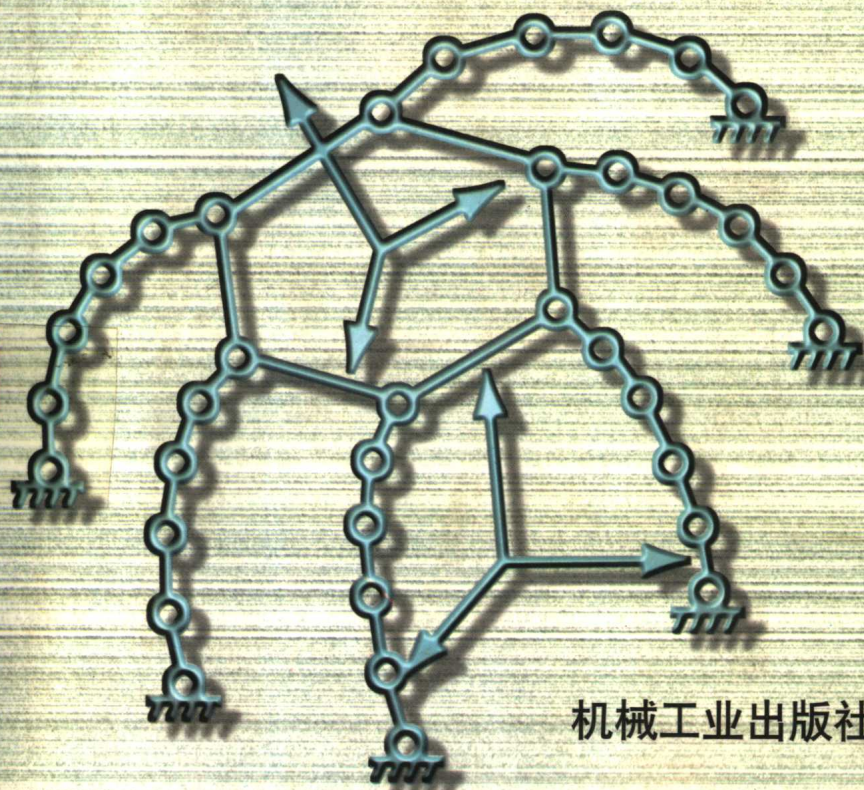




全国高技术重点图书
自动化技术领域

并联机器人机构学 理论及控制

黄真 孔令富 方跃法 著



机械工业出版社

机械工业出版社基金资助项目

并联机器人机构学 理论及控制

黄真 孔令富 方跃法 著



机械工业出版社

77.5

本书系统介绍了并联机器人机构学理论。第一部分重点介绍了有普遍意义的6自由度并联机器人机构学理论,包括机构的结构分析、位置分析、运动分析、动力分析、机构的运动性质等,并介绍了3自由度并联机构分析和其特殊的运动性质,并联机构的多关节多指手,多是步行机和多机器人协调的某些问题。本书的第二部分介绍了并联机器人控制基础。

本书可供高等院校有关专业教师及研究生使用及有关机械设计、机器人研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

并联机器人机构学理论及控制/黄真等著.-北京:机械工业出版社,1997.12

ISBN 7-111-05312-7

I. 并… II. 黄… III. 机器人, 并联式-机构学
IV. TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第13535号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)
责任编辑:沈红 版式设计:张世琴 责任校对:李汝庚
封面设计:姚毅 责任印制:卢子祥

北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1997年12月第1版第1次印刷

850mm×1168mm^{1/32}·13.125印张·344千字

0 001—1 500册

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

《并联机器人机构学理论及控制》

《全国高技术重点图书》

出版指导委员会名单

主任：朱丽兰

副主任：刘 泉 卢鸣谷

委 员：(以姓氏笔划为序)

王大中	王为珍	牛田佳	王守武	刘 仁
刘 泉	卢鸣谷	叶培大	朱丽兰	孙宝寅
师昌绪	任新民	杨牧之	杨嘉墀	陈芳允
陈能宽	罗见龙	周炳琨	欧阳莲	张钰珍
张效祥	赵忠贤	顾孝诚	谈德颜	龚 刚
梁祥丰				

总干事：罗见龙 梁祥丰

《全国高技术重点图书》

自动化技术领域编审委员会名单

主任委员：杨嘉墀

委 员：(以姓氏笔划为序)

