書名：實用機構設計圖集

日譯：陳清玉

20K/176 頁/160 元

書號：01138

書名：圖解機構辭典

日譯：唐文聰

20K/224 頁/180 元

書號：0235101

書名：機械元件設計(公制版)

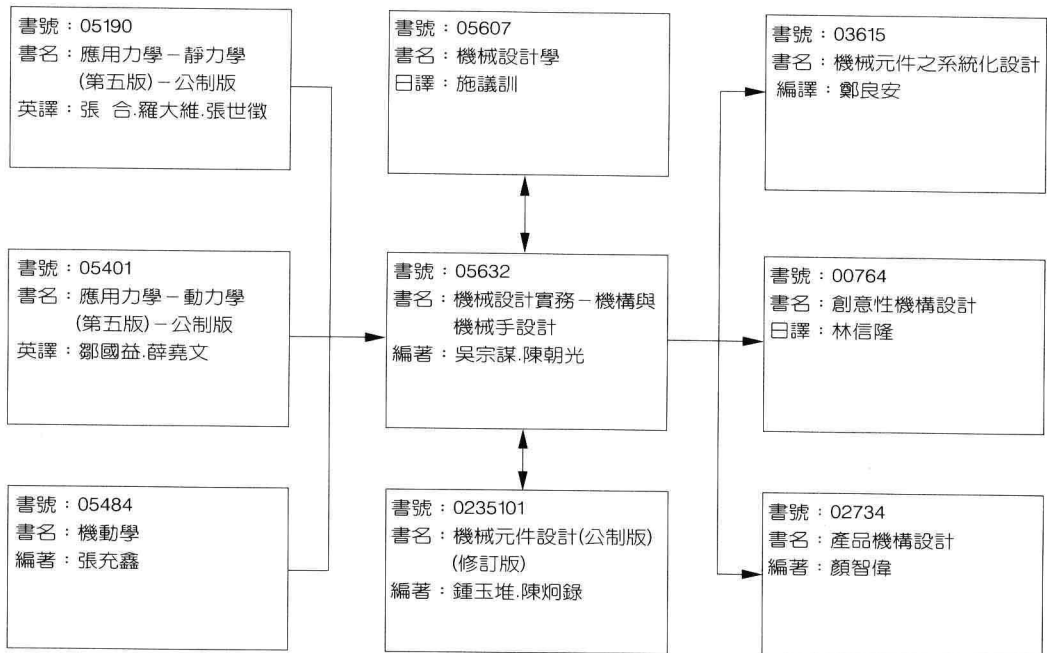
(修訂版)

編著：鍾玉堆.陳炯錄

20K/672 頁/440 元

◎上列書價若有變動，請以
最新定價為準。

流程圖



目 錄

Chapter 1 簡介

1-1	名詞解釋	1-2
1-2	自由度	1-12
1-2-1	機構自由度	1-13
1-2-2	機械手自由度	1-16

Chapter 2 數學方法

2-1	推導運動方程式的方法	2-2
2-1-1	向量迴路法	2-2
2-1-2	齊次轉換矩陣法	2-3
2-1-3	D-H 矩陣法	2-8
2-1-4	圖形運算法	2-11
2-2	解運動方程式的方法	2-18
2-2-1	線性方程式(組)	2-18
2-2-2	非線性方程式(組)	2-23

