

一种新的多功能手部机构的组成研究

郭躬良 张启先

(北京航空学院机器人研究室)

摘要 作者首先对夹持器和现有机器人手部机构存在的主要问题进行分析, 进而对新的机器人手部机构提出四方面的功能要求。本文在引进机构学两个重要概念——活动度 (Mobility) 和连通度 (Connectivity) 的基础上, 推导出机器人手部机构必须满足的两个条件。在众多的可行方案中, 作者选取一种自由度最少, 简单实用的五指机构 A₃-A₃-A₃-C₁-C₁ 作为新的多功能手部机构。

1 引言

在机器人的研究和应用中, 夹持器起着重要的作用, 因为夹持器是机器人手臂与操作体之间的媒介。目前, 夹持器存在的主要问题是 (1) 无法适应操作体外形的变化; (2) 在机器人手臂不动的情况下, 无法对操作体施加任意方向的小运动, 从而使机器人难于在装配工作中应用; (3) 无法控制夹持器在抓取操作体时的夹持力, 从而难于用同一个夹持器去抓取不同材料的操作体。解决上述问题, 通常采用三种方法: (1) Drake 提出在机器人手臂与夹持器之间安装一个适从装置 (the remote center compliance device)^[1], 而 Hill 提出安装一个小运动发生器 (a 3-axis small motion device)^[2], 使夹持器能对操作体施加小运动并且能够控制夹持力。(2) Frank Skinner, Shigo Hirose, Alberto Rovetta 等提出用能够适应操作体外形的机构来替代夹持器^[6, 7, 10, 11]。(3) Salisbury, Okada, Jacobsen 等提出模拟人手, 用多个多自由度手指组成的机器人手部机构 (Robot Hand Mechanism, 以下简记为 RHM) 来替代夹持器^[3, 4, 5, 12, 13, 14]。

近年来, 机器人手部机构研究得到各国学者的普遍重视, 其主要原因是 (1) 一个多自由度的机器人手部机构的作用能够替代多个单自由度夹持器的作用, 从而扩大机器人的应用

范围, 提高机器人的使用效率; (2) 机器人手部机构能够解决夹持器所不能解决的问题;

(3) 机器人手部机构能够满足拟人机器人、护理机器人、遥控机器人和假肢技术的要求。因此, 机器人手部机构研究在国外发展迅速, 各种机器人手部机构模型相继问世^[3-5, 13]。

作者对现有机器人手部机构进行分析, 发现它存在的问题是: (1) 机器人手部机构仅能够对操作体在小范围内施加小运动即手部机构的工作空间过小; (2) 机器人手部机构与操作体的接触不能在手部工作过程中变化, 从而无法使机器人手部抓取操作体的工作状态时时处于最佳。为此, 作者提出一种新的机器人手部机构 (New Robot Hand Mechanism, 以下简记为 NRHM)。它具有四方面的功能: (1) 能够适应操作体外形的变化。(2) 不仅能够对操作体施加小运动, 而且能够增大手部机构的工作空间。(3) 能够控制对操作体的夹持力。(4) 在工作过程中, 能够改变与操作体的接触位置和接触数目, 模拟人手各指交替接触操作体的功能, 保持与操作体处于最佳接触

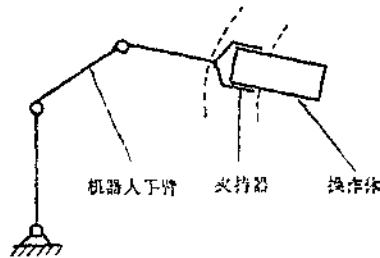


图 1 机器人工作

收到本文的时间是1986年12月15日。

状态。

2 机构的活动度与连通度

本文引进机构学的两个重要概念^[2]：活动度 M ——在运动系统中，确定所有构件相对于机架的位置所需的独立运动参数的总和；连通度 C ——在运动系统中，确定某构件对另一直接或间接相连构件的相对位置所需的独立运动参数的个数。以图2所示单自由度($F=1$)四杆机构为例，说明活动度 M 和连通度 C 的区别。这里 $M=1$ ， $C_{i,j}=1$ ($i, j=0, 1, 2, 3$ 且 $i \neq j$)。若将 A 和 B 换成球面副，则 $M=2$ ， $C_{1,0}=C_{3,0}=C_{3,1}=1$ ，而 $C_{2,1}=C_{2,3}=C_{2,0}=2$ ，因为在计算连通度时要考虑构件2绕自身轴的转动。

