

基于计算机图形学的机器人 臂部构型分析及工作空间仿真研究

刘成良,张 凯,付 庄,曹其新,殷跃红
(上海交通大学 机器人研究所,上海 200030)

摘 要:从图形学的角度对机器人臂部结构进行分析,提出了臂部结构的 72 种排列组合型式,并以工作空间为目标逐一进行分析,得出有 21 种构型可实现空间任意位姿要求。利用 CAD 方法对 21 构型的工作空间进行三维图形仿真,把工作空间分为球体、球面形、圆柱体形、圆柱筒形、圆柱面形、圆环筒形、长方体形和马蹄形,经比较得出工程应用中可供选择的 15 种构型,从而修正并发展了 Milenkovic^[1]和 Kesheng^[2]的 12 种构型的理论。

关键词:机器人;工作空间;计算机图形学

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1001 - 4551(2002)03 - 0044 - 05

Study on Arm Structure of Robot and Workspace Simulation Based on Computer Graphics

LIU Cheng-liang , ZHANG Kai , FU Zhuang , CAO Qi-xin , YIN Yue-hong

(Research Institute of Robotics , Shanghai Jiaotong University , Shanghai 200030)

Abstract : This article presents 72 kinds of structures of robot arm based on computer graphics . 21 kinds of structures that can meet the need of arbitrary position and orientation have been gotten. Among of them , 15 kinds are useful. The workspace has been divided into globe body , sphere , cylinder , tube , cylinder plane , annulus , rectangular and U - shape. The theory of 12 kinds of structures developed by Milenkovic and Kesheng is modified and developed. This theory has been used for IVECO automobile cross beam multi - robot welding workstation system.

Key words : robot ; work space ; computer graphics

1 机器人臂部结构

机器人的设计必须考虑工作空间、运动速度和加速度的要求、移动能力、执行件、交互系统、驱动系统、定标、和经济效益等多因素。作为一种空间机构,机器人首先要满足运动要求,根据末端执行器工作点运动范围、运动姿态来确定机器人的自由度数,

选择机器人的结构类型,确定满足要求的杆件尺寸、关节运动范围求其体积指标。

为达到空间任意位置要求,臂部要有 3 个自由度,转动关节 R 和移动关节 L 组成 8 类邻接型式: RRR、RRL、RLR、RLL;LRR、LLR、LRL、LLL。根据相邻关节轴线可以平行(暂不考虑共线)、垂直相交(不

收稿日期:2001 - 10 - 12

作者简介:刘成良(1964 -),男,上海交通大学机器人研究所教授,博士研究生,主要从事机器人控制、CAD、机电控制理论等方面的研究。

参考文献

[1] 王廷树. 机器人运动学及动力学[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1990.

[2] 闫国荣,高学山,穆 勇. 一种基于基本坐标变换的运动学方程建立方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2001,33

(1):120 - 123.

[3] 王建华,愈孟蕪,李 众. 智能控制基础[M]. 北京:科学出版社,1998.

[4] Jenhwa Guo, Vladimir Cherkassky. A Solution to the Inverse Kinematic Problem In Robotics Using Neural Network Processing[A]. Neural Networks,89, IJCNN, International Joint Conference on[C], 1989,2:299 - 304.

考虑其它相交型式及偏置情况)、交叉垂直,每一类 R,L 邻接型式又有 9 种关节配置方式,因此 3 个自由度的臂部理论上以下有 72 个构型。其中: 为垂直相交, × 为交叉垂直, // 为轴线平行。