Chapter 3 機構之構造合成

3-1	機構之一般化	3-2
3-1-1	四桿機構之一般化	3-2
3-1-2	六桿機構之一般化	3-7

3-2 機構之特殊化	3-12
3-2-1 四桿機構之特殊化	3-12
3-2-2 六桿機構之特殊化	3-15

Chapter 4 連桿機構之尺寸合成

4-1 函數產生	4-2
4-1-1 函數產生圖解法	4-3
4-1-2 函數產生解析解	4-33
4-2 路徑產生	4-70
4-2-1 兩個精確點 2P 之路徑產生圖解法	4-70
4-2-2 具有指定的輸入桿角度設定之 2P 路徑產生圖 解法	4-71
4-2-3 三個精確點 3P 之路徑產生圖解法	4-72
4-2-4 具有指定的輸入桿角度設定之 3P 路徑產生圖 解法	4-76
4-2-5 四個精確點 4P 之路徑產生圖解法	4-77
4-3 剛體導引	4-80
4-3-1 兩個精確位置 2P 之剛體導引圖解法	4-80
4-3-2 三個精確位置 3P 之剛體導引圖解法	4-83
4-3-3 四個精確位置 4P 之剛體導引圖解法	4-89

目 錄

Chapter 5 凸輪與齒輪的設計

5-1	凸輪設計圖解法	5-2
5-1-1	從動件為尖點之凸輪外型設計	5-2
5-1-2	從動件為滾輪之凸輪外型設計	5-10
5-1-3	從動件為偏心尖點之凸輪外型設計	5-17
5-1-4	從動件為偏心滾輪之凸輪外型設計	5-18
5-1-5	從動件為平板之凸輪外型設計	5-19
5-1-6	從動件為斜滾輪之凸輪外型設計	5-20
5-1-7	從動件為斜平板之凸輪外型設計	5-23
5-2	凸輪設計解析法	5-23
5-2-1	嚙合原理	5-24
5-2-2	凸輪機構合成	5-26
5-3	正齒輪的解析式	5-29

Chapter 6 機械手運動倒置

6-1	平面機械手	6-2
6-1-1	平面機械手運動倒置圖解法.....	6-2
6-1-2	平面機械手運動倒置解析法.....	6-17
6-2	空間機械手	6-39
6-2-1	運動方程式的推導	6-39
6-2-2	運動方程式的求解	6-41

6-3 牽引機運動倒置	6-42
6-3-1 運動方程式的推導	6-43
6-3-2 運動方程式的求解	6-45

附錄

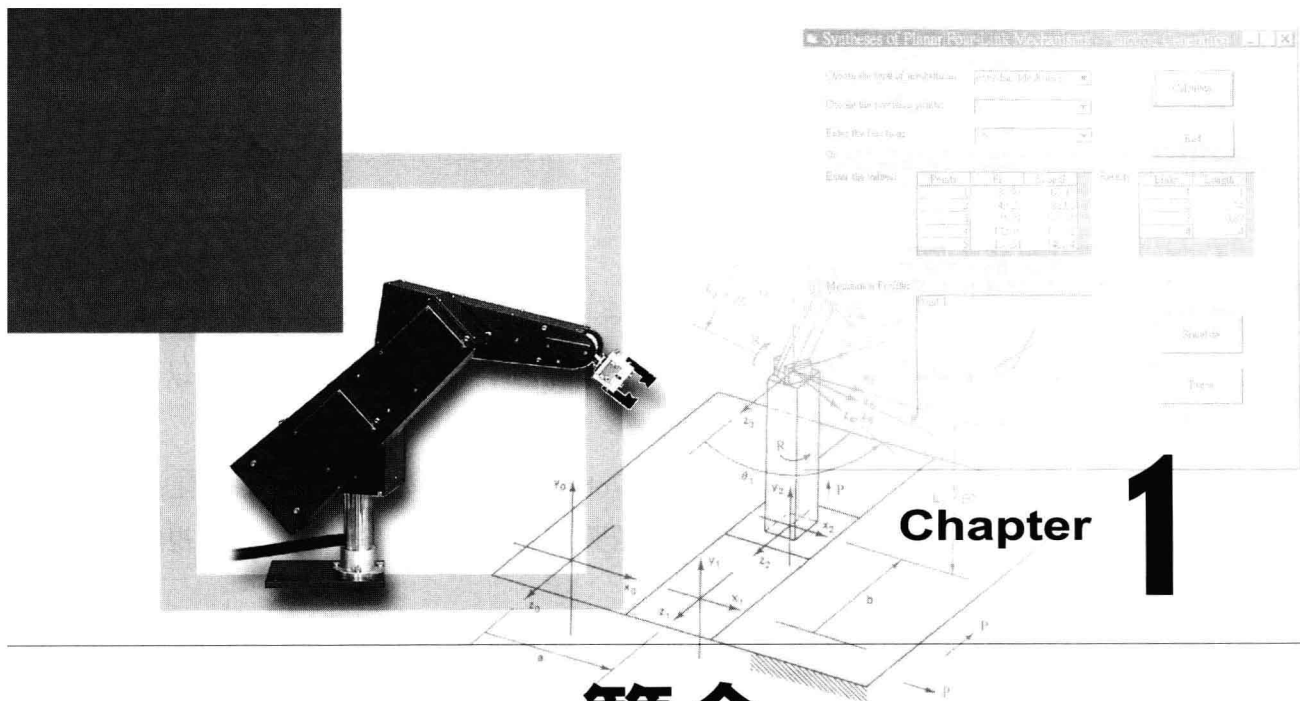
附錄 A 柴氏精點選擇法	A-1
附錄 B 平面四連桿機構圖形運算法	B-1
附錄 C 平面機械手圖形運算法	C-1
附錄 D 機構與機械手設計流程	D-1
附錄 E 程式操作說明	E-1

