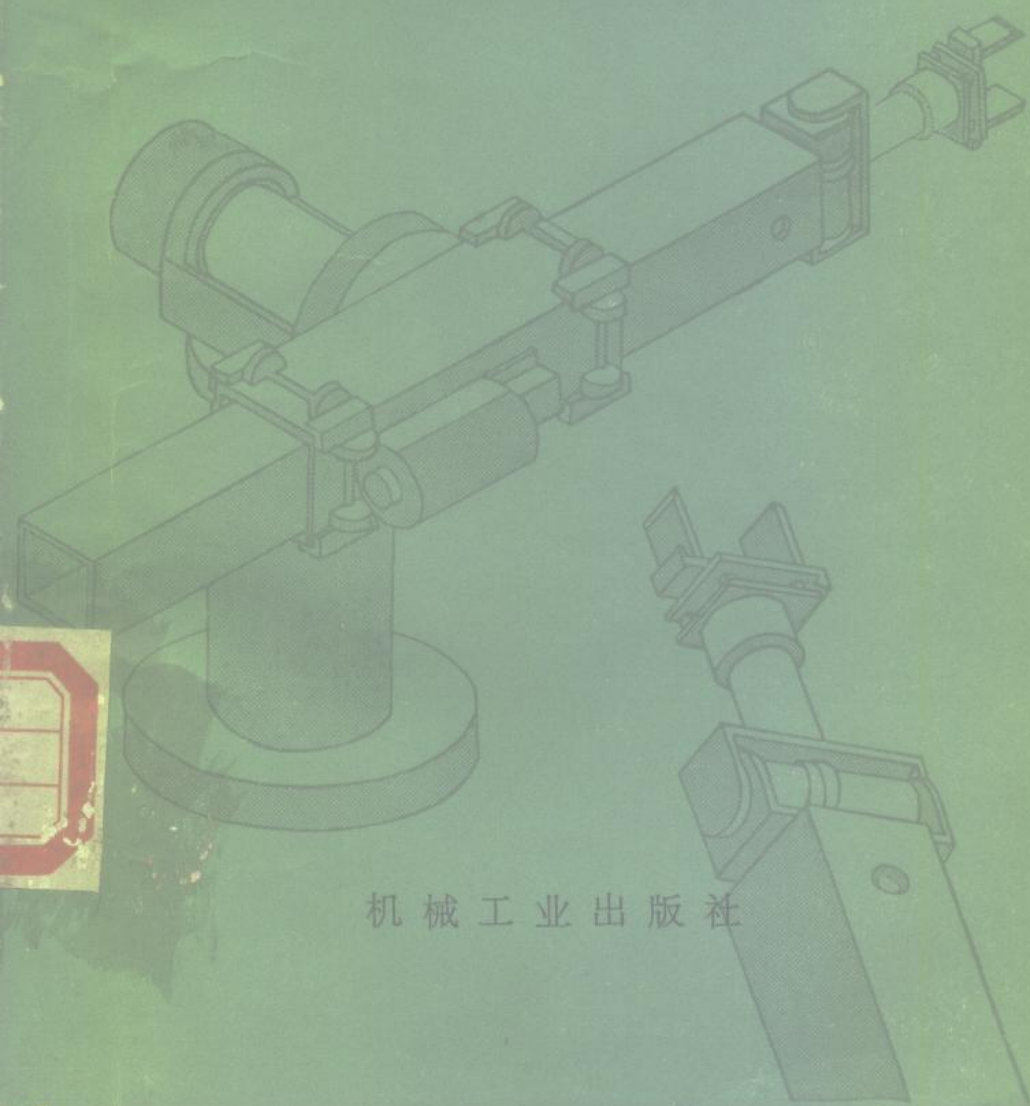


机器人操作手： 数学、编程与控制

[美] 理查德·P·保罗 著



机械工业出版社

78.52
422

机器人操作手： 数学、编程与控制

[美] 理查德·P·保罗 著

郑时雄 谢存禧 译

张启先 校



机械工业出版社

DL83/65
译序

当前, 机器人技术正在世界范围内快速地发展。为了对付新的技术革命的挑战, 加速在我国实现四个现代化, 发展机器人技术势在必行。为此, 我们把美国麻省理工学院 (MIT) 出版的人工智能丛书之一《ROBOT MANIPULATORS, MATHEMATICS, PROGRAMMING, AND CONTROL》译出, 供读者参考。