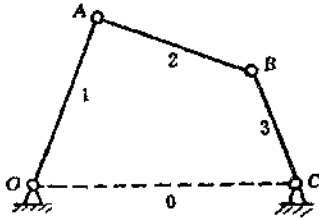


图2 四杆机构

按机构学对有 k 个手指 n 个指节并与操作体有 q 个接触处的RHM来说，它的活动度与连通度计算公式为

$$M \geq \sum_{i=1}^n f_i + \sum_{j=1}^q g_j - 6L \quad (1)$$

$$M' \geq \sum_{i=1}^k g_i - 6L \quad (2)$$

$$C = M - \sum_{i=1}^k \max(m_i, 0) \quad (3)$$

$$C' = M' - \sum_{i=1}^k \max(m_i, 0) \quad (4)$$

式中 M ：各指关节自由运动时RHM的活动度
 M' ：各指关节锁住不动时RHM的活动度
 C ：各指关节自由运动时操作体相对于手掌的连通度。
 C' ：各指关节锁住不动时操作体相对于手掌的连通度

f_i ：手指第 i 关节的自由度，一般 $f_i=1$

g_j ：RHM与操作体第 j 个接触处的自由度

L ：RHM抓取操作体时所构成的独立闭环数

m_i ：操作体相对手掌也固定时，操作体与手掌及第 i 个手指所组成闭链的活动度。

举两例说明RHM抓取操作体时，活动度和连通度的计算方法。

例1 当三个手指组成的9自由度RHM抓取空间某物时，假设每个手指与物体有带摩擦的单点接触(图3)，求 M, M', C, C' 。

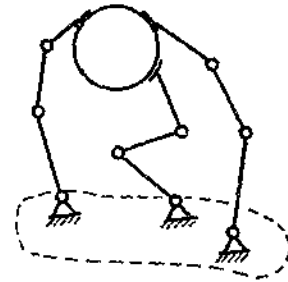


图3 RHM抓取操作体(带摩擦)

这里 $f_i=1$ ， $n=9$ ， $g_j=3$ ， $q=3$ ， $L=2$ ，由式(1)和(2)得 $M=6$ ， $M'=-3$ 。由于 $m_1=m_2=m_3=0$ (见图4)，由式(3)和(4)得 $C=6$ ， $C'=-3$ 。

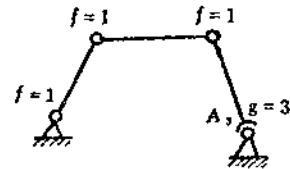


图4 m_i 计算机构

例2 当二个手指组成的6自由度RHM抓取空间某物时，假设每个手指与物体有无摩擦的三点接触(图5)，求 M, M', C, C' 。

这里 $f_i=1$ ， $n=6$ ， $g_j=5$ ， $q=6$ ， $L=5$ ，由式(1)和(2)得 $M=6$ ， $M'=0$ 。由于 $m_1=m_2=0$ (见图6)，按式(3)和(4)得 $C=6$ ， $C'=0$ 。

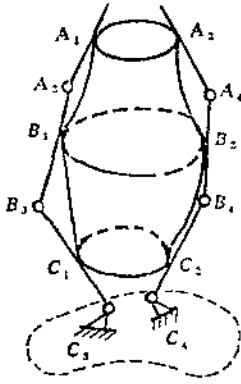


图 5 RHM抓取操作体(无摩擦)

