

文章编号: 1002-0446(1999)06-0426-05

# Stewart 平台机构仿真研究中的实体模型

黄福林 肖大准

(大连理工大学机械工程系 大连 116024)

摘要: 本文根据构造的实体几何造型的思想建立了 Stewart 平台机构的实体模型, 并采用画家算法, 结合 Stewart 平台机构的结构特点, 提出了针对该机构的消隐算法. 另外, 作为一种并联机器人机构, Stewart 平台机构在运动过程中也较容易出现干涉现象, 本文对干涉情况也作了讨论. 上述这些算法用于 Stewart 平台机构运动学仿真软件的开发实践中, 取得了较好的效果.

关键词: Stewart 平台机构; 实体模型; 消隐; 干涉

中图分类号: TP24 文献标识码: A

## 1 引言

Stewart 平台机构是最著名的一种并联机器人机构, 它最初是由 Stewart 于 1965 年作为飞行模拟装置提出来的. 由于这种机构具有刚性大、承载能力强、定位精度高等优点, 近三十年来一直得到了国内外不少学者的关注. 但多年来, 学者们对 Stewart 平台机构的研究都只停留在理论分析上. 直到 1994 年, 随着美国、俄罗斯等国家首次将这种机构用于机床原型样机的设计上, 才标志着这种机构已进入了实际的工程应用阶段. 因此对这种机构的仿真研究具有较为现实的意义. 在我们开发的 Stewart 平台机构运动学仿真软件里, 为了对 Stewart 平台机构进行直观的、真实的表达, 建立了 Stewart 平台机构的实体模型, 并对之进行了真实感的消隐. 同时, 为了对 Stewart 平台机构运动过程中可能出现的干涉情况作出判断, 本文还对干涉情况进行了讨论, 并且直接运用于仿真软件的开发中, 使得仿真软件的模拟效果更接近于实际情况.

## 2 实体模型的建立

图 1 为我们建立的 Stewart 平台机构的实体模型. 为了建立该实体模型, 我们采用了构造的实体几何造型(CSG)的思想, 从最简单的组成元素定义, 然后经过一定的布尔运算, 最终形成完整的实体模型. 从图 1 可以看出, 一个具体的 Stewart 平台机构由上下两个平台及数条支撑腿所组成. 支撑腿本身通常由液压缸与活塞杆所组成, 且它们与上下平台之间通过球铰或虎克铰相连. 其上下平台可看成是凸多面体, 它由多边形所组成. 支撑腿与平台的铰接我们简化为用球来表示, 而组成支撑腿的活塞杆与液压缸可简化为圆柱体来表示.

这些结构体可分别用 C 语言定义如下:

(1) 平面多边形

```
typedef struct Polygon
{
    int VertexNumber; //多边形顶点数
```

```

TPoint * vertex; //多边形的顶点表
BOOL FaceViewOrNot; //多边形的隐藏性标志
};

```

## (2) 平台

```

typedef struct Platform
{
    TPoint * UpVertex; //上表面顶点表
    TPoint * DownVertex; //下表面顶点表
    Polygon * plate; //多边形表(面表)
};

```

## (3) 圆柱体

```

typedef struct Cylinder
{
    TPoint UpO; //上表面圆心点坐标
    TPoint DownO; //下表面圆心点坐标
    float r; //半径
    float h; //高度
};

```

## (4) 铰链

```

typedef struct Circle
{
    TPoint o; //圆心点
    float r; //半径
};

```

## (5) 支撑腿

```

typedef struct Leg
{
    Cylinder HydricPistonrod; //活塞杆
    Cylinder HydricCylinder; //液压缸
    Circle UpBall; //支撑腿与上平台的
铰链
    Circle DownBall; //支撑腿与下平台
的铰链
};

```

定义好了这些结构体后,那么组成 Stewart 平台机构实体模型的构件就准备好了.在不影响实际表达的前提下,为了简化运算,我们只要把它们经过简单的与运算,就可形成如图 1 所示的完整的实体模型了.

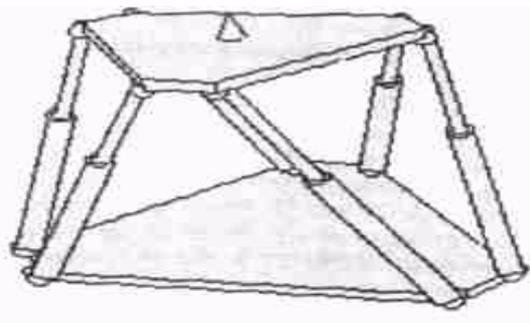


图 1 Stewart 平台机构实体模型图

## 2 真实感的消隐

在消隐上, 主要分为两个步骤, 即各个构件的消隐及 Stewart 机构整体的消隐.