卢桂章	吴 澄	林惟侯	李淑兰
高为炳	谈德颜	蒋新松	戴汝为

前 言

并联机器人是一类全新的机器人，它具有刚度大、承载能力强、误差小、精度高、自重负荷比小、动力性能好、控制容易等一系列优点，与目前广泛应用的串联式机器人在应用上构成互补关系，因而扩大了整个机器人的应用领域。并联机器人可以作为航天上的飞船对接器、航海上的潜艇救援对接器；工业上可以作为大件的装配机器人、精密操作的微动器。近年还研究将它用作虚拟 6 轴加工中心，以及毫米级的微型机器人等，可以预见这类机器人在 21 世纪将有广泛的发展前景。它的复杂的机构学问题属于空间多自由度多环并联机构学理论这一新分支，这项理论是随着并联机器人研究而发展起来的，因而有十分重要的意义。其重要性还表现在它不仅直接针对并联式机器人，对于随机器人高技术发展起来的多机器人协调、多足步行机、多指多关节高灵活手爪等构成的并联多环机构学问题，此理论也具有指导意义。

本书是集我们 10 余年来对并联机器人机构学研究的成果，其内容的第一部分（约占全书 3/4），首先重点介绍有普遍意义的 6 自由度并联机

机器人机构学理论，包括机构的结构分析、位置分析、运动动力分析、机构的运动性能等。接着介绍了各种 3 自由度并联机构和其特殊的性能分析和有关理论，最后介绍了多指手多足步行机和多机器人协调的并联结构学问题。本书的第二部分，介绍了并联机器人控制的基础研究和进展。书中还综合一部分近年国际上研究的新成果。

我们的并联机器人机构学理论研究得到了国家自然科学基金会的长期大力支持，没有基金会的支持，是不可能有些成果的。在此我们向国家自然科学基金会表示深深的谢意。同时本书还得到国家教委博士点基金和中科院机器人学开放研究实验室基金和机械工业出版社的支持，我们也一并表示深深的谢意。

本书的撰写由三人执笔完成。黄真教授负责全书统稿并执笔第 1 章和第 7~9 章，孔令富教授负责第 10~13 章，方跃法副教授负责第 2~6 章。

由于时间和水平的限制，本书可能存在不少缺点、错误和欠考虑之处，诚恳希望读者、朋友和各方面专家，不吝赐教，给以批评指正。

作者于秦皇岛燕山大学

1996 年 7 月

7152611



黄真 燕山大学教授、博士生导师。男、江苏宜兴人，1936年生，1959年毕业于哈尔滨工业大学。1982年访问美国佛罗里达大学，1996年再访美国哥伦比亚大学。多年来从事并联机器人机构学理论的研究，1991年研制了我国首台并联机器人样机，并获国家教委科技进步一等奖，入选“国家自然科学基金资助项目优秀成果”及863高新技术新探索项目10周年展览会的优秀成果展览资格。曾出版《空间机构学》，在国内外发表论文140余篇。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
第 2 章 空间并联机构的结构分析	12
1 连杆参数的 D-H 表示法	12
2 空间机构的组成元素	14
3 空间机构的自由度	18
4 公共约束和过约束机构	22
5 并联机器人机构的结构形式	29
第 3 章 并联机器人机构位置分析	36
1 位置反解	36
2 位置正解的数值方法	38
3 位置正解的封闭方法	46
4 6-SPS 并联机构的位置正解	56
第 4 章 运动影响系数及运动分析	65
1 运动影响系数的概念	65
2 串联开链机构的运动影响系数	72
3 并联机构的一阶影响系数及速度分析	79
4 并联机构的二阶影响系数及加速度分析	83
5 建立并联机构影响系数的其它方法	89
6 6-SPS 机构运动分析	99
7 具有冗余自由度的并联机构分析	105
8 具有螺旋副的机构的运动分析	111
第 5 章 并联机器人的动力分析	119
1 拉格朗日动力学模型	119
2 机构的动态受力分析	122
3 典型的 6-SPS 机构的受力分析	135