(1) RRR

$R_1 R_2 R_3 R_1 R_2 \times R_3 R_1 \times R_2 R_3 R_1 \times R_2 \times R_3$

$L_1 \times R_2 \times R_3$

$R_1 R_2 // R_3 R_1 \times R_2 // R_3$

$R_1 // R_2 R_3 R_1 // R_2 \times R_3 R_1 // R_2 // R_3$

(2) RRL

$R_1 R_2 L_3 R_1 R_2 \times L_3 R_1 \times R_2 L_3 R_1 \times R_2 \times L_3$

$L_1 \times R_2 \times L_3$

$R_1 R_2 // L_3 R_1 \times R_2 // L_3$

$R_1 // R_2 L_3 R_1 // R_2 \times L_3 R_1 // R_2 // L_3$

(3) RLR

$R_1 L_2 R_3 R_1 L_2 \times R_3 R_1 \times L_2 R_3 R_1 \times L_2 \times R_3$

$L_1 \times L_2 \times R_3$

$R_1 L_2 // R_3 R_1 \times L_2 // R_3$

$R_1 // L_2 R_3 R_1 // L_2 \times R_3 R_1 // L_2 // R_3$

(4) RLL

$R_1 L_2 L_3 R_1 L_2 \times L_3 R_1 \times L_2 L_3 R_1 \times L_2 \times L_3$

$L_1 \times L_2 \times L_3$

$R_1 L_2 // L_3 R_1 \times L_2 // L_3$

$R_1 // L_2 L_3 R_1 // L_2 \times L_3 R_1 // L_2 // L_3$

(5) LRR

$L_1 R_2 R_3 L_1 R_2 \times R_3 L_1 \times R_2 R_3$

$L_1 R_2 // R_3 L_1 \times R_2 // R_3$

$L_1 // R_2 R_3 L_1 // R_2 \times R_3 L_1 // R_2 // R_3$

(6) LRL

$L_1 R_2 L_3 L_1 R_2 \times L_3 L_1 \times R_2 L_3$

$L_1 R_2 // L_3 L_1 \times R_2 // L_3$

$L_1 // R_2 L_3 L_1 // R_2 \times L_3 L_1 // R_2 // L_3$

(7) LLR

$L_1 L_2 R_3 L_1 L_2 \times R_3 L_1 \times L_2 R_3$

$L_1 L_2 // R_3 L_1 \times L_2 // R_3$

$L_1 // L_2 R_3 L_1 // L_2 \times R_3 L_1 // L_2 // R_3$

(8) LLL

$L_1 L_2 L_3 L_1 L_2 \times L_3 L_1 \times L_2 L_3$

$L_1 L_2 // L_3 L_1 \times L_2 // L_3$

$L_1 // L_2 L_3 L_1 // L_2 \times L_3 L_1 // L_2 // L_3$

臂部结构的平面图,如图 1 所示。其排列顺序同上。

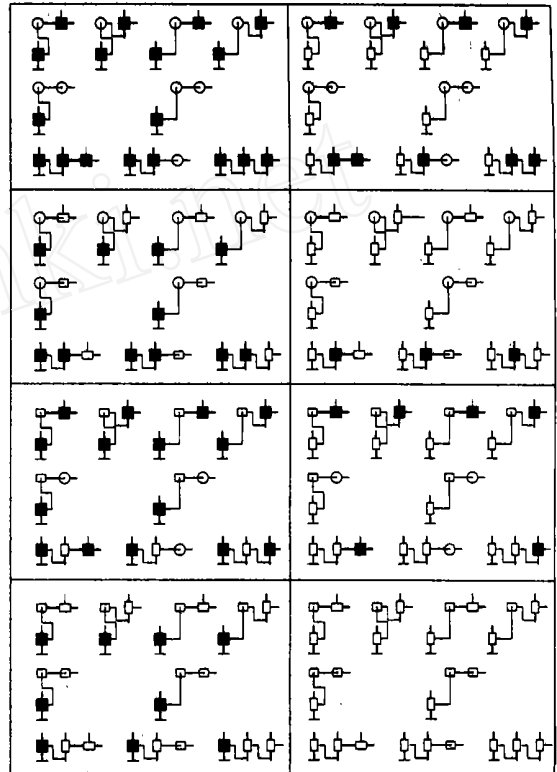


图 1 臂部结构示意图

2 臂部结构分析

根据图 1 所示,现对每一构型进行分析。

2.1 单自由度机构

第八种邻接型式的: $L_1 // L_2 // L_3$ 。

2.2 双自由度的机构

第四种邻接型式: $R_1 L_2 // L_3, R_1 \times L_2 // L_3, R_1 // L_2 // L_3$;

