

基于机器人层次树结构几何模型的消隐算法[†]

赵东波 熊有伦 熊蔡华 卢江舟

(华中理工大学机械学院 武汉 430074)

(中国科学院机器人学开放研究实验室 沈阳 110015)

摘要 本文讨论了机器人层次树结构几何模型,其高层为机器人树,低层为连杆树,连杆上节点为基本体.根据这一模型,机器人图形显示中隐藏线和面的消隐可在3个层次上分别依次进行:基本体——→连杆——→机器人.单个基本体的消隐通过确定其各面的优先级来实现,连杆的消隐通过确定组成连杆的各基本体之间的显示优先级来实现,机器人消隐只需对连杆排序.此算法降低了计算量,提高了效率,已用于机器人图形仿真上.

关键词 机器人图形仿真,消隐,层次树结构

1 引言

机器人离线编程及图形仿真是当今机器人学中十分活跃的研究方向.评价机器人图形仿真优劣的主要指标为:

- ① 机器人及环境物三维图形显示的正确性.
- ② 机器人及环境物三维图形显示的时间性.

若一个机器人仿真系统能正确、快速地显示机器人及环境物三维图形,则它是优的.影响这两个指标的主要因素有:

- ① 机器人及环境物几何模型的复杂性和作业任务的复杂性.
- ② 几何模型隐藏线和面消除算法的正确性及效率.
- ③ 所采用的硬件设备.

为提高仿真效率,可对机器人及环境物几何模型、机器人作业任务作适当简化,并采用高性能硬件设备,本文着重对②进行讨论.

隐藏面消除历来是个引人注目的问题.根据不同坐标系,消隐算法可分为:物空间法,如 Roberts 算法;象空间法,如 Warnock 算法. Newell-Sancha 算法同时在物空间和象空间中实现.在我们开发的机器人离线编程及仿真系统 HOLPSS 中,根据机器人及环境物的物理相关性,定义了机器人及环境物的层次树结构几何模型,提出了相应的消隐算法,算法是对文献[3]中方法的进一步发展,适应性更广且更简便,算法同时在物和象空间实现但又不同于 Newell-Sancha 方法.

2 机器人层次树结构几何模型

机器人外形较复杂,当构造机器人几何模型时,可把机器人看成是由一系列由运动副联接的部件(连杆)组成的.每一连杆根据其几何形状可简化分割成若干形状规则的几何体,称之为基本体.基本体的固定联接构成具有运动属性的连杆.连杆的基本体组成可表示为一树状结

[†] 本文受国家自然科学基金资助.1994-8-10 收稿

构,称为连杆树,如图1所示.连杆树中只包含固定连接关系,用图符“——”表示.基准 B_0 或为一基本体,或为一连杆全局参考坐标系. $B_{1i}(i=1, \dots, Q)$ 与 $B_{2j}(j=1, \dots, R)$ 为基本体. B_{11} 的基准为 B_0 , B_{21} 的基准为 B_{11} ,即树上任一父节点是其所有子节点的基准.任何基本体(B_0 除外)有且只有一个基准,但可有多个子节点.同样机器人的连杆组成用树结构表示更具有一般性,称为机器人树,如图2所示.机器人树包含了运动联接,用图符“——○”表示.基准 L_0 为机器人

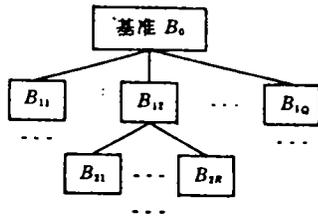


图1 连杆树

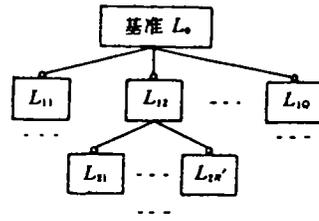


图2 机器人树

全局参考坐标系, $L_{1i}(i=1, \dots, Q')$, $L_{2j}(j=1, \dots, R')$ 为连杆.每一连杆对应着图1所示的一连杆树结构. L_0 为根节点,树上任一父节点是其所有子节点的基准,任何连杆可有多个子节点,但只能有一个父节点.