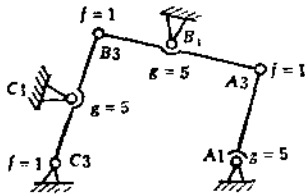


图 6 m_1 计算机构

3 NRHM的确定

综合上面的分析, 可以把NRHM必须满足的四方面功能要求具体化为: (1) 能够适应物体外形的变化。要求NRHM在抓取操作体时, 工作手指都能接触操作体, 而且当各指关节锁住不动时, 操作体相对于手掌不能有任何运动, 即 $C' \leq 0$ 。(2) 能够对操作体施加任意方向的小运动, 即 $C = 6$ 。(3) 能够控制对操作体施加的内力。如果有 r 个内力要控制, 则 $C' = -r$ 。(4) 对一些特殊的操作体(如球体、圆柱体), NRHM要能够完全约束住它, 就必须具有带摩擦的接触。为了确保摩擦力的存在, 就必须保证在接触处法向力的存在且不变号。如果有 g_3 个带摩擦的接触, 则 $C' \leq g_3$ 且 $g_3 > 0$ 。(5) NRHM的手指能够交替接触操作体, 改变接触的位置和数目, 保持与操作体的最佳接触状态, 即要求NRHM在去掉指定的手指后仍然能够满足上述四个要求 ($C = 6, C' \leq 0, C' = -r, C' \leq -g_3$)。

若把 RHM 与操作体的接触视为活动铰链, 则它有5种形式: 无摩擦的点接触($g=5$), 无摩擦的线接触 ($g=4$), 带摩擦的点接触和无摩擦的面接触 ($g=3$), 软指接触($g=2$),

带摩擦的线接触 ($g=1$)。在实际应用中, RHM 与操作体最容易形成的是点接触形式。因此, 作者取NRHM与操作体的两种接触形式——无摩擦的点接触和带摩擦的点接触。

一个三关节手指机构抓取操作体的接触形式共有26种(见表1)。

表 1 手指与操作体的抓取形式

抓取位置	接触点头型	m	
	A1	2	
	A3	0	
	B1	1	
	B3	-1	
	C1	0	
	C3	-2	
	A1B3	-1	
	A3B3	-3	
	A1B1	1	
	A3B1	-1	
	B1C3	-2	
	B3C3	-4	
	B1C1	0	
	B3C1	-2	
		A1C3	-1
		A3C3	-3
A1C1		1	
	A3C1	-1	
	A1B1C1	0	
	A1B1C3	-2	
	A3B1C1	-2	
	A3B1C3	-4	
	A1B3C1	-2	
	A1B3C3	-4	
	A3B3C1	-4	
A3B3C3	-6		

注: 字母A、B、C表示接触点的位置。字母后的数值1和3表示接触点的约束度即 $g_1 = 5$ 和 3。 m 表示将操作体也固定时手掌的活动度。

若NRHM由5个三关节手指机构组成,则它抓取操作体的形式共有

$$n = C_{26}^5 + 4C_{26}^4 + 6C_{26}^3 + 4C_{26}^2 + C_{26}^1 = 142566 \text{ (种)}$$

在众多的抓取方案中,如何确定一种能够满足要求的NRHM就是下面要讨论的问题。按功能要求引出NRHM必须满足的两个条件。

条件 1 如果NRHM能够对操作体施加任意方向的小运动 ($C = 6$),则要求其每个手指与操作体组成的运动链中,作为末杆的操作体的自由度 $\lambda = 6$ 。

推论 每个手指与操作体组成的运动链的自由度 $F \geq \lambda^{[1,2]}$ 。

由此可知,当手指机构与操作体单点接触时有4种可行方案A3、A1、B1、C1;双点接触时有3种可行方案A1B1、A1C1、B1C1。对于三点接触(图7)建立如下不等式:

$$\therefore F = \sum_{i=1}^3 f_i + \sum_{j=1}^3 g_j - 6L \geq 6 \text{ 而 } \sum_{i=1}^3 f_i = 3, L = 2$$