4	并联机器人的弹性动力模型	137
第6章	并联机器人机构性能分析	148
1	6-SPS机构的特殊形位	148
2	工作空间分析	164
3	误差分析和补偿	174
4	操作器的灵巧度分析	183
第7章	3自由度并联机构分析	187
1	平面3自由度并联机构分析	187
2	球面3自由度并联机构分析	193
3	空间平台机构的位置分析	207
4	空间平台机构的运动分析	213
5	并联机构输入输出力分析	222
第8章	少自由度机构的特殊运动性质	226
1	不完全自由的自由度	226
2	旋量在不同几何空间下的相关性	228
3	反螺旋和被约束的运动	241
4	约束作用下存在的特殊转动	245
5	3自由度并联平台机构的运动性质	256
6	3自由度并联角台机构的运动性质	262
7	串联机器人的转动自由度	268
第9章	多指手、多足机、多机器人协调	278
1	机构模型及运动学	279
2	多自由度并联机构的超确定输入	283
3	步行机轻动性与并联机构参数	292
4	多指多关节手的特殊形位	297
第10章	轨迹规划与控制	303
1	机器人控制系统的研究现状	303
2	并联机器人液压控制系统	306
3	并联机器人的控制策略	315
4	并联机器人控制系统的数学模型	317
5	并联机器人轨迹规划与生成	323
6	位置、速度控制算法程序框图	328

7	运动轨迹控制系统的设计	329
8	双自由度PID机器人电液速度控制系统	337
9	具有干扰补偿的机器人伺服系统	342
10	容错分布式计控系统	346
第11章 并联机器人自适应控制		351
1	只用对象输入输出值设计的MRACS	351
2	从参考模型取状态设计的MRACS	356
3	带干扰力补偿的液压并联机器人MRACS	360
4	并联机器人专家自适应PID控制系统	363
第12章 并联机器人控制信息的实时并行处理		368
1	并联机器人规划级运动控制算法的并行处理	368
2	双自由度PID控制算法实时并行处理	372
3	基于MCS-51单片机的MRAC实时并行处理	379
4	基于MCS-96单片机的MRAC实时并行处理	381
第13章 并联机器人力控制技术		385
1	机器人顺应控制与力控制技术	385
2	机器人力控制的实施方案	391
3	并联机器人位置/力混合控制系统	394
参考文献		398

第 1 章 绪 论

1 机器人的应用与发展

人类的历史就是不断认识世界和改造世界的历史，是生产力发展的历史。在生产力发展过程中，生产工具的发展起了重要的作用。从瓦特发明蒸汽机以后，开始了产业革命，由于蒸汽机把热能转变为巨大的机械能，从而代替了人力。从机械的角度看，蒸汽机是应用了一个滑块曲柄机构，将往复运动变为旋转运动，仅仅这一种变化的运动模式，就给生产力以巨大的推动。

很早以来，人类就幻想能有一种拟人的机械，能实现如人的手、脚一样的灵活自由的运动，能代替人从事各种非固定变化的复杂的劳动。早在 15 世纪霍美罗斯著的《伊利亚》一书中，就出现了“机器人”。后来 16 世纪的《黄金少女》、18 世纪的《青铜巨人塔罗斯》都描写了机器人。在中国，三国时期的诸葛亮就发明了“木牛流马”，已能行走爬山，用来运送粮草支援战争。这种能在崎岖山路上行走、能适应复杂环境的机械，决非常规的只能执行一种固定的运动模式的机械所能胜任的，而是今天所说的步行机器人。1920 年捷克作家查培克所著的《万能机器人》一书中一个强壮的机器人名叫 Robot，帮人干了许多体力劳动。现在 Robot 一词的英文含义就是“机器人”。

以上说的只是人类的幻想，但新生产力、新技术的产生和发展，归根结底还是基于客观生产发展的水平和需要。20 世纪中叶之后，生产力已高度发展，已有了高度自动化的机械设备。但由于市场的激烈竞争，只有产品多样化和不断更新换代，才能打开市场，占有市场，适应人们更高的现代需要。过去曾经创造出高生产率的刚性自动化系统，已不能适应社会的需求。只有创造出

这样一种柔性自动化系统，既能不断改变产品适应市场需要，又有自动化的高效生产能力。在这样的背景下，人类长期幻想的机器人就应运而生了。1945 年世界上出现了第一台电子计算机，1961 年美国 Unimation 公司推出第一台实用的工业机器人，由于它适应这种柔性自动化要求，因而得到了很快的发展。今天机器人已经广泛应用于工业生产上，如从事点焊、弧焊、喷漆、搬运、装配等工作，在汽车工业、电子工业、核工业等许多工业部门，在服务行业、医疗卫生方面也有应用，甚至在海底、太空等人类极限能力外的环境中作业。机器人的广泛应用，对人类社会的影响决不亚于蒸汽机出现对人类的影响，它极大提高了劳动生产率，提高了产品质量，降低了成本，还极大地减轻了人的劳动强度，改善了劳动条件，所以世界上先进国家都在努力发展机器人技术。