索引

索引	索-1
----------	-----

參考文獻

參考文獻	R-1
------------	-----



簡介

1-1 名詞解釋

1-2 自由度

1-1 名詞解釋

在開始一連串機構與機械手設計課程之前，一些常見的名詞解釋是必要的，如以下說明：

- 質點(Particle)：具有質量(Mass)，但無體積(Volume)之物體，是一種觀念性的定義(Definition)。以工程而言，只要體積小於周遭環境的百分之一，我們即可將之視為質點。
- 剛體(Rigid-body)：不同於質點，剛體具有質量，也有體積，但受到外力(External force)作用後，不會變形者稱之。當然不會變形是一種理想假設，同樣的，我們也可以工程約定之百分之一變形量為限，只要不超過百分之一的變形量，我們亦可將之視為剛體。
- 運動學(Kinematics)：遠從 16 世紀伽利略(Galileo Galilei 1564-1642)時代，運動學即為一廣為被探討之興盛科學，後經牛頓(Isaac Newton 1642-1727)將其發揚並完備之，為物理學(Physics)的一支，探討自然界物體的運動現象。可定義如下：“Kinematics treats only the geometric aspects of the motion(運動學係處理運動之幾何問題)”。何謂幾何問題？或許有點難懂，更清楚的說，運動學處理質點或剛體的 2D(平面)或 3D(空間)的運動問題，具有以下幾個特點(Key point)－(1)質點或剛體；(2)運動之(角)位移、(角)速度、(角)加速度之問題，但不牽扯到力量；(3)可為 2D 或 3D 的運動。此即為運動學之定義，是本文所要探討的主題。運動學包羅萬象，凡是質點、質點系統、剛體、剛體系統都是其研究的範疇。以工程實用性而言，剛體系統是最實用的一種，其理論也相對的較為困難，除了一般的組合體外，有兩種被獨立出來的構造，即機構與機械手，被加以廣泛的應用與研究，這也是本文所要探討的主題。
- 機構(Mechanism)：根據德國工程師 Reuleaux [1]在 1875 年的 Theoretische Kinematik 一書中提到：“Mechanism is a combination of rigid or resistant bodies so formed and connected that they move upon each other with definite relative motion(機構係由一群具有剛性，可承受外力的物體排列、組織所連接構成的，且個別連接體的運動狀態是確切可知)”。由此可知，關於何謂機構，有以下幾個重點－(1)必須為可承受外力或具有剛性之物體；(2)各連接體之間的運動狀態是確切可知的；(3)為達到各連接體