$\therefore g_1 + g_2 + g_3 \geq 15$ 且 $1 \leq g_j \leq 5, j = 1, 2, 3$, 则 $g_j = 5, j = 1, 2, 3$, 即仅有一种可行方案A1B1C1。

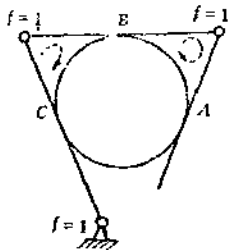


图7 三点接触

因此,单指抓取操作体时有8种可行方案。若NRHM是由5个手指组成,则可行方案共有

$$n_5 = C_8^5 + 4C_8^4 + 6C_8^3 + 4C_8^2 + C_8^1 = 792 \text{ (种)}$$

条件 2 若要求NRHM在抓取操作体时操作体相对于手掌的连通度 $C = 6$,则要求它与操作体组成的机构的活动度 $M \geq 6$ 。

设NRHM与操作体的接触点数为 $q, F =$

$$= \sum_{i=1}^q f_i + \sum_{j=1}^q g_j = 3g_3 + 5g_5. \text{ 这里 } g_3 \text{ 表示带}$$

摩擦的点接触数, g_5 表示无摩擦的点接触数。则按方程(1)有

$$F + 3g_3 + 5g_5 - 6L \geq 6$$

因为 $g_3 + g_5 = q, L = q - 1$

所以 $F - q - 2g_3 \geq 0$ 且 g_3 为正整数

$$5 \leq F \leq 15$$

$$5 \leq q \leq 15$$

满足这些不等式的关系列于表2。

表2 F, q 和 g_3 的关系

q	5					6							
F	7	8	9	10	11	12	13	14	15				
$g_3 \leq$	1	2	3	4	5	1	2	3	4				
q	7				8			9					
F	9	10	11	12	13	14	15	10	11	12	13	14	15
$g_3 \leq$	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3			
q	10		11		12		13		14		15		
F	12	13	14	15	13	14	15	14	15	15			
$g_3 \leq$	1	2	1	2	1	1							

本文设计一种由5个手指组成的NRHM,同时要求它在3指和4指工作时仍能满足功能要求。由于3个手指能够满足要求的RHM仅有A3-A3-A3型手指机构^[3],因此我们要求 $g_3 \geq 3$ 。由此得出, NRHM的可行方案如表3所示。在这35种可行方案中,无论它是处于5指工作,还是处于4指工作(去掉一个A3指),3指工作(A3-A3-A3型)都能满足功能要求,但是还应进一步考虑选取自由度最少的NRHM。因此,作者选取11个自由度的A3-A3-A3-C1-C1型机构作为NRHM(见图8)。