第七种邻接型式: $L_1 // L_2 R_3, L_1 // L_2 \times R_3, L_1 // L_2 // R_3$;

第八种邻接型式: $L_1 L_2 // L_3, L_1 \times L_2 // L_3, L_1 // L_2 L_3, L_1 // L_2 \times L_3$;

因此,72 个构型中有 1 个单自由度机构;10 个双自由度机构;剩下 61 个构型。

2.3 平面机构

第一种邻接型式: $R_1 // R_2 // R_3$;

第二种邻接型式: $R_1 // R_2 L_3, R_1 // R_2 \times L_3$;

第三种邻接型式: $R_1 L_2 \times R_3, R_1 \times L_2 \times R_3$;

第四种邻接型式: $R_1 L_2 L_3, R_1 \times L_2 L_3$;

第五种邻接型式: $L_1 R_2 // R_3, L_1 \times R_2 // R_3$;

第六种邻接型式: $L_1 R_2 L_3, L_1 R_2 \times L_3, L_1 \times R_2 L_3, L_1 \times R_2 \times L_3$;

第七种邻接型式: $L_1 L_2 R_3, L_1 \times L_2 R_3$;

第八种邻接型式: $L_1 L_2 \times L_3, L_1 \times L_2 \times L_3$; 共 17 个为平面机构。

须指出 SCARA、IBM 7535 机器人就属于 $R_1 // R_2 // R_3$, 是平面多关节型机器人, 不列于此讨论范围之内。

因此, 61 个构型中删除 17 个不能实现三维空间点位置要求的构型, 剩余 44 个构型。

2.4 第二、三关节相交及交叉构型分析

以第一种邻接型式为例: $R_1 R_2 R_3$ 与 $R_1 R_2 \times R_3$ 工作空间形状相同, 同样尺寸下扫描掠过的空间前者大于后者, 但后者在结构上将比前者复杂, 实际应用中常常选前者; $R_1 \times R_2 R_3$ 与 $R_1 \times R_2 \times R_3$ 以及 $R_1 // R_2 R_3, R_1 // R_2 \times R_3$ 情况也一样。

因此, 8 种邻接型式中类似情况共 24 种, 其中第二种邻接型式中的 $R_1 // R_2 \times L_3$; 第三种邻接型式中的 $R_1 L_2 \times R_3, R_1 \times L_2 \times R_3$; 第六种邻接型式中的 $L_1 R_2 \times L_3, L_1 \times R_2 \times L_3$; 第七种邻接型式中的 $L_1 L_2 R_3, L_1 \times L_2 R_3$, 这七种构型已做为平面机构删除; 第七种邻接型式中的 $L_1 // L_2 \times R_3$; 第八种邻接型式中的 $L_1 // L_2 \times L_3$ 为 2 自由度机构也去掉, 因此共 15 种。

还由于第四种邻接型式中的 $R_1 L_2 L_3, R_1 \times L_2 L_3$ 及第七种邻接型式中的 $L_1 L_2 R_3, L_1 \times L_2 R_3$ 的第二、三关节相交构型为平面机构, 所以, 不能去掉, 只能保留交叉构型, 这样又成为 11 种。

因此, 44 个构型中再去掉 11 个还余下 33 个构型。

2.5 第一、二关节相交及交叉构型分析

早期的机器人第二关节与第一关节轴线是相交的, 如 PUMA、Cincinnati、Stanford、Motoman、RVL12-III 等, 但近年来交叉构型应用颇多, 如德国 Reis 机器人公司生产的 RV12L-IV 焊接与切割机器人。在活动空间上, 交叉型比相交型范围更大。现把交叉型看作相交型的变形, 视为同一种类, 33 个构型中有 12 对, 这样还剩 21 种。另外把 $d_n = 0$ (相邻连杆各中心线, 即各连杆长度方向交叉时之间距离) 和 $d_n = 0$ 的情况也视为同一种类, 如 PUMA600。