现今机器人正向第三代智能机器人方向发展，这将极大地拓展机器人的应用场合和提高产品质量。智能机器人具有视觉、听觉、嗅觉、触觉、力觉等感觉机能，而且还有逻辑思维、学习、判断和决策的功能，它可根据作业要求和环境信息随机应变，有选择地采取行动，灵活地处理问题，自主地完成所给任务。对机器人的研究构成了机器人学，机器人学是一门边缘学科，是多学科的交叉，又带动了多个学科的发展，主要包括力学、机械学、计算机学、电子学、控制论、信息学等。机器人机械学研究的主要对象主要是机器人的机械系统，以及机械与其它学科的交叉点，机器人机械系统主要包括机器人操作机本体，步行机器人的步足系统等具有多自由度的机器人机构。这是机器人的重要的和基本的组成部分，是机器人实现各种运动完成各种指定工作的主体。机器人本体就是机器人的执行机构、机器人的操作机 (manipulator)，它与机器人的控制系统、传感系统、视觉和智能构成一个紧密的整体，即使机器人的智能达到更高的程度，执行机构仍处于十分重要的地位。

传统的工业机器人，一般是由机座、腰部（或肩部）、大臂、小臂、腕部和手部构成。大臂小臂以串联方式联接，因而也称串

联机器人。这类机器人的型式很多，美国 Unimate 机器人是球坐标型式，还有直角坐标、圆柱坐标等型式，后来又出现全铰链的多关节型，这种多关节型机器人，在三维空间有很高的灵活性和广泛的通用性，典型的如 PUMA 机器人。1981 年日本牧野推出了平面关节型 SCARA 机器人，其手臂只做平面运动，只适应平面范围的工作，但是平面工作使它结构简单，有很高的刚度和精度，控制容易，响应快，成本低，特别适应电子行业中装配插件等工作，故得到迅速发展。另外，为进一步改进机器人操作机的性能，又出现了冗余度机器人，它有了更大的灵活性，提高了避障功能，也减少了发生奇异的可能。对机器人机构的研究还包括对其各个局部机构的研究，如机器人肩关节、肘关节、腕关节和手爪等，如 3 自由度的肩关节、并联机构的肘关节、具有能两维转动的球形齿轮的手腕关节、或 3 自由度的杆系手腕等。对手爪的研究就更多了，此外还有包括对步行机足系机构的研究等，所以机器人机构不论从整体看还是从局部看都在不断地发展。“发展到顶”的观点，“停止”的观点都是错误的。

2 并联机器人的提出、特点和应用

在串联机器人发展方兴未艾时，澳大利亚著名机构学教授 Hunt 在 1978 年提出，可以应用 6 自由度的 Stewart 平台机构作为机器人机构，到 80 年代中期，国际上研究并联机器人的人还寥寥无几，仅有 McDowell、Earl、Fichter、Yang、Lee、Duffy、Tesar 等数人，出的成果也不多。到 80 年代末特别是 90 年代以来，并联式机器人才被广为注意，并成为了新的热点，许多大型会议均设多个专题讨论，国际上的著名学者有 Warldron、Roth、Gosselin、Fenton、Merlet、Angeles、Sugimoto、Lee、Kumar 等。并联机构从结构上看，是用 6 根支杆将上下两平台联接而形成的，这 6 根支杆都可以独立地自由伸缩，它分别用球铰和虎克铰与上下平台联接，这样上平台与下平台就可进行 6 个独立运动，即有 6 个自由度，在三维空间可以作任意方向的移动和绕任何方向、位置

的轴线转动。这种机构在 1965 年由 Stewart 提出，原是作为飞行模拟器用于训练飞行员的。机舱由 6 个液压缸支撑和驱动，可以使机舱获得任何需要的位姿。燕山大学系统地开展了并联机器人机构学理论的研究，并于 1990 年研制出我国第一台并联机器人实验室样机，是计算机控制、液压伺服驱动，具有 6 个自由度，活动范围是 $\phi 1200\text{mm} \times 250\text{mm}$ 的蘑菇形空间，持重 1000N，外形尺寸高 1750mm，圆周直径 $\phi 500\text{mm}$ ，全部用国产器件制成。