机器人学是一门综合性的学科, 有关机器人的机构学和控制理论是机器人学的重要组成部分。这本书是这方面的一本很好的入门书。本书写成教材的形式, 内容由浅入深, 系统性强。为了便于学习, 每章还附有完整的例题。本书所用到的基础知识, 都是一般大学本科所学过的, 所用的编程语言, 也是普遍应用的 PASCAL 语言, 所以适合于作为大学高年级学生和研究生的教科书, 也是有关科技人员的一本合适的参考书。

本书是作者理查德·P·保罗 (Richard·P·Paul) 多年从事科学研究和教学的成果的总结, 内容极其丰富。此外, 书中还介绍了斯坦福大学, 麻省理工学院等近二十年来的研究成果, 所以在某种程度上反映了当前世界上这方面知识的现状。自从1981年本书出版以来, 在美国高等学校被广泛地用作教科书, 也为许多外国学者所推荐。希本书的翻译出版, 能对发展我国的机器人技术起到一定作用。

译者衷心感谢张启先教授, 他在1982年出访美国时带回本书的1982年再版本, 供我们作为研究生教材, 这次又在百忙中仔细校订了全部译稿。

由于时间短促, 译者水平有限, 译文中缺点或错误在所难免, 热切欢迎读者批评指出。

人工智能丛书前言

人工智能是用计算的思想和方法对智能进行研究。遗憾的是，目前似乎不可能对智能下定义，这是因为智能象是如此众多信息处理和信息表示能力的混合。

当然，心理学、哲学、语言学和有关学科对智能都提供各种研究观点及方法。但是，这些领域中提出的理论多半是太不完全和模糊其词，不能用计算术语去认识。这说明还需要更多一些东西，即使从对智能确属可能的一些生动实证的传统研究中，能够找到可贵的思想、联系和约束。

人工智能提供一个新的观点和新的方法学，其中心目标是使计算机智能化，让计算机更为有用并且能够理解使智能成为可能的一些原理。这种智能计算机显然将是极为有用的。更为深刻的观点是：人工智能的目标在于用计算的思想和方法去了解智能，从而对理论的形成提供一个崭新的基础。大多数从事人工智能的人相信，这些理论将可应用于无论是生物的或是固态的智能信息处理机。

还有一些副作用也值得注意。任何能成功地模拟即便是一小部分智能的程序，本身将庞大而复杂，因而人工智能将继续受到计算机科学技术的限制。所碰到的问题已足够艰难有趣而诱使从事人工智能人员热情地工作着。这样自然经常有一股思想从人工智能流入计算机科学，而且这股流动未见减退迹象。

麻省理工学院（MIT）出版人工智能丛书，是为很多领域的专业人员和学生们及时提供有关世界研究中心前沿正在发生的详细信息。

帕特里克·亨利·温斯顿
迈克·布雷迪

序

这本有关机器人操作手的书，包括了计算机制图学、运动学、动力学，控制以及编程等领域的理论。这本书写成教科书型式，并已被用为工程和计算机科学研究生和大学生学习“机器人学”课程时的教科书。机器人学是崭新的和交叉的学科，许多领域的理论几乎不断地被引进这个学科中。本书仅介绍每个领域中的一种理论，选用这些理论，是由于它们能够综合起来，提供一种有效而且连贯的方法去解决操作手控制的所有问题。书中大多数素材属于三角学的范畴，但在概念上是新的。动力学这一章是设想学生已能接受拉格朗日动力学方程。在控制一章中运用了拉普拉斯变换，而在最后程序编制一章则设想具有PASCAL知识。

这本著作反映了机器人学十年来的经历：所介绍的大多数内容，已通过实验加以验证，并在现今机器人操作手工作中应用。某些材料把过去的体系讲得更清楚，或者对早期的理论加以简化和扩展。所有理论均考虑到数字计算机提供的手段而加以发展。很多理论方法的选取是以计算速度、舍入和存储的要求作为指导思想。然而由于大规模集成电路（VLSI）的出现，计算上更精深的方法，可能是合适的。