由此可见,机器人几何模型可用两个层次的树结构表示:低层为连杆树,高层为机器人树,称为机器人层次树结构几何模型.基本体是简接组成这一模型的最小单元.当实现了单个基本体的隐藏面消除和多个基本体的隐藏体消除,就能正确实现机器人消隐.

3 基本体隐藏面消除

3.1 不可见面和潜在可见面

所谓潜在可见面是指那些若被其他表面遮挡时不可见或部分可见,不被遮挡时完全可见的表面.设基本体任一表面外法向与视点坐标系中视线方向夹角为 θ ,则

$$-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2} \quad \text{表面为不可见面}$$

$$\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{3}{2}\pi \quad \text{表面为潜在可见面}$$

$$\theta = \pm \frac{\pi}{2} \quad \text{表面积聚为一条直线}$$

单个基本体的消隐仅需考虑潜在可见面之间的优先级.优先级高的面遮蔽优先级低的面.

3.2 潜在可见面的优先级判别

HOLPSS 系统中,基本体的生成方法有两种:扫描延拓和局部操作.由此生成的基本体的潜在可见面可用4个顶点围成的区域来表示.如图3所示,同一基本体上两潜在可见面 M, N , M 上各顶点在视点坐标系中的坐标为 (X_{mi}, Y_{mi}, Z_{mi}) ,在象空间的坐标为 (X'_{mi}, Y'_{mi}) , N 面上各顶点在视点坐标系中的坐标为 (X_{ni}, Y_{ni}, Z_{ni}) ,在象空间坐标为 (X'_{ni}, Y'_{ni}) , $i=1, \dots, 4$.设

$$X_{\max} = \max_{i=1, \dots, 4} \{X_{mi}\} \quad X_{\min} = \min_{i=1, \dots, 4} \{X_{mi}\}$$

$$Y_{\max} = \max_{i=1, \dots, 4} \{Y_{mi}\} \quad Y_{\min} = \min_{i=1, \dots, 4} \{Y_{mi}\}$$

$$Z_{\max} = \max_{i=1, \dots, 4} \{Z_{mi}\} \quad Z_{\min} = \min_{i=1, \dots, 4} \{Z_{mi}\}$$

$$\begin{aligned} X_{\max} &= \max_{i=1, \dots, 4} \{X_{ni}\} & X_{\min} &= \min_{i=1, \dots, 4} \{X_{ni}\} \\ Y_{\max} &= \max_{i=1, \dots, 4} \{Y_{ni}\} & Y_{\min} &= \min_{i=1, \dots, 4} \{Y_{ni}\} \\ Z_{\max} &= \max_{i=1, \dots, 4} \{Z_{ni}\} & Z_{\min} &= \min_{i=1, \dots, 4} \{Z_{ni}\} \end{aligned}$$

