

用体素贴合法构造机器人的三维几何模型*

潘存云 高理基

(精密机械与仪器系)

摘要 本文介绍了在计算机上采用体素贴合法构造三维几何模型的若干技术问题,包括描述三维形体的数据结构、基本几何形体的生成、部件模型的拼装等内容。研究表明,贴合法本身具有一定的代表性和通用性,对于构造其它几何模型也是适用的。

关键词 机器人,几何造型,数据结构

分类号 TP242.3

图形仿真技术的实质就是利用计算机生成的动态图形来模拟真实物体运动。利用图形仿真技术来研究机器人的作业运动过程是当前机器人研究领域的热点之一,其中的三维几何造型又是图形仿真技术的基础。几何造型即在计算机内建立真实三维形体的几何数据模型。在设计造型系统时,不仅要考虑应用场合及目的,还要考虑到计算机硬件的承受能力和软件的通用性等问题。

机器人运动仿真的目的是研究其作业运动轨迹的正确性与合理性,而不是研究机器人的本体结构设计。因此,我们设计的三维造型系统采用了逼近模型的形式,即用凸多面体逼近曲面体的方法构造机器人与作业环境的几何模型。这样,在具体造型时,有必要对机器人的具体结构作相应的简化处理,以反映机器人的运动特征为主,撇开那些与运动无关的具体结构细节。同时还要求所得几何模型在外观上尽可能与真实机器人接近。经简化后,机器人的各主要部件如底座、腰部、手臂、手腕和手爪便可用一至数个规则几何形体来表示。这样一来,机器人三维几何造型的实质归结为如何在计算机内部生成规则几何形体(以下称单元体)以及如何操纵它们,使之按一定方式和顺序进行组合的问题。

1 简单几何形体的生成

由于计算机只能识别和处理按一定规则组织和存贮的具体数据信息,因此,如何把三维形体以计算机能理解的形式进行定义、输入、运算,以便形成能适用于各种处理的数据形式是三维几何造型的基础。三维几何形体在计算机中的表示方法是通过其数据结

* 国家“863”高技术发展基金资助项目
** 1990年12月17日收稿

构来描述的。本文采用的单元体为凸多面体，其数据结构如图 1 所示。

机器人与其作业环境几何模型的数据结构则如图 2 所示。

为了减少编程的工作量，采用一通式来计算单元体顶点的坐标。对于底面为正 n 边多边形的棱柱体，共有 $2n$ 个顶点，各顶点坐标按下式计算：

$$x_i = R_b \cdot \cos(\theta_i); y_i = R_b \cdot \sin(\theta_i); Z_i = 0, x_{n+i} = R_u \cdot \cos(\theta_i); y_{n+i} = R_u \cdot \sin(\theta_i); Z_{n+i} = H, i=1, 2, \dots, n$$

式中， R_u 、 R_b 下分别为上下底面多边形外接圆半径， H 为形体高度， θ_i 为第 1 至第 i 个顶点间圆弧所对应的圆心角。

只要将以上参数设定一些限制条件，就能获得如下形体。

- 实点： $R_u = R_b = H = 0$;
- 实线： i) $R_u = R_b = 0, H > 0, n \geq 2$;
- ii) $R_u = R_b > 0, H = 0, n = 2$;
- iii) $R_u > 0, R_b > 0, H > 0, n = 1$;

矩形平面： $R_u = R_b > 0, H > 0, n = 2$ ；梯形面： $R_u \neq R_b > 0, H > 0, n = 2$ ；圆平面： $R_u = R_b > 0, H = 0, n$ 越大越好；长方体： $R_u = R_b > 0, H > 0, n = 4$ ；棱柱体： $R_u = R_b > 0, H > 0, n \geq 3$ ；棱台体： $R_u \neq R_b, H > 0, n \geq 3$ ；棱锥体： $R_u = 0, R_b > 0$ 或 $R_b = 0, R_u > 0, H > 0, n \geq 3$ 。