之間(each other)的運動狀態確切可知，就必須有一些固定的連接關係(例如連接體的兩端都接地…等)，以及為數較少的自由度(最好是只有一個自由度，但可為多閉迴路 Multi-closed-loop)。如此一來當我們把其中一個連接體作為輸入，則其餘連接體就會以既定的運動關係運動。此即為機構之定義，如圖 1-1 所示。常見的機構分類有連桿機構(Linkage mechanism)、凸輪機構(Cam mechanism)與齒輪機構(Gear mechanism)等三種。

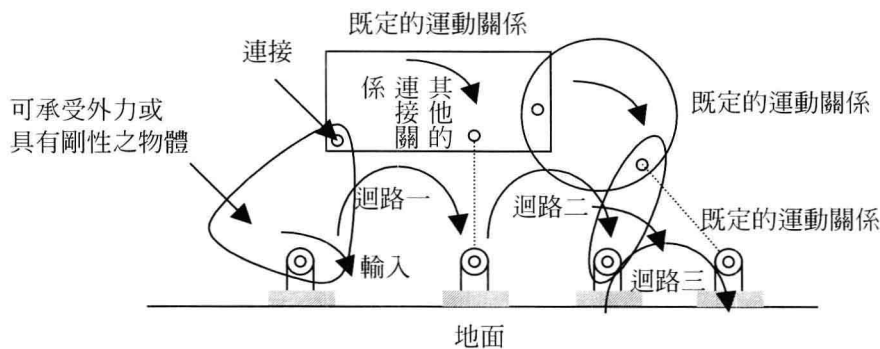


圖 1-1 機構之構造示意圖

- 機械手(Robot)：雖然機構與機械手同是運動學的一支，然其間卻存在著幾個明顯的差異。機械手的定義如下：“A robot is a software-controllable mechanical device that uses sensors to guide one or more end-effectors through programmed motions in a workspace in order to manipulate physical objects(機械手為可經由一些感應器讀取資料再利用**程式控制**將端點所夾取之物體導引至我們所要的運動狀態)”。由此可結論出—(1)機械手主要之目的為導引端點所夾取之物體至我們所要的運動狀態；(2)各個連接體必須為個別可控制的(多自由度，而且為單開迴路 Opened-loop)，故其相對運動狀態無須確切可知，只要能確保端點所夾取之物體至我們所要的運動狀態即可；(3)只需一端接地，以穩固機體本身，每一個別連接體都是獨立的輸入(連接處為輸入處，通常為馬達)，可用程式配合感應器加以控制。此即為機械手之定義，如圖 1-2 所示。