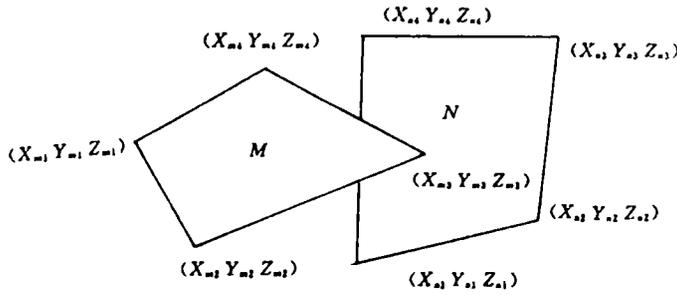


图 3 面优先级判别

面 M 与 N 的相对优先级判别如下：

- ①若 $X_{mi} = X_{ni}$ 且 $Y_{mi} = Y_{ni}$ 且 $Z_{mi} = Z_{ni}$, $i = 1, \dots, 4$ 则 M 与 N 重合, 优先级相同, 流程中止; 否则②;
- ②若 $X_{\max} < X_{\min}$ 或 $X_{\min} > X_{\max}$ 或 $Y_{\max} < Y_{\min}$ 或 $Y_{\min} > Y_{\max}$, 则优先级相同, 流程中止; 否则③;
- ③若 $Z_{\max} < Z_{\min}$, 则 M 优先级高于 N , 流程中止; 否则, 若 $Z_{\min} > Z_{\max}$, 则 M 优先级低于 N , 流程中止; 否则④;
- ④判别点 (X'_{mi}, Y'_{mi}) 是否在由点 (X'_{ni}, Y'_{ni}) ($i = 1, \dots, 4$) 所围成区域内. 若在区域内, 则求 N 面上一点 (X_{ni}, Y_{ni}, Z_n) , 若 $Z_n > Z_{ni}$, M 优先级高于 N , 否则 M 优先级低于 N , 流程中止; 若不在区域中, 取 M 上下一点, 重复④. 当用完 M 面上所有点仍未能作出优先级判别, 互换 M 和 N , 重复④, 若此时仍不能作出优先级判别, 说明 M, N 具有相同优先级.

3.3 基本体消隐算法

基本体消隐按如下步骤进行：

- ①确定基本体潜在可见面.
- ②按各潜在可见面的 X_{\max} 值从小到大对各面进行排列, 并对这一序列进行分段. 设有面 h, j, m, n ($1 < h < j < m < n$), 若 $X_{\max h} \leq X_{\min j}$ 且 $X_{\max m} \leq X_{\min n}$, 则 $j \leq i \leq m$ 内所有各面组成一段. 按上述条件可对段进行细分, 直到不能再分为止. 不同段内的面无须进行相对优先级判别.
- ③确定各段内各面相对优先级.
- ④按优先级依次显示并填充各面.

4 隐藏体消除

首先假设不存在任一基本体 E 被另一基本体 F 遮蔽的同时又遮蔽 F . 若存在这种情况, 可将 E 或 F 或两者同时分割成若干形状更加简单的基本体.

4.1 最大外接凸包及最大外轮廓线

基本体上各顶点为 (X_i, Y_i, Z_i) , $i = 1, \dots, Q$. 其最大外接凸包由这样的一些面围成：

$$\begin{aligned} X_{\max} &= \max_{i=1, \dots, Q} \{X_i\} & X_{\min} &= \min_{i=1, \dots, Q} \{X_i\} \end{aligned}$$

$$Y_{\max} = \max_{i=1, \dots, Q} \{Y_i\} \quad Y_{\min} = \min_{i=1, \dots, Q} \{Y_i\}$$

$$Z_{\max} = \max_{i=1, \dots, Q} \{Z_i\} \quad Z_{\min} = \min_{i=1, \dots, Q} \{Z_i\}$$

最大外轮廓线是由基本体前向面和后向面的公共棱边组成的,一般地在三维空间是个不共面的空间多边形。

4.2 两基本体相对优先级的确定

4.2.1 最大外接凸包法

找出两基本体 E, F 的最大外接凸包 B_{OXE}, B_{OXF} 。若 B_{OXE}, B_{OXF} 在 X 或 Y 方向分离,则 E, F 有同一优先级;否则把 B_{OXE}, B_{OXF} 在 Z 方向分离时,若 B_{OXE} 离视点近,则 E 优先级高;反之 E 优先级低。这种方法只适用于优先级的粗略判别,在许多情况下会失效。

4.2.2 最大外轮廓线法

两基本体 E, F 的最大外轮廓线在显示屏幕上围成的区域 S_E, S_F 如果不存在公共部分,则 E, F 具有同一优先级;若存在公共部分, E, F 必存在遮蔽关系^[3]。 S_E, S_F 存在公共部分的充分