这本书以新近四年在普渡大学的讲稿为基础，并利用麻省理工学院人工智能实验室的设备而完成的。直接照相制版用拷贝是使用克努特（Knuth）的TEX系统制出的。本书介绍的许多理论，是斯坦福人工智能实验室的成果。作者在此对约翰·麦卡锡（John McCarthy）和杰罗姆·费尔德曼（Jerome Feldman）二位先生表示感谢，他们为作者提供了进行研究的机会。作者还要感谢安塔尔·毕杰斯（Antal Bejezy）和布鲁斯·希姆诺（Bruce Shimano）二位先生，动力学一章是以前一位的著作为

基础，至于后一位则完成了许多理论研究工作。由于迈克·布雷迪 (Mike Brady) 和埃里克·格里姆逊 (Eric Grimson) 的支持，本书令人高兴地最后转入了印刷出版。约翰·伯克 (John Birk)，迈克·布雷迪，威廉·费希尔 (William Fisher)，托马斯·洛扎诺·佩雷兹 (Tomas Lozano Perez)，约翰逊·卢赫 (Johnson Luh)，威廉·珀兹雷 (William Perzley) 和布鲁斯·希姆诺 (Bruce Shimano) 帮助审读了部分手稿，并纠正了许多错误。作者对任何遗留错误负完全责任。梅尔·保罗 (Mel Paul) 协助校订和剪辑工作。

本书资料是以国家科学基金会 APR77-14533, APR75-13074 及 APR74-01390 号资助下的研究作为部分基础的。在这次出版中表明的任何意见，发现及结论或建议均属作者本人，并不一定反映国家科学基金会的观点。

理查德·P·保罗

目 录

译序

人工智能丛书前言

序

导言	1
参考文献	6
第一章 齐次变换	8
1.1 引言	8
1.2 符号	8
1.3 向量	9
1.4 平面	11
1.5 变换	12
1.6 移动变换	13
1.7 转动变换	14
1.8 坐标架	19
1.9 相对变换	21
1.10 物体	23
1.11 逆变换	24
1.12 一般转动变换	25
1.13 等效的旋转角和旋转轴	29
1.14 伸展和缩放	34
1.15 透视变换	35
1.16 变换方程	37
1.17 总结	38
1.18 参考文献	39
第二章 运动方程	40
2.1 引言	40
2.2 姿态的规定	41
2.3 欧拉角	42
2.4 滚转, 俯仰和侧摆	44

2.5	位置的规定	46
2.6	圆柱坐标	46
2.7	球坐标	48
2.8	T_0 的规定	50
2.9	A 矩阵的规定	50
2.10	T_0 用 A 矩阵的确定	55
2.11	斯坦福操作手的运动方程	56
2.12	肘状操作手的运动方程	59
2.13	总结	62
2.14	参考文献	62
第三章	求解运动方程	63
3.1	引言	63
3.2	欧拉变换的解	63
3.3	RPY 变换的解	68
3.4	Sph 变换的解	70
3.5	斯坦福操作手的解	71
3.6	肘状操作手的解	77
3.7	总结	80
3.8	参考文献	82
第四章	微分关系式	83
4.1	引言	83
4.2	导数	83
4.3	微移动和微转动	84
4.3.1	微移动和微转动变换 Δ	85
4.3.2	等效微转动	87
4.4	坐标架间微变化的变换	91
4.5	变换式中的微分关系式	96
4.6	操作手的雅可比矩阵	100
4.6.1	斯坦福操作手的雅可比矩阵	102
4.7	逆雅可比矩阵	108
4.8	总结	115
4.9	参考文献	117
第五章	运动轨迹	118

5.1 引言	118
5.2 物体的描述	118
5.3 作业的描述	119
5.4 视觉	126
5.5 程序	126
5.6 传送带的跟踪	128
5.7 两位置之间的运动	130
5.8 关节运动	135
5.9 笛卡儿运动	137
5.9.1 两个位置之间的运动	138
5.9.2 路径区段之间的过渡	142
5.9.3 计算周期的求解	148
5.9.4 插值	150
5.10 总结	150
5.11 参考文献	152
第六章 动力学	153
6.1 引言	153
6.2 拉格朗日力学——一个简单的例子	154
6.2.1 动能和势能	155
6.2.2 拉格朗日函数	156
6.2.3 动力学方程	156
6.3 操作手动力学方程	160
6.3.1 操作手上一点的速度	160
6.3.2 动能	161
6.3.3 势能	164
6.3.4 拉格朗日函数	165
6.3.5 动力学方程	165
6.3.6 惯量项 D_{ij} 的简化形式	168
6.3.7 惯量项 D_{ii} 的简化形式	171
6.3.8 重力项 D_i 的简化形式	172
6.4 斯坦福操作手的动力学	175
6.4.1 有效惯量	176
6.4.2 斯坦福操作手的耦合惯量	184