2 部件模型的拼装

由上一节可知，只要确定一些几何参数，如 R_u 、 R_b 、 n 、 H 等，就可由系统自动生成对应的几何形体。有了基本几何形体，就可用它们拼装成各种部件模型。部件是由若干个单元体组合而成的刚体，各个单元体之间的相对位置是固定不变的。每个部件都带有自己的坐标架，部件模型的几何信息即是各个顶点在该坐标架中的坐标值。因为每一个单元体都是在相同的坐标架下生成的，该坐标架的原点位于单元体下底面的几何形心处。所以，在拼装部件模型时，必须将单元体转换到部件坐标架中去。生成部件模型时，可分两步进行：首先，应将机器人的真实的部件简化分解成若干个规则单元体，依次调用单元体的生成过程，将这些单元体一一构造出来；其次，调整各个单元体在部件坐标架中的位置和姿态，建立相邻单元体之间的位置关系，并将它们移到指定位置，从而拼装成一个完整的部件模型。

在部件模型拼装过程中，本文采用了“体素贴合”法，即两相邻单元体之间既没有

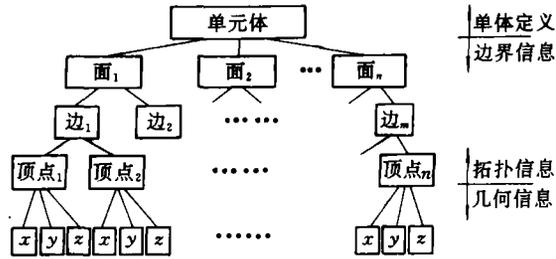


图 1 单元体的数据结构

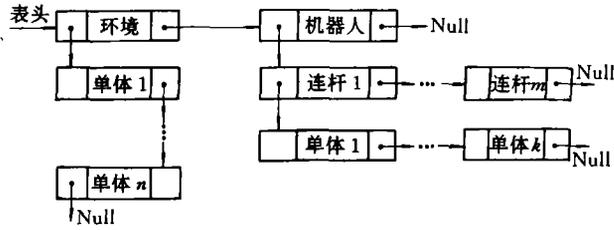


图 2 机器人及其作业环境几何模型的数据结构

嵌入，又没有分离 而是两者的接合面重迭在一起。贴合拼装是在两个单元体之间进行的，其中一个单元体作为拼装基准体，另一个单元体为待拼装体、拼装过程由程序自动进行，拼装完成之后，基准体的几何信息不会发生改变，而待拼装体的位置和姿态都要发生变化。根据两个单元体之间可能出现的相对位置关系以及为了简化自动拼装过程的程序设计，我们把这种相互位置关系用拼装状态加以描述，经过归纳整理、造型系统一共定义了 14 种拼装状态，其中的 12 种与坐标轴的选择有关。每一根坐标轴包含了如下四种拼装状态，它们是：顶与底，底与顶，同顶和同底。其中的顶和底是这样定义的：单元体中沿坐标轴方向具有最大坐标值的顶点，定义为沿该坐标轴的顶；而具有最小坐标值的顶点则定义为相应的底。对于规则几何形体而言，顶和底的物理含义实质上是指定了贴合平面。另外两种拼装状态是同心和任意面。同心状态是指两单元体的几何形心重合，任意面状态是指贴合基准面的位置和姿态是任意的。

3 几种典型拼装状态的实现原理与步骤

本节介绍三种典型拼装状态的实现原理与步骤：

3.1 沿 Z 轴方向的顶与底状态

- 1) 找出基准体上具有最大坐标值 $Z_{\max}^{(1)}$ 的顶点（即基准体沿 Z 轴方向的顶）。
- 2) 找出待拼装体上具有最小坐标值 $Z_{\min}^{(2)}$ 的顶点（即待拼装体沿 Z 轴方向的底）。
- 3) 对待拼装体进行平移变换，沿 Z 轴方向移动距离为 $(Z_{\max}^{(1)} - Z_{\min}^{(2)})$ 。