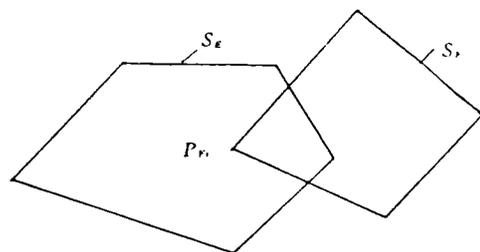


图4 最大外轮廓线

必要条件是最大外轮廓线在显示屏幕上的投影存在交点,或一基本体最大外轮廓线在显示屏幕上的投影至少有一顶点落在另一基本体最大外轮廓线在显示屏幕上的投影区域内。如图4所示, S_F 上有 Q 个顶点落在 S_E 区域之内, P_{Fi} (X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi}) 是其中一点,在视点坐标系中 E 上有 R 个点 (X_{pj}, Y_{pj}, Z_{Ej}) ($1 \leq j \leq R$) 与 P_{Fi} 点相对应, $R \geq 2$ 。设

$$Z_{\max E} = \max_{j=1, \dots, R} \{Z_{Ej}\} \quad Z_{\min E} = \min_{j=1, \dots, R} \{Z_{Ej}\}$$

若

$Z_{pi} > Z_{\max E}$ 则 E 优先级高于 F ;

$Z_{pi} < Z_{\min E}$ 则 E 优先级低于 F ;

否则 E, F 相互干涉。

于是两基本体相对优先级可由如下过程确定:先试用最大外接凸包法确定 E, F 的相对优先级,若最大外接凸包法不能对 E, F 的优先级作出判别就采用最大外轮廓线法,若仍不能作出判别,说明 E, F 相互干涉,需对之进一步分割。

4.3 连杆的消隐

① 确定连杆上各基本体最大外接凸包。

② 按各体最大外接凸包的 X_{\max} 值从小到大排列基本体,对这一序列进行分段,段与段之内的基本体不进行优先级比较,分段准则是一段内所有基本体的 X_{\max} 的最大值小于另一段内所有基本体的 X_{\min} 的最小值。

③ 使用两基本体相对优先级判别方法确定各段内所有基本体优先级次序。

④ 按优先级次序显示基本体。

4.4 基于机器人树的消隐

① 相互交叉连杆的判别。机器人树的节点为连杆,当连杆的形状较复杂,连杆上基本体较多时,连杆间可能会存在相互交叉现象,即一连杆在遮挡另一连杆时又被这一连杆遮挡。设

L_1, L_2 为机器人树上两节点, 依次取出 L_1 中的单个基本体和 L_2 中所有基本体作比较, 若 L_1 中存在一基本体遮挡 L_2 时又被 L_2 遮挡, 则 L_1, L_2 交叉, 反之亦然.

② 若机器人树上不存在交叉的连杆(当每个连杆只有一个基本体时必然为这种情况), 则在①的判别过程中就同时确定了连杆间的优先级. 即只要 L_1 中任一基本体优先级高于 L_2 中某一基本体时, L_1 优先级高于 L_2 , 反之 L_1 低于 L_2 , 最后若 L_1 中所有体与 L_2 中所有体无优先级关系时, L_1, L_2 优先级相同. 按优先级显示各连杆即可实现消隐.

③ 若存在相互交叉连杆. 设有 3 连杆 L_1, L_2, L_3 , L_1 中有基本体 B_{11}, B_{12}, B_{13} , L_1 与 L_2 交叉, L_3 与 L_1 和 L_2 都不交叉. 此时需从 L_1 中分离出优先级高于 L_2 的基本体 B_{11}, B_{12} , 若 L_2 优先级高于 L_3 , 则需判别 B_{13} 与 L_3 的相对优先级, 反之, 需判别 B_{11}, B_{12} 与 L_3 的相对优先级. 按优先级次序显示 (B_{11}, B_{12}), B_{13}, L_2, L_3 即可实现隐藏体消除.

5 算法效率分析

设一机器人由 Q 个体组成, 每个体都有 R 个潜在可见表面. 采用一般的面优先级方法, 单体消隐需对所有 R 个面进行测试, 体间的消隐需将一体上 $1 \sim R$ 个面和另一体上 R 个面进行测试, 总测试次数为 $\frac{1}{2}(Q^2R^2 - QR)$. 本文中讨论的方法, 简化了单体消隐算法, 体间的消隐最终可转化为体和体的最大外接凸包和最大轮廓线法来判定, 无需对每个潜在可见面进行测试, 减少了计算量, 算法执行效率显著提高.