6.4.3 斯坦福操作手的重力载荷项	185
6.5 总结	188
6.6 参考文献	190
第七章 控制	191
7.1 引言	191
7.2 单杆操作手的控制	191
7.3 稳态的伺服误差	196
7.4 稳态的速度误差	199
7.5 加速度误差	200
7.6 多杆操作手的控制	202
7.7 伺服系统的参数计算	204
7.8 数据采样伺服系统的采样率	205
7.9 力矩伺服	205
7.10 总结	207
7.11 参考文献	208
第八章 静力	210
8.1 引言	210
8.2 力和力矩表达式	210
8.3 坐标架之间力的变换	211
8.4 力、力矩和等效关节力矩	216
8.5 按关节力矩确定负载的质量	218
8.6 用腕关节力传感器确定质量	221
8.7 总结	221
8.8 参考文献	222
第九章 顺应性	223
9.1 引言	223
9.2 顺应运动的坐标架	223
9.3 遏止力	224
9.4 施加力	226
9.4.1 外部约束的顺应	230
9.4.2 顺应运动的补偿	231
9.5 结构作业模型的更新	232
9.6 自由前的运动	235

9.6.1 颤动	235
9.7 总结	236
9.8 参考文献	236
第十章 编制程序	238
10.1 引言	238
10.2 说明和数据结构	239
10.2.1 变换公式的数据结构	242
10.2.2 解数据结构变换方程	246
10.2.3 求微坐标变换表达式	247
10.3 用PASCAL语言描述操作手运动	248
10.4 软件编制	251
10.5 顺应性的指定	253
10.6 运动过程	258
10.7 用函数定义的运动	260
10.7.1 末端夹持器的并入	263
10.8 总结	265
10.9 参考文献	266

导 言

本书介绍工业机器人操作手的程序编制及其与传感器的互相作用。我们将详细地讨论程序编制和控制，而对于外部传感器，譬如说视觉传感器，则仅限于在与操作手相互作用范围内才给予讨论。为了完全理解在以下章节所提出的专题，首先让我们看看工业机器人的起源，和随着它们的能力扩展而出现的问题。

现代的工业机器人，起源于遥控操作器和数字控制机床。遥控操作器，是容许操作者在一定距离以外进行作业的装置。而数控机床则基于切削数据的数字编码，自动地使金属成型。

遥控操作器是在第二次世界大战期间，为了对付放射性材料而发展起来的[Goertz]。借助有一个或几个观察口的混凝土墙，使操作者能够与放射性作业隔开。遥控操作器用来代替操作者的手：它由墙内的一付夹钳（从动装置）和墙外的两根操作杆（主动装置）所组成。为了使主动装置和从动装置能处于任意位置和姿态，钳子和操作杆两者，由两个具有六个自由度的机构连接在一起。为了重复主动装置的运动，机构被用来控制从动装置。

1947年电伺服型遥控操作器研制成功，从动装置受伺服控制，随着主动装置的位置而随动。尽管操作者能够观察到从动装置的工作，但却没有力的信息，所以仍难以完成要求零件与零件接触的作业。Goertz对遥控操作器的工作作了很好的描述：“通用操作手可用来移动物体，操作杆杠或旋钮，装配零件以及拧动扳手。在所有这些操作中，操作手在物体上施加预期的力和力矩之前，必须与物体产生直接接触。当操作手进行这一接触时就会发生碰撞。一般操作手的动作本质上是由一系列无用力的碰撞、有效力的作用以及预期运动所组成。撞击力应该是小的，任何其它无用力也应该是小的。”

在1948年，即位置控制遥控操作器被引用一年后，研制成一

种新的遥控操作器系统。在该系统中，夹钳施加的力经主动装置反馈给操作者：操作者能再次感觉到工作进行的情况。

1949年，面对着努力获得先进飞机的需求（这种飞机的零件采用机加工而不采用铆接），空军赞助了发展数控铣床的研究[Rosenberg]。这一研究把复杂的伺服系统专门知识，与新发展起来的数字计算机技术结合起来。所需切削的图形，以数字的形式存贮于穿孔纸带中，然后通过伺服，控制铣床来切削金属。MIT放射实验室在1953年示范了这种机床。