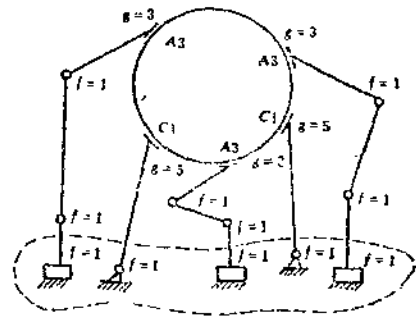


图8 NRHM示意图

表 3 NRHM的可行方案

n	q	F	g_3	机 构 形 式	M/M' (5指)	C/C' (5指)	M/M' (4指)	C/C' (4指)
1	5	11	3	A3-A3-A3-C1-C1	6/-5	6/-5	6/-2	6/-2
2	5	12	3	A3-A3-A3-B1-C1	7/-5	6/-6	7/-2	6/-3
3	5	13	4	A3-A3-A3-A3-C1	6/-7	6/-7	6/-4	6/-4
4	5	13	3	A3-A3-A3-B1-B1	8/-5	6/-7	8/-2	6/-4
5	5	14	4	A3-A3-A3-A3-B1	7/-7	6/-8	7/-4	6/-5
6	5	14	3	A3-A3-A3-A1-B1	9/-5	6/-8	9/-2	6/-5
7	5	15	5	A3-A3-A3-A3-A3	6/-9	6/-9	6/-6	6/-6
8	5	15	4	A3-A3-A3-A3-A1	8/-7	6/-9	8/-4	6/-6
9	5	15	3	A3-A3-A3-A1-A1	10/-5	6/-9	10/-2	6/-6
10	6	12	3	A3-A3-A3-B1C1-C1	6/-6	6/-6	6/-3	6/-3
11	6	13	3	A3-A3-A3-B1C1-B1	7/-6	6/-7	7/-3	6/-4
12	6	13	3	A3-A3-A3-A1C1-C1	7/-6	6/-7	7/-3	6/-4
13	6	13	3	A3-A3-A3-A1B1-C1	7/-6	6/-7	7/-3	6/-4
14	6	14	4	A3-A3-A3-A3-B1C1	6/-8	6/-8	6/-5	6/-5
15	6	14	3	A3-A3-A3-B1C1-A1	8/-6	6/-8	8/-3	6/-5
16	6	14	3	A3-A3-A3-A1B1-B1	8/-6	6/-8	8/-3	6/-5
17	6	14	3	A3-A3-A3-A1C1-B1	8/-6	6/-8	8/-3	6/-5
18	6	15	4	A3-A3-A3-A3-A1B1	7/-8	6/-9	7/-5	6/-6
19	6	15	4	A3-A3-A3-A3-A1C1	7/-8	6/-9	7/-5	6/-6
20	6	15	3	A3-A3-A3-A1B1-A1	9/-6	6/-9	9/-3	6/-6
21	6	15	3	A3-A3-A3-A1C1-A1	9/-6	6/-9	9/-3	6/-6
22	7	13	3	A3-A3-A3-B1C1-B1C1	6/-7	6/-7	6/-4	6/-4
23	7	13	3	A3-A3-A3-A1B1C1-C1	6/-7	6/-7	6/-4	6/-4
24	7	14	3	A3-A3-A3-A1B1C1-B1	7/-7	6/-8	7/-4	6/-5
25	7	14	3	A3-A3-A3-A1B1-B1C1	7/-7	6/-8	7/-4	6/-5
26	7	14	3	A3-A3-A3-A1C1-B1C1	7/-7	6/-8	7/-4	6/-5
27	7	15	4	A3-A3-A3-A3-A1B1C1	6/-9	6/-9	6/-6	6/-6
28	7	15	3	A3-A3-A3-A1B1C1-A1	8/-7	6/-9	8/-4	6/-6
29	7	15	3	A3-A3-A3-A1B1-A1B1	8/-7	6/-9	8/-4	6/-6
30	7	15	3	A3-A3-A3-A1B1-A1C1	8/-7	6/-9	8/-4	6/-6
31	7	15	3	A3-A3-A3-A1C1-A1C1	8/-7	6/-9	8/-4	6/-6
32	8	14	3	A3-A3-A3-A1B1C1-B1C1	6/-8	6/-8	6/-5	6/-5
33	8	15	3	A3-A3-A3-A1B1C1-A1B1	7/-8	6/-9	7/-5	6/-6
34	8	15	3	A3-A3-A3-A1B1C1-A1C1	7/-8	6/-9	7/-5	6/-6
35	9	15	3	A3-A3-A3-A1B1C1-A1B1C1	6/-9	6/-9	6/-6	6/-6

4 结论

4.1 由5个手指A3-A3-A3-C1-C1型机构组成的NRHM,若5个手指同时工作,由于 $C=6$,则它能够对操作体施加任意方向的运动;又由于 $C'=-5$,我们可以控制它的5个内力,使三个带摩擦的点接触存在。