这样，基准体上包含 $Z_{\max}^{(1)}$ 的平面与待拼装体上包含 $Z_{\min}^{(2)}$ 的平面便重迭在一起。其它十一种与坐标轴有关的拼装状态的实现步骤与此类似，故不赘述。

3.2 同心状态

- 1) 求出基准单元体的几何形心坐标 $(X_c^{(1)}, Y_c^{(1)}, Z_c^{(1)})$ ：

$$X_c^{(1)} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N X_i^{(1)}, \quad Y_c^{(1)} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N Y_i^{(1)}, \quad Z_c^{(1)} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N Z_i^{(1)}$$

- 2) 求出待拼装体的几何形心坐标 $(X_c^{(2)}, Y_c^{(2)}, Z_c^{(2)})$ ：

$$X_c^{(2)} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n x_i^{(2)}, \quad Y_c^{(2)} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n y_i^{(2)}, \quad Z_c^{(2)} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n z_i^{(2)}$$

- 3) 对待拼装体进行如下的平移变换：

i) 沿 X 轴移动距离为 $(X_c^{(1)} - X_c^{(2)})$ ；ii) 沿 Y 轴移动距离为 $(Y_c^{(1)} - Y_c^{(2)})$ ；iii) 沿 Z 轴移动距离为 $(Z_c^{(1)} - Z_c^{(2)})$ 。

3.3 任意面状态

- 1) 搜索基准体面表记录，使面表指针指向贴合基准面。
- 2) 计算基准面的形心坐标 $(X_p^{(1)}, Y_p^{(1)}, Z_p^{(1)})$ ：

$$X_p^{(1)} = \frac{1}{2k} \sum_{i=1}^k x_i^{(1)}, \quad Y_p^{(1)} = \frac{1}{2k} \sum_{i=1}^k y_i^{(1)}, \quad Z_p^{(1)} = \frac{1}{2k} \sum_{i=1}^k z_i^{(1)}$$

式中， k 为基准面多边形的顶点数。

- 3) 求出基准面的法向量 $\vec{N}_p^{(1)}$ ，使 $\vec{N}_p^{(1)} = \vec{V}_i^{(1)} \vec{V}_{i+1}^{(1)} \times \vec{V}_{i+1}^{(1)} \vec{V}_{i+2}^{(1)}$ 。
- 4) 搜索待拼装体的面表记录，使面表指针指向贴合面。

5) 求出贴合面的法向量 $\vec{N}_p^{(2)}$, 使 $\vec{N}_p^{(2)} = \overrightarrow{V_i^{(2)}V_{i+1}^{(2)}} \times \overrightarrow{V_{i+1}^{(2)}V_{i+2}^{(2)}}$

6) 求出法向量 $\vec{N}_p^{(1)}$ 、 $\vec{N}_p^{(2)}$ 之间的夹角 φ :

$$\varphi = \cos^{-1} \cdot \left[\frac{\vec{N}_p^{(1)} \cdot \vec{N}_p^{(2)}}{|\vec{N}_p^{(1)}| \cdot |\vec{N}_p^{(2)}|} \right]$$

7) 作一辅助平面使之包含 $\vec{N}_p^{(1)}$ 、 $\vec{N}_p^{(2)}$, 该辅助平面的法矢量 \vec{N}_p 为:

$$\vec{N}_p = \vec{N}_p^{(1)} \times \vec{N}_p^{(2)}$$

8) 以辅助平面的法矢量 \vec{N}_p 为旋转轴, 将拼装体绕该轴旋转 φ 角。

9) 求出贴合面的形心坐标 $(X_p^{(2)}, Y_p^{(2)}, Z_p^{(2)})$:

$$X_p^{(2)} = \frac{1}{2J} \sum_{i=1}^J x_i^{(2)}, \quad Y_p^{(2)} = \frac{1}{2J} \sum_{i=1}^J y_i^{(2)}, \quad Z_p^{(2)} = \frac{1}{2J} \sum_{i=1}^J z_i^{(2)}$$