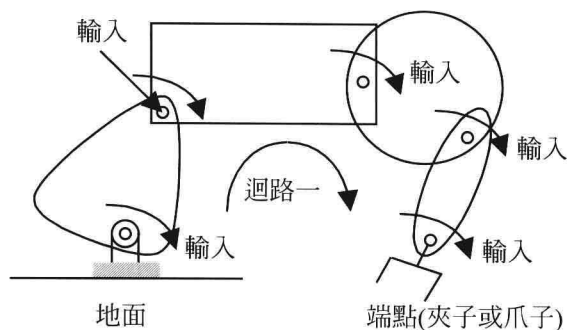


圖 1-2 機械手之構造示意圖

- 分析(Analysis)：任何問題，包括科學、文學、社會學 … 經常會利用到分析的技法，任何分析的過程其實都是人類經由長時間的經驗學習所得之歸納的結果，其中有自然界存在的現象與人為定義等兩種，人為所定義的或許亦是為了解釋自然界存在的現象，或許是超出目前人類所知的現象之探討。無論如何，這些方法、手段、技巧都是人類智慧的結晶，可以解決許多的問題。以數學為例，人們一直想要知道 $1+1$ 到底是多少？當然藉由一些很自然的觀察及數的定義 $1+1$ 是乎是 2，但有些數學家仍在探索 $1+1$ 的真相。這種類似 $1+1$ 等於多少的正向(Forward)問題即稱為分析。我們在許多學問中所學習、涉獵到的大部分都是這種分析方法。
- 設計(Design)：雖然人們已存在許多分析方法可用，但如果要說明人類異於萬物之所以能成為萬物之靈，其實在於“創造(Creation)”。人們可以巧妙地利用萬物創造出符合人們需求的新東西(包括有機與無機或動物或植物或可茲利用的一切物品)，這種創造過程稱為設計。同樣以數學為例，這次我們的已知(Given)並不是運算過程，而是所要求的答案，也就是當我們想要有 2 的時候，我們要如何達到這個目的？這種問題是反向(Backward)的，如果沒有任何條件限制，比如 $1+?$ ，那麼我們可以達到這個目的的方法(Method)、解答(Solution)，將會有很多種，比如 $2+?$ 或 $5+?$ …，這就是所謂的設計。很顯然的，設計學比分析學還要多采多姿，而且它的答案也往往不是唯一的，並且在設計的過程中還要滿足一些既定的要求(條件)，故會增加設計的難度。大體上而言，設計一般比分析還難些。以本文之機構與機械手為例，觀察圖 1-1 與 1-2 得知，機構與機械手都有三組變數—(1)input fixed variables(固定的輸入變數，例如桿長)；(2)input changeable variables(可變的輸入變數，例如各桿之旋轉角度、角速度、角加速度等)；(3)outputs(輸出，如所求指定桿或端點的運動狀態)。如

方程式(1-1)所示，其中 $i \in N$ 代表方程式可能有很多條，亦即所謂的聯立方程組 (Simultaneous equations)。

$$\text{outputs} = f_i(\text{input fixed variables, input changeable variables}), i \in N \dots \dots \dots (1-1)$$

然因機構與機械手所欲設計之變數不同，機構輸入與輸出桿之旋轉角度、角速度、角加速度均為已知，所求為各桿的桿長；而機械手之各桿的桿長與輸出已知，所求為各桿的獨立旋轉角度、角速度、角加速度(因為要作為馬達控制之用)。故，這兩種設計問題有著子然不同的設計要求，其名稱也加以區分開來，機構設計往往稱為“合成 (Synthesis)”，有將如此桿長組合而成為此機構之意；而機械手設計則稱為“倒置 (Inverse)”，有因為連桿如何變化而導致輸出之結果的意思。根據上述，我們整理出以下表格(有些混和性的一般運動學設計問題，其已知與所求並不能很強烈地被分成為合成或倒置，故本文將之歸納於混和類)：

表 1-1 分析和設計的類型與其函數表示

類型		函數表示
分析		$To\ be\ found = f_i(\text{Given, Given}), i \in N$
設計	機構合成(Synthesis)	$\text{Given} = f_i(\text{To be found, Given}), i \in N$
	機械手倒置(Inverse)	$\text{Given} = f_i(\text{Given, To be found}), i \in N$
	混和類	$\text{Given} = f_i(\text{Given and To be found, Given and To be found}), i \in N$

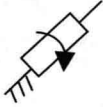
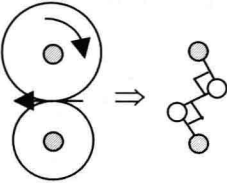
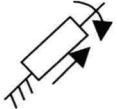
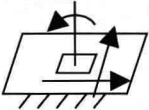
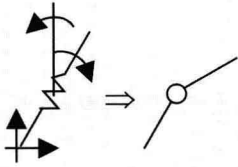
- 可動度(Mobility or Movability)：可動度乃描述一物體(桿件)在座標空間中不受任何束縛下可獨立運動之運動數。以平面座標而言，雖然描述平面座標上任一點只需兩個參數，故常被稱為二維(2D, 2Dimension)，然一物體在平面座標上卻具有 3 個可動度，即 x 與 y 方向的移動量($\Delta x, \Delta y$)與繞 z 軸的旋轉量 $\Delta \theta$ 。同理，在空間座標(3D)上一物體有 6 個可動度，即三個平移量($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)和三個旋轉量($\Delta \alpha, \Delta \phi, \Delta \theta$)。但對於固定桿可動度為 0，而彈簧(Spring)或致動器(Actuator，例如氣壓缸或油壓缸)其可動度為 4。其實早期的德國文獻又有另外一個名詞“Movability”，它是用在運動鏈上的，而“Mobility”則被應用於機構，兩者都有代表可移動數之意。當所有桿件組成機構或機械手之後，其組合體(連接體)之可動度又被稱為自由度(The number of degrees of freedom)。