机器人层次树结构几何模型对机器人形状作了很大的简化, 机器人也力求在分级的层次上(基本体级、连杆级、机器人级)实现消隐, 使得机器人图形仿真效率更高.

6 结论

机器人可表示为层次树结构几何模型: 机器人的连杆组成是一树结构; 连杆的基本体组成也是一树结构; 高层为机器人树, 低层为连杆树. 这一模型特别适合于对机器人交互式建模及布置的情况, 包含了运动学属性, 且有一般性. 机器人消隐由此可在 3 个层次上分别进行: 基本体 \rightarrow 连杆 \rightarrow 机器人, 且算法对基本体和连杆的消隐作了极大简化, 使得它具有很高的效率, 并具有一般性. 在 HOLPSS 系统中实现了上述消隐算法. 如图 5, 同一机器人在不同视点时的图形显示表明: 算法正确有效.

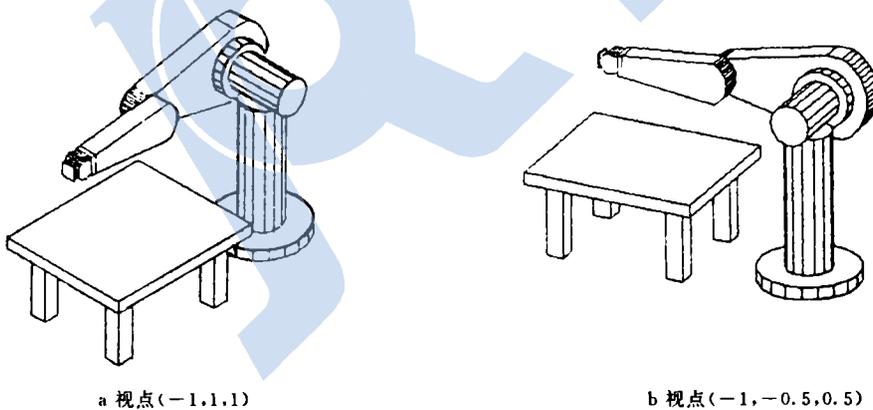


图 5 PUMA 机器人图形显示

参 考 文 献

- 1 Newman W M, Sproull R F. Principles of Interactive Computer Graphics (Second edition). McGraw Hill Book Company, New York, USA, 1979.
- 2 王吉连, 熊有伦. 体表优先级消隐算法及其实现. 微型计算机, 1994, 14(2): 20—23.
- 3 李大生. 机械结构及其运动学的建模和仿真. 博士学位论文, 华中理工大学, 1992.

HIDDEN REMOVAL ALGORITHM FOR HIERACHICAL TREE STRUCTURE OF GEOMETRY MODEL OF ROBOT

ZHAO Dongbo XIONG Youlun XIONG Caihua LU Jiangzhou

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(Robotics Laboratory, the Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015)

Abstract This paper is concerned with the hierachical tree structure of geometry model of robot, on which the high level is robot tree and the lower level is link tree whose node represents the primitive body. The hidden lines and faces elimination for robot graphic processing can then be performed on three different levels orderly: primitive body \rightarrow link \rightarrow robot. Hidden removal for single primitive body is implemented by determining the priority of all faces of it; the min/max box and max-bounding contour of each primitive are used to judge the priority between multi-primitive (link); and only links are sorted for hidden removal of robot. The time for hidden removal computation is thus reduced greatly. The above algorithms have been used in the robot graphic simulation.

Key words Robot graphic simulation, hidden removal, hierachical tree structure

作者简介:

赵东波: 男, 27岁, 博士生. 研究领域: 机器人离线编程, 计算机辅助几何设计及图形学.

熊有伦: 男, 56岁, 博士生导师. 研究领域: 机器人学, 精密测量, 数控技术.

熊春华: 男, 30岁, 博士生. 研究领域: 机器人多指手的抓取规划, 神经网络的应用技术.