3 工作空间的实现及分类

为便于对 21 种构型分析及归类, 这里对每一构型的工作空间用三维形体进行描述。三维形体空间的获得, 首先要通过运动学正解, 得出空间方程解。然后利用 ADS (AutoCAD Development System) 编程^[16], ADS 使外部可执行文件与 AutoCAD 核心紧密联系在一起, 从而在 AutoCAD 上实现三维形体。所获得的构型工作空间可作如下分类:

球体、球面形: $R_1 R_2 R_3, R_1 R_2 // R_3, R_1 R_2 L_3, R_1 R_2 // L_3$ 。

圆柱体形: $R_1 // L_2 L_3$ 。

圆柱筒形: $R_1 L_2 R_3, R_1 // L_2 R_3, R_1 // L_2 // R_3, R_1 // R_2 // L_3, R_1 L_2 \times L_3, L_1 // R_2 R_3, L_1 // R_2 // R_3, L_1 // R_2 L_3$ 。

圆柱面形: $L_1 // R_2 // L_3$ 。

圆环筒形: $R_1 // R_2 R_3, R_1 L_2 // R_3$ 。

长方体形: $L_1 L_2 L_3$ 。

马蹄形: $L_1 R_2 // L_3, L_1 L_2 \times R_3, L_1 L_2 // R_3, L_1 R_2 R_3$ 。

上述构型理论上的形状, 如图 2 ~ 22 所示。实际上的形状还要随具体尺寸变化有所变动。



图 2 $R_1 R_2 R_3$

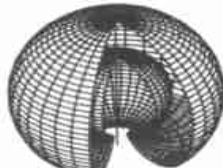


图 3 $R_1 R_2 // R_3$



图 4 $R_1 R_2 L_3$



图 5 $R_1 R_2 // L_3$



图 6 $R_1 // L_2 L_3$



图 7 $R_1 L_2 R_3$

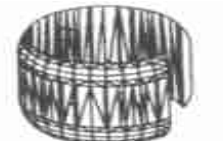


图 8 $R_1 // L_2 R_3$

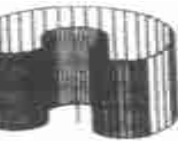


图 9 $R_1 // L_2 // R_3$

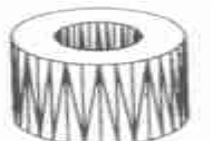


图 10 $R_1 // R_2 // L_3$

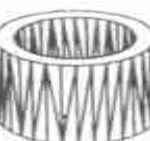


图 11 $R_1 L_2 \times L_3$



图 12 $L_1//R_2 R_3$



图 13 $L_1//R_2//R_3$

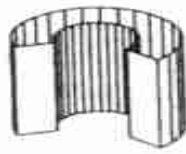


图 14 $L_1//R_2 L_3$

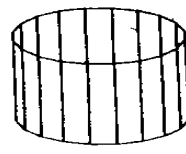


图 15 $L_1//R_2//L_3$



图 16 $R_1//R_2 R_3$



图 17 $R_1 L_2//R_3$

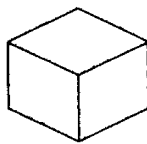


图 18 $L_1 L_2 L_3$



图 19 $L_1 L_2 R_3$

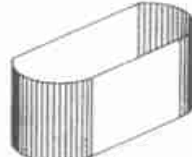


图 20 $L_1 L_2 \times R_3$

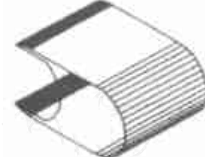


图 21 $L_1 L_2//R_3$



图 22 $L_1 R_2 R_3$

由图 2~22 可以看出:

(1) $R_1 R_2 R_3$ (图 2) 构型和 $R_1 R_2//L_3$ (图 5) 构型工作空间类似,后者是前者“削顶”后的结果,选用图 11 构型,如 General Numeric model GN0 6 自由度机器人。