二十世纪六十年代，乔治·德威(George Devol)示出了成为第一台Unimate工业机器人的装置[Engelberger]。这是一台将遥控操作器的关节型连杆机构和数控铣床伺服轴组合而成的装置。用手驱动工业机器人通过顺序的工作位置，这些工作位置被记录在数字存储器中，工业机器人就能够被示教以执行任何简单的工作。机器人作业的执行，在于伺服驱动各个关节轴，而把这些工作位置再现出来。这样，与作业的配合作用，就限于末端夹持器或夹钳的开合，和限于向外围设备发出讯号和等待同步讯号。对象从压铸机上卸下工件这样的攫取和放置工作，使用工业机器人是理想的。零件可以出现在按机器人标定的精确位置上：机器人可以抓住工件，移出铸模，并且把它放落到运输机上。象数控(NC)铣床一样，工业机器人的成功，有赖于精度，能反复重复的数字伺服回路。机器人和它所执行的工作两者之间没有交互作用。如果压铸机搬动一下，机器人就决不更比NC铣床能适应新位置。如果在切削期间工作台被任意地重新放置，NC铣床则能成功地加工一零件。然而压铸机搬动后，仍可对机器人重新示教。工业机器人成功之处在于它适用于作业位置被绝对标定的工作，也在于它代替适应性而具有位置重现能力与可靠性。

1961年，在MIT的林肯(Lincoln)实验室中取得又一进展[Ernst]。他们把一个装有触觉传感器的遥控操作器从动臂与计算机连接起来。在这种情况下，机器人的动作是由夹钳反馈的触觉，而不是由绝对位置来导引。虽然可以去找出从动手在空间的

绝对位置，但由于人们没有进行为获得手的位置所需的三角学计算，所以没有采用这种方法，而代之以按照顺序可获的触觉状态来规定动作。由于对工作目标缺乏任何全局位置观念，使这种机器人受到限制，就象完全缺乏作业信息而使位置控制工业机器人受到限制一样。

1963年罗伯茨(Roberts)论证了物景浓淡点图像数字化处理的可行性[Roberts63]，以得到由块状物体所组成的图像的数学表达方法，这些物体的位置和姿态是用齐次坐标变换来表达[Roberts65]。这一工作之所以是重要的，有以下两方面理由：一是论证了物体可以被识别，并且可用数字化的浓淡点图像来定义；二是介绍了用齐次变换作为一种合适的数据结构去描述物体之间的相对位置和姿态。如果物体之间的相对位置和姿态用齐次变换来描述，用变换矩阵乘法运算就建立了物体间的全面关系。在第一章中，我们介绍齐次变换，并用它贯串全书，以描述物体之间以及物体和操作手之间的位置和姿态。

触觉反馈由于它的缓慢和摸索着工作的本质而被放下，转而采用视觉作为输入机构。直至1967年，一台以电视摄像机作为输入机构的计算机装置，能实时地识别物体及其位置[Wichman]。去掉触觉传感器的操作手，就依靠位置伺服关节轴进行工作。然而，齐次变换仅用笛卡儿坐标来表示末端夹持器的位置和姿态，而不表示一系列非正交操作手关节间的角度。皮珀(Pieper)应用了闭合连杆链的理论求出这一问题的解，从而可以指挥操作手移动至工作空间中的笛卡儿位置[Pieper]。在第二章中，我们对任何操作手，给出关节坐标作为输入量，而阐述如何获得末端夹持器的笛卡儿坐标位置和姿态。位置和姿态是以齐次变换来表示的。在第三章中，我们给出操作手末端夹持器的笛卡儿坐标，而研究如何获得关节坐标这一个逆问题。这是一个困难的问题，有直觉知识要求，且仅对有限的简单操作手能进行解析。幸而绝大部分市场上的操作手都属于这一类，而且是可解的（见图3.2, 4.3, 6.2, 和9.1）。