4.2 若4个手指A3-A3-C1-C1同时工作,由于 $C=6$, $C'=-2$,我们仍能控制它的2个内力,使二个带摩擦的点接触存在。

4.3 若3个手指A3-A3-A3同时工作,由于 $C=6$, $C'=-3$,我们同样也可以控制它的三个内力,使三个带摩擦的点接触存在。

参 考 文 献

1. 张启先,空间机构的分析与综合. 北京,机械工业出版社,1984:40-60
2. Hunt K H. Kinematic Geometry of Mechanisms. Oxford University Press, 1978:31-50
3. Salisbury J K, Roth B. Kinematic and Force Analysis of Articulated Mechanical Hands, ASME

- Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design 1983, 105:1-7
4. Jacobsen S C et al. The UTAH/M.I.T. Dextrous Hand, Work in Progress, The International Journal of Robotics Research 1984, 3(4): 21-50
 5. Okada T. Object-Handling System for Manual Industry. IEEE Trans on System, Man, and Cybernetics 1979, SMC-9(2):79-89
 6. Skinner F. Designing a Multiple Prehension Manipulator. Journal of Mechanical Engineering 1975, 97(9):30-37
 7. Rovetta A. On Specific Problems of Design of Multipurpose Mechanical Hands in Industrial Robots. Seventh International Symposium on Industrial Robots, Tokyo, Japan, 1977:337-343
 8. Hill J W. Force-Controlled Assembler, Presented at Robots I Conference, Detroit, Mich, Nov, 1977
 9. Drake S. Using Compliance in Lieu of Sensory Feedback for Automatic Assembly, Charles Stark Draper Laboratory Report T-857, Sept 1977
 10. Shigeo H, Yoji U. The Development of Soft Gripper for the Versatile Robot Hand. The Journal of Mechanism and Machine Theory 1978, 13:351-358
 11. Crossley F R E, Umholtz F G. Design for a Three-fingered Hand. The Journal of Mechanism and Machine Theory 1977, 12:85-93
 12. Kobayashi H. Control and Geometrical Considerations for an Articulated Robot Hand. The Inter J of Robotics Research 1985, 4(1):3-12
 13. Kobayashi H. On the Articulated Hands, In Hanafusa H eds. The Second International Symposium of Robotics Research 1985:293-300
 14. Hanafusa H, Asada H. Stable Prehension by a Robot Hand with Elastic Fingers, Seventh International Symposium on Industrial Robots, Tokyo, Japan, 1977:361-368

Structure Study of a New Multi-functional Hand-mechanism

GUO Gongliang ZHANG Qixian

In this paper, we study current robot grippers and hand-mechanisms problems, and put forward four functional requirements of a new robot hand-mechanism. On the basis of two fundamental conceptions—mobility and connectivity of the mechanism, we get two conditions which must be satisfied by a robot hand-mechanism. And finally, we select from many feasible schemes a certain kind of five-finger-mechanism, namely, A3-A3-A3-C1-C1, as the new multi-functional hand-mechanism, which is a simple and practical mechanism with minimum degrees of freedom.

以色列的工业机器人中心

1983年,农场工业学会联合以色列的首席科学家创立了这个中心。目标是向以色列工业界介绍机器人技术、柔性自动化和 CAD/CAM。该中心拥有一批机器人。该中心的活动领域是:

1 工厂自动化问题的仿真

该中心鼓励工厂用它的设备研究专门自动化问题的可能解决方法和观察这种解决方法的效果。

2 机器人技术信息的传播

该中心有一大型图书馆,其中有书籍、杂志、录相带和一个计算机化的数据库。可以通过这个数据库查询和调用以色列和世界上的有关机器人技术的资

料。

3 咨询

为工厂、学校、工程公司解决高级自动化问题,但并不代替这些单位设计具体的零件或整机。

4 训练

在各种水平上对机器人的使用者进行训练,为受教育者编写了各种全日制的研究班和制定了科学的学习计划。据两年的统计,有2000名管理人员、工程师和技术员在此学习。其影响遍及全国的许多种行业,如飞机制造行业、农业、科学研究和军事工程。

(孟祥楷)