- 自由度(Degrees of freedom)：自由度意味著欲知所有桿件相對於地面座標的位置狀態所需之**最少獨立輸入數**：“The number of independent inputs required to determine the position of all links of mechanism with respect to ground”。最早是用在研究機構上的，但機械手亦可適用。之所以要了解自由度，因其牽扯到整個連接體(機構或機械手)必須獨立輸入之動力源數。自由度為 1 的機構或機械手只需要 1 個獨立輸入之動力源，即當動力作用於輸入桿後，連接體其餘的桿件之運動狀態將是**確切可知的**，這就是自由度的意思，也是完成整部機構或機械手所不可或缺的設計過程。下一節將會詳細討論自由度的算法。
- 運動對(Kinematic pair)：桿件與桿件做相對運動時產生或所需之組合配對稱為運動對，簡單的講為接頭(Joint)。運動對大致上分為平面與空間兩種，又有所謂的低運動對(Lower pair)與高運動對(Higher pair)兩類。桿件與桿件接觸方式為面(Surface)者稱為低運動對，常見的有迴轉對(Revolute pair)或稱 R 接頭(R joint)、滑行對(Slider or Prismatic pair)或稱 P 接頭(P joint)、螺旋對(Helix pair) 或稱 H 接頭(H joint)、圓柱對(Cylinder)或稱 C 接頭(C joint)、球面對(Sphere) 或稱 S 接頭(S joint)及平面對(Plane)或稱 P_L 接頭(P_L joint)等；而桿件與桿件接觸方式為點(Point)或線(Line)者稱為高運動對，有凸輪對(Cam)、齒輪對(Gear)、滾動對(Rolling contact)等。高運動對可以低運動對等效取代之，常見的有齒輪對以兩組垂直連桿外加兩個 R 接頭等效取代之。另，彈簧自由度為 4，可由一對耦桿(Dyad)等效取代之。了解運動對對於計算自由度有著密不可分的關係。表 1-2 系統地整理出以上所述各種運動對之圖示及其自由度。

表 1-2 各種運動對(接頭)之圖示及其自由度

運動對	圖示	自由度	類別
迴轉對(R 接頭)		1	低運動對
滑行對(P 接頭)		1	低運動對
滾動對		1	高運動對

表 1-2 各種運動對(接頭)之圖示及其自由度 (續)

螺旋對(H 接頭)		1	低運動對
凸輪對		2	高運動對
齒輪對		2	高運動對
圓柱對(C 接頭)		2	低運動對
平面對(P_L 接頭)		3	低運動對
球面對(S 接頭)		3	低運動對
彈簧		4	—

- 運動鏈(Kinematic chain or Associated linkage): 將實際的機構外型賦予抽象的表示(拓模構造, Topological graph or Topological structure), 此表示以圓圈及一些必要的連接關係(單線條、三角形、四邊形 … 等)將桿件及接頭串在一起所構成類似鏈(Chain)的圖形, 故稱之。相對於原始機構, 運動鏈無所謂的**固定桿**, 即固定桿可任意假設, 只要機構可以被製造且能夠產生確切運動即可。據此吾人可利用此運動鏈圖形針對**桿件編號**(固定桿的選擇)、**桿件類型**(類別與外型)以及**接頭種類**加以排列組合以創造(Create)出相同功能但構造不同的新機構, 此類學問稱為機構之構造合成(Structure