至1970年,一台带有摄像机和机械臂装置,能够玩游戏和解难题的计算机在斯坦福大学研制成功[Feldman]。在所解的难题中,要把四个带不同颜色面的立方体堆放在一起,而要求堆的每一侧面不能出现同一的颜色。在MIT,它们能够观察和重现一种块状的结构物。在日本,研究出一个手眼系统,这个系统能够按装配图装配块料结构物。它首先看清图纸,了解所用的材料,然后拼成所要求的结构[Ejiri]。这一研究可以用在外层空间的探索和工厂的自动化等方面。相应于这些目的,视觉的研究被引向象识别铸件和石头这些难度更大的作业,而在关于操作动作方面的研究,则被引向物体的装配工作上。

联系视觉传感器而工作的操作手,经常要求有小的调节动作。在第四章中,我们研究要进行这些动作的操作手与物体之间的微分关系。当要求在上述杂乱环境中工作时,只是让操作手能从一个位置移到另一个位置是不够的。因此发展了轨迹的概念。第五章中我们提出了用齐次变换来描述结构作业,然后研究关节和笛卡儿坐标这两种运动轨迹的基本形式的理论。引入轨迹的概念以后,用点伺服来控制操作手便显得不够。第六章研究了操作手动力学,它是第七章讨论控制的基础。操作手动力学是复杂的:主要问题是鉴定那些在操作手控制中很重要的项。我们采用拉格朗日力学以得到动力学方程,然后在第四章中研究的微分关系基础上,对导出的方程进行简化,以获得符号形式的主要方程。控制这一章采用了经典的方法以使读者对全面的问题有所领悟。任何特殊操作手的控制,始终是一个独特的问题,一般原则仅仅起指导作用。

虽然视觉对相对于操作手的位置来将零件定位很起作用,但对将零件放在一起却没有帮助。我们还需要力反馈。如上所述,在纯位置控制系统被推荐之后仅一年,力的反馈就已经被加在遥控操作器上了。在日本,Inoue演示了一种转动曲柄的操作手[Inoue]。它以恒扭矩驱动适当的操作手关节来完成工作要求,以代替通常关节轴的位置伺服控制。在斯坦福大学,Inoue的方

法被发展成为这样的系统，在这个系统中根据在笛卡儿坐标中指定顺应方向的指令，适当的操作手关节是通过计算机自动选择并采用力伺服控制（而不是位置伺服）。[Paul 72]。在第八章中，我们研究出不同坐标架中力和扭矩与操作手关节扭矩间的关系。在第九章中，用各关节与自由度相匹配的方法，集中讨论在装配中必需提供的顺应性[Shimano]。利用这一方法，在斯坦福大学研究了一种称为WAVE的语言。采用这种语言，可以在笛卡儿坐标中，把作业以及需要的力顺应和夹持指令一起用符号表达出来[Paul 77a]。在1972年，通过一台水泵的装配工作使这种方法得到论证[Bolles]。WAVE系统是重要的，因为这种系统首次把力、触觉、视觉和位置反馈在一起的相互关系，表达为一个用齐次变换来表示数据的结构作业模型。

当在实验室中取得这些进展的时候，工业机器人对精确运动控制的依赖增加了，同时，力图用提高操作速度的办法来改善位置控制机器人的经济性。为了扩大这些机器人的可能作业范围，必须对工具设计给予充分的注意。第一台计算机控制的工业机器人是由辛辛纳特·米拉克罗恩(Cincinnati Milacron)研制的[Hohn]。这台机器人与一台移动运输机联系在一起工作，运输机的位置用数字编码器读出。计算机用来进行固定坐标和运动坐标之间的坐标变换。

在第十章中，我们讨论操作手的编程语言。然而我们并不去发展一种专门的操作手语言。为了使有关操作手各个方面的编程能清楚明确，我们将操作手的控制纳入PASCAL语言。计算机和它的编程语言是工业机器人的基本部分，它们在少量通用传感器和通用驱动器之间，提供了逻辑的、数学的和变换的接口。

计算机控制的工业机器人代表了第一台真正的通用的自动装置。工业机器人可以很容易地编制程序去执行任何数量的工作，且将能减少对常规设计的昂贵自动设备的需求。它能使产品装配自动化，它的低费用可使小批量生产车间能实现自动化。这样的机器人，在未来将有重要社会效果，今天的单调、重复的装配线

工作将被排除。理想地完成这些装配工作，是用机器人来代替，而不是靠人们的直接工作。

参 考 文 献

- 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.