并联机器人与已经用的很好、很广泛的串联机器人相比往往使人感到它并不适合作机器人，它没有那么大的活动空间，它的活动上平台远远不如串联机器人手部来得灵活。的确这种 6-TPS 结构的并联机构其工作空间只是一个厚度不大的蘑菇形空间，位于机构的上方，而表示灵活度的末端件 3 维转动的活动范围一般只在 60° 上下，角度最大也达不到 $\pm 90^\circ$ 。可是和世界上任何事物一样都是一分为二的，若用并联式的优点比串联式的缺点，也同样令人吃惊。首先，并联式结构其末端件上平台同时经由 6 根杆支承，与串联的悬臂梁相比，刚度大多了，而且结构稳定；第二，由于刚度大，并联式较串联式在相同的自重或体积下有高得多的承载能力；第三，串联式末端件上的误差是各个关节误差的积累和放大，因而误差大而精度低，并联式没有那样的积累和放大关系，误差小而精度高；第四，串联式机器人的驱动电动机及传动系统大都放在运动着的大小臂上，增加了系统的惯性，恶化了动力性能，而并联式则很容易将电动机置于机座上，减小了运动负荷；第五，在位置求解上，串联机构正解容易，但反解十分困难，而并联机构正解困难反解却非常容易。由于机器人的在线实时计算是要计算反解的，这就对串联式十分不利，而并联式却容易实现。

从以上分析看来，并联式与串联式确实形成了鲜明的对比。在优缺点上串联的优点恰是并联的缺点，而并联的优点又恰是串联的缺点；此外正反运动学求解的难易上也有明显的对比关系。有学者将这些情况抽象到更高程度，称为是串联并联的“对偶”关

系 (Serial-Parallel Duality), 并以此对偶观来进一步研究串、并联机构^[101]。

由于串联、并联在结构上和性能特点上的对偶关系, 串联、并联之间在应用上不是替代作用而是互补关系, 且并联机器人有它的特殊应用领域。因此可以说并联机构的出现, 扩大了机器人的应用范围。

在工业上, 并联机器人可以在汽车总装线上安装车轮, 将并联机器人横向安装于能绕垂直轴线回转的转台上, 它从侧面抓住从传送链送来的车轮, 转过来以与总装线同步的速度将车轮装到车体上, 再将所有螺栓一次拧紧。并联机器人还可以倒装在具有 XY 两方向受控的天车上, 用作大件装配, 可以用在汽车总装线上吊装汽车发动机。

并联机器人也用作飞船对接器的对接机构, 飞船的对接可以达到补给物品、人员交流等目的, 要求上下平台中间都有通孔, 以作为结合后的通道, 这样上平台就成为对接机构的对接环, 它由 6 个直线式驱动器驱动, 其上的导向片可帮助两飞船的对正; 对接器还有吸收能量和减振的作用; 对接机构可完成主动抓取、对正拉紧、柔性结合、最后锁住卡紧等工作。航海上也有类似的应用, 如潜艇救援中也用并联机构作为两者的对接器。

对于困难的地下工程, 如土方挖掘、煤矿开采, 也可应用这种强力的并联机构, Arai 等 1991 年提出将并联机构装于履带式或步行式可移动的小车上, 挖头装于并联机构的上平台上, 强有力的并联机构能承受巨大的挖掘力。

并联机器人在工业上还有一个特别突出的重要应用, 就是作为 6 自由度数控加工中心, 传统数控机床各自由度是串接相连, 悬臂结构, 且层迭嵌套, 至使传动链长, 传动系统复杂, 积累误差大而精度低, 成本昂贵。至今多数机床只是 4 轴联动, 极少 5 轴。而并联式加工中心结构特别简单, 传动链极短, 刚度大、质量轻, 切削效率高, 成本低, 特别是很容易实现“6 轴联动”, 因而能加工更复杂的三维曲面。1994 年美国芝加哥 IMTS' 94 博览会上

GIDDINGS & LEWIS 公司就推出了新开发的并联式 VARIAX “虚拟轴机床”，引起广泛关注，被称为“本世纪机床首次革命性改型”和“21 世纪的机床”，这在国内外正成为广泛关注的一个热点。图 1-1 为美国 Ingersoll 机床公司制造的 6 轴联动加工中心在工作。