$R_1 R_2//R_3$ (图 3)。此构型是工业机器人中最常见,也是使用最广泛的结构型式,如:Cincinnati Milacron T³,CYROTM820,ASEA IRb - 6/ IRb-60 等。

$R_1 R_2 L_3$ (图 4)。PRAB 4200/5800、Unimate model 1000/2100C/4000B、MakerI 等均用此结构型式。

(2) $R_1//L_2 L_3$ (图 6) 应用举例。PRAB ROBOTS INC. PRAB FA/FB/FC、Seiko Model 200、FUNAC M,ASEA MHU 等。

$R_1 L_2 R_3$ (图 7)、 $R_1//L_2 R_3$ (图 8)、 $R_1//L_2//R_3$ (图 9) 是常用的柱坐标结构。

$R_1//R_2//L_3$ (图 10)、 $L_1//R_2 R_3$ (图 12)、 $L_1//R_2 L_3$ (图 14) 及 $L_1//R_2//L_3$ (图 15) 在工业机器人中很少采用。

$R_1 L_2 \times L_3$ (图 11)。FANAC ROBOT A、FANAC ROBOT M、MotionMate Robot、Copperweld Robotic (AP - 50/10)。

$L_1//R_2//R_3$ (图 13) 应用举例。GMFanac Robot Model : S-1、Reis Model :RR 625。

此两种构型不包括在 Milenkovic^[1]和 Kesheng^[2]所认定的 12 种构型中,本文认为是可选构型。

(3) $R_1//R_2 R_3$ (图 16)、 $R_1 L_2//R_3$ (图 17) 也是可选构型。

(4) $L_1 L_2 L_3$ (图 18) 是标准的 Cartesian 坐标机器人构型,如:Westinghouse Series : 6000、Anorad Corp. (Anoscan)、Advanced Robotics corp. Model : Cyro 750 & 2000 等。

(5) $L_1 R_2//L_3$ (图 19)、 $L_1 L_2 R_3$ (图 20)。不包括在 Milenkovic^[1]和 Kesheng^[2]所认定的 12 种之内,实际上如 Gantry robot 已使用了 $L_1 L_2 R_3$ 构型。

$L_1 L_2//R_3$ (图 21)、 $L_1 R_2 R_3$ (图 22) 被认为是可选构型。

因此,这里对 Milenkovic^[1]和 Kesheng^[2]的结论进行修正,去掉 21 种构型中的 $R_1 R_2//L_3$ (图 5)、 $R_1//R_2//L_3$ (图 10)、 $L_1//R_2 R_3$ (图 12)、 $L_1//R_2 L_3$ (图 14)、 $L_1//R_2//L_3$ (图 15) 及 $L_1 R_2//L_3$ (图 19) 共六个构型,可供选择的构型则为 15 种。这 15 种可供选择的构型分别为:

$R_1 R_2 R_3$ (图 2)、 $R_1 R_2//R_3$ (图 3)、 $R_1 R_2 L_3$ (图 4)、 $R_1//L_2 L_3$ (图 6)、 $R_1 L_2 R_3$ (图 7)、 $R_1//L_2 R_3$ (图 8)、 $R_1//L_2//R_3$ (图 9)、 $R_1 L_2 \times L_3$ (图 11)、 $L_1//R_2//R_3$ (图 13)、 $R_1//R_2 R_3$ (图 16)、 $R_1 L_2//R_3$ (图 17)、 $L_1 L_2 L_3$ (图 18)、 $L_1 L_2 R_3$ (图 20)、 $L_1 L_2//R_3$ (图 21)、 $L_1 R_2 R_3$ (图 22)。

Milenkovic^[1]和 Kesheng^[2]所认定的 12 种构型不包括图 11、图 12 和图 20 所示的构型。

4 应用实例

给出有 2 个机器人组成的 IVECO 汽车横梁焊接工作站系统,利用上述机器人臂部结构工作空间的分析处理方法,确定工作站系统中各部件在工作空间中的位置及协调关系,如图 23 所示。