式中, J 为贴合面多边形的顶点个数。

10) 对待拼装体实施如下平移变换:

i) 沿 X 轴平移距离为 $(X_p^{(1)} - X_p^{(2)})$; ii) 沿 Y 轴平移距离为 $(Y_p^{(1)} - Y_p^{(2)})$; iii) 沿 Z 轴平移距离为 $(Z_p^{(1)} - Z_p^{(2)})$ 。

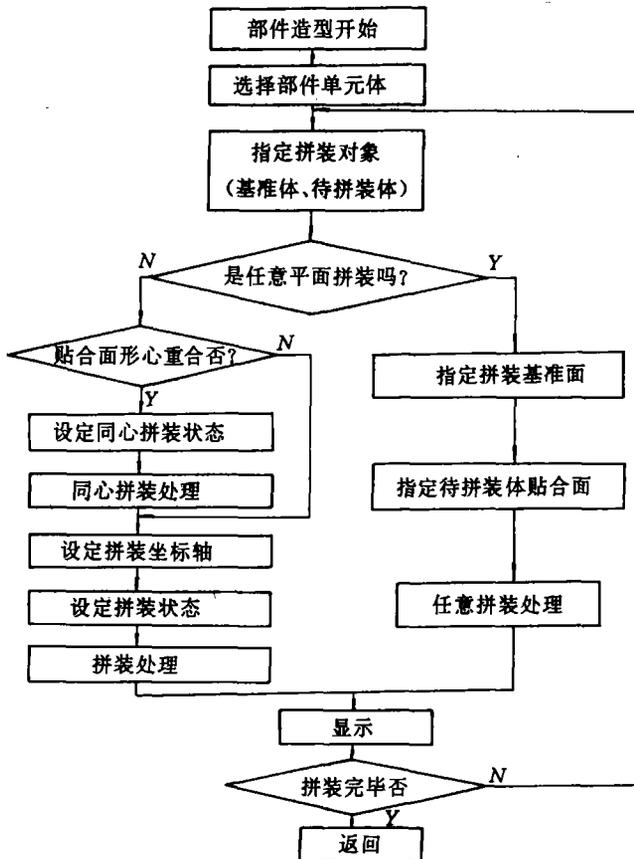


图3 部件拼装造型流程框图

4 部件拼装流程与实例

用本文设计的三维造型系统构造机器人部件模型的流程如图 3 所示。图 4 为用体素贴合技术构造的部件模型。完整的机器人与作业环境模型如图 5 所示。

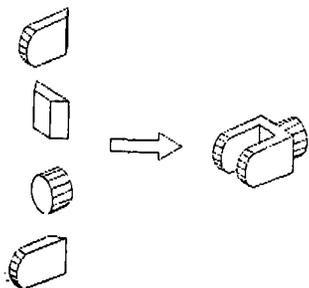


图 4 部件模型

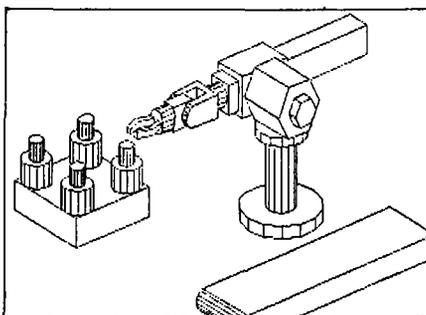


图 5 机器人与作业环境几何模型

参 考 文 献

- 1 孙家广等. 计算机图形学. 清华大学出版社, 1987
- 2 潘存云. 通用的工业机器人仿真系统研究. 国防科技大学硕士论文, 1991

Using Gluing Assembly to Constructe 3-D Geometric Model of Robots

Pan Cunyun Gao Liji

(Department of Precision Machinery and Instrument)

Abstract

A software package of industrial robot kinematic simulation system (called IRKSS) has been implemented by authors. This paper introduces some problems about constructing the geometric model of robots and its tasking environment on microcomputer by using gluing assembly. It includes the data structure of geometric model, generation of elementary geometric bodies and assembling link model of robots.

Key words robot, geometric modelling, data structure