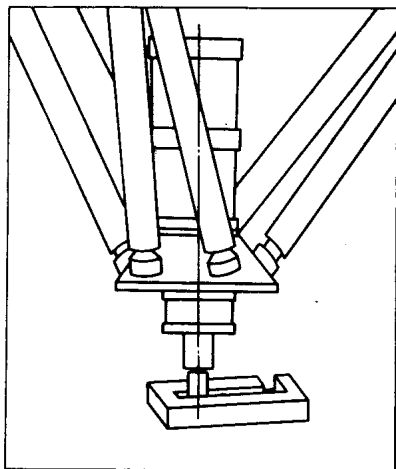


图 1-1 美国 Ingersoll 机床公司制造的 6 轴联动加工中心在工作

并联机器人的另一个重要的应用方面，是作为微动机构或微型机构。三维空间微小移动的 $2\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$ 之间，并有小的工作空间，这种微动机构发挥了并联机构的特点，工作空间不大但精度和分辨率都非常高。并联式微动机构的一个应用例子是用在眼科手术中^[43]，为治疗视网膜静脉闭塞，要将抗凝剂直接注射到视网膜脉管血凝处，要用纤细的玻璃管从皮下注射针孔中间穿过，伸到视网膜脉管处，这就可以应用并联机构进行操作。另一种在生物工程上的应用是微细外科手术中的细胞操作，图 1-2 是一种微动双指并联机构^[116]，它将两并联机构再串联起来，两指头分别连于第二和第三平台，分别控制两手指的运动，进行微细操作，每个指头都有 6 个自由度，十分灵活，并联机构的 6 个可伸长的作微运动的杆件是由压电元件驱动的。在 150V 下伸长 $8\mu\text{m}$ ，工作空间宽约 $130\mu\text{m}$ ，高为 $18\mu\text{m}$ ，另一种方案还可以将两指头分别安装于两个并联机构上，两并联机构间又再进行并联组合。

作为微动机构的另一个例子是燕山大学 1994 年研制的机器人误差补偿器（图 6-23），其并联机构是 6-RST 型，机构外形尺

寸为 $\phi 160\text{mm} \times 100\text{mm}$ ，为了达到机构的小型化和提高机构的精度，T 和 S 关节均以柔性铰链代替传统的有间隙的铰链。这个机构放在串联机器人的手腕处，用以补偿串联机器人手臂所发生的误差而提高机器人的精度。由于此机构具有 6 个自由度，在三维空间内任何方向的位移误差和姿态误差均可补偿。该机构三维空间的分辨率已达到 0.01mm ，补偿空间为 $\pm 0.2\text{mm}$ 、 $\pm 0.2^\circ$ 。因此在理论上能将机器人的绝对精度提高到 0.01mm 级。并联机器人误差补偿器，是并联机构典型的应用之一，它完全避免了并联机构自身的缺点，又充分发挥了自身的优点。作为误差补偿器，不要求工作空间很大，也不要求灵活性很大，而特别要求误差小精度高，这正是并联机构的特点，放在串联机器人的手腕处，其自身体积要小，而它又要承受机器人传来的全部负荷，这些要求是苛刻的，但正好发挥了并联机构刚度大、负载大、体积小精度高的特点。作为误差补偿器放在手腕处，从串联机器人的结构设计看要求控制手腕和手爪运动的全部传动系统都能够从并联机构中心通过，对这点并联机构的结构又是允许的，所以说这是非常典型的应用。

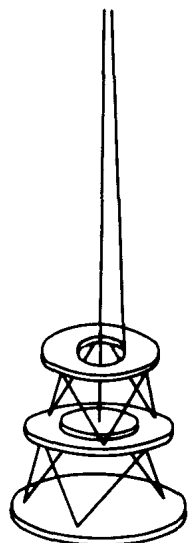


图 1-2 微动双指机构

为改善并联机构性能的研究还有很多，如 Tsai1993 提出应用 3-TPS 机构，以 3 个分支代替一般的 6 个分支，可以减少杆件的干涉，扩大工作空间，减少了承力杆的数目，并应用 3 个平面二维步进电动机。Arai1991 年提出将上下平台间的 6 根支杆分为两组，分布在不同的两个同心圆上，这样也减少了干涉，扩大了空间。Long (1992 年) 提出在结构上采取由 4 个杆件组成的仅含转动副的双二杆组，代替每个分支的移动副，用在双三角平台机构上，这方案较多地增加了沿 Z 轴的位移量，扩大了工作空间的体