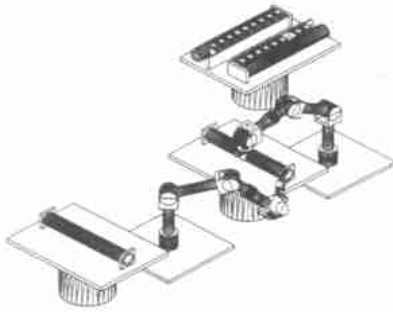


图 23 IVECO 汽车横梁焊接工作站三维图形仿真

参考文献

- [1] Milenkovic V, Huang B. Kinematics of major robot linkage [J]. 13th International Symposium on industrial Robots and Robotics 7, 1983, 2:31 - 46.
- [2] Kesheng W, Terje K, Lien. The Structure Design and Kinematics of a Robot Manipulator-I. Theory [J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 1989, 5(2,3) : 153 - 158.
- [3] Lee C G S. Fundamentals of Robotics[M]. Addison Wesley, New York, 1983.
- [4] Bekric D, Sarenac M. Analysis of trajectories in the technologic scheme of a robotized working place [J]. Robotics & Computer - Integrated Manufacturing, 1989, 5(2,3) : 255 - 259.
- [5] Takano M. Development of computer simulation system of kinematics and dynamics of robot. J. Fac Eng. Univ. of Tokyo(B), 1982, 36:677 - 711.
- [6] Kesheng W, Lien T K. Closed form solution for the inverse kinematics of a puma robot manipulator II[J]. demonstration, Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 5(2/3) : 159 - 163.
- [7] Haug E J, Luh C M, Adkins F A and Wang J Y. Numerical algorithms for mapping boundaries of manipulator workspaces [J], Trans. ASME J. Mech. Des, 1996, 118(1) : 228 - 234.
- [8] Wang S L, Wu J K. Dextrous Workspaces of Manipulators, II: Computational methods[J]. Mech. Struct. Mach., 1993, 21(4) : 471 - 506.
- [9] 彭商贤, 赵 臣, 张启先. 试论国内外机器人机械学的发展趋向[J]. 机器人, 1991, 13(3).
- [10] 蒋新松. 未来机器人技术发展方向探讨[J]. 机器人, 1996, 18(5).
- [11] 张启先. 空间机构的分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [12] 张继禹, 蔡鹤皋, 等. 智能机器人机构 CAD 及仿真系统—IRSS[J]. 机器人, 1992, 14(6).
- [13] 孙增圻. PUMA 机器人动态仿真[J]. 机器人, 1987, 9(5).
- [14] 黄宇中, 张宗明, 何奇伟. 机器人灵活工作空间的边界分析[J]. 机器人, 1991, 13(2).
- [15] 刘成良, 等. RV12L 6R 焊接机器人运动学正解及计算机仿真系统研究[J]. 东南大学学报, 1998, (3).
- [16] 毕诸明, 吴瑞珉, 蔡鹤皋. 工业机器人的工作空间综合[J]. 机器人, 1994, 16(3).
- [17] 崔 鯤, 孙论强, 吴 林. V01 弧焊机器人运动学反解及臂形标志的确定[J]. 机器人, 1997, 19(6).
- [18] 潘存云, 高理基. 通用的工业机器人运动仿真系统 IRKSS. 机器人, 1992, 14(2).

高原型全自动燃气锅炉通过鉴定

由青海新天乐机械制造股份有限公司同西安交通大学联合研制生产的高原型高效环保整体冷凝式全自动燃气锅炉, 日前通过青海省经贸委和青海省质监局组织的省内外锅炉专家鉴定, 鉴定认为, 该新型锅炉属国内首创, 其主要技术性能达到国内领先水平。

该产品在结构与燃烧机选配上充分考虑到高原特点, 不仅环保性能达到了国颁标准, 锅炉热效率达到了 92.53% 接近国际水准, 而且具有自动化程度高, 可遥控操作、噪音低、耗能低、寿命长等特点。

据悉, 这种新型燃气锅炉已获准批量生产。