### (1) 构件的消隐

构件的消隐主要是平台多面体的消隐. 对于任意一个凸多面体, 我们总可以在其体内找到一点  $P_0$  (比如重心), 然后过这个点作各个面的垂线, 令垂足到该点的方向为内法向量, 然后再过视点引各个面的视线, 如果视线与该面的内法向量的夹角大于  $90^\circ$ , 则该面不可见; 如果小于  $90^\circ$ , 则该面可见; 等于  $90^\circ$ , 则该面投影退化为一 条直线. 在图 2 中, 1 面的内法向量  $P_1P_0$  与视线方向  $VP_1$  之间的夹角小于  $90^\circ$ , 故该面可见, 而 3 面的内法向量  $P_3P_0$  与视线方向  $VP_3$  的夹角大于  $90^\circ$ , 故该面不可见. 因此, 只要用上述定义的平台多面体的结

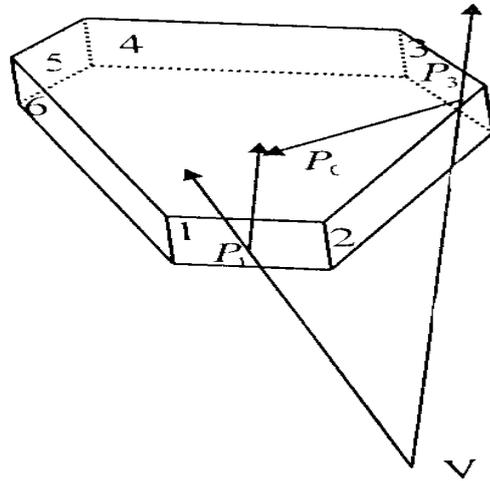


图 2 平台多面体的消隐示意

构体 Platform 来定义上下平台, 并对其面表 plate 里的每一个面按照上述的方法进行判断, 那么就可以根据判断的结果对其隐藏性标记 FaceViewOrNot 置真或置假了. 因此对一个平台, 只要对其面表进行一次搜索就可以找出所有可见面. 绘出所有可见面就可以得到消隐后的具有真实感的多面体了.

对于支撑腿, 我们采用上述的结构体 Leg 来定义. 组成它的成员活塞杆 HydricPistonrod 和液压缸 HydricCylinder 都是用结构体 Cylinder 来定义的. 它们的消隐, 我们采取的做法是先画出其轴向轮廓线, 然后通过计算其上、下端面的圆心点 UpO 和 DownO 与视点的距离, 并按此距离来判别端面的可见性, 近者可见, 反之不可见. 对于可见端面画出整圆(严格来说应是椭圆, 但此处表达上误差不大, 且计算简化不少, 故采用圆来代替), 不可见端面画出离视点一方近的半圆. 对于支撑腿与上、下平台的铰链 UpBall 和 DownBall, 通过画出其轮廓线(以它们各自的圆心点 O 及半径 r 代表的圆)就能近似表达了. 至此, 构件的消隐完成.

### (2) 整体模型的消隐

对于整体模型的消隐, 我们主要采用了画家算法的思想来实现. 所谓画家算法, 其基本的思想就是通过模仿画家作画的过程, 先画离视点远的图形, 再画离视点近的图形, 通过后者覆盖前者来达到消隐的目的. 实现画家算法最重要的是能够将所画图形或其中的一部分按离视点远近正确排序. 对于 Stewart 平台机构而言, 其组成并不算复杂, 不失一般性, 我们假设其下平台为静平台, 从上前方看的话, 显然静平台的优先级最高, 应先画. 其次需要画的应是 N 条支撑腿, 最后再画上平台. 可参见图 1. 但对于 N 条支撑腿却不能简单确定先画哪一条腿为好. 由于动平台运动到不同的位置时, 各支撑腿的方向和位置也必然不同. 随便取支撑腿上一 点与视点距离的远近作为排序的依据是得不到正确排序结果的. 本文采取的做法是, 先以动平台各顶点离视点距离的远近进行排序, 建立初始的优先级表, 然后对每条支撑腿建立包围盒, 通过包围盒的求交运算来进一步校正初始优先级表. 包围盒的宽度取液压缸的直径宽, 长度为动静

平台对应顶点间的距离. 如图 3 所示, 设 A 和 B 为对任意两条支撑腿所建立起来的包围盒. 只要把 A 的两条长边与 B 的两条长边分别进行求交运算, 若存在相交关系, 则通过相似性原理求出交点在 A 和 B 上各自的三维坐标, 然后计算它们与视点的距离. 若按此距离判别出的优先级关系与初始优先级表中对应的两条支撑腿的优先级关系不符, 则需要调换初始优先级表中这两条支撑腿的位置. 若任意两包围盒之间都不相交, 则已有的优先级表就为正确的优先级表. 采用这种方法进行判断虽然计算量较大, 但实践证明, 确实能够建立正确的优先级表. 优先级表建立好之后, 只要按其中的顺序依次画出各支撑腿就能得到正确的真实的二维投影图. 图 4 示意了只按动平台各顶点进行排序, 由于得不到正确的优先级关系, 出现失真现象, 图 5 则说明了当采用支撑腿包围盒求交运算后消除了失真.

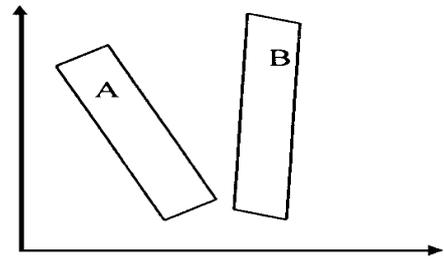


图 3 对支撑腿建立包围盒

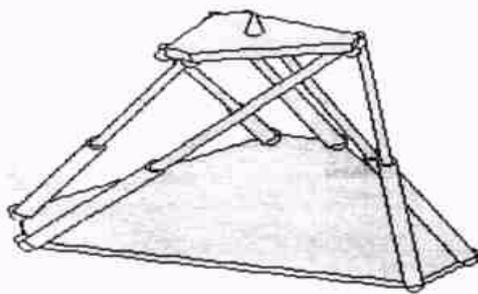


图 4 只按动平台各顶点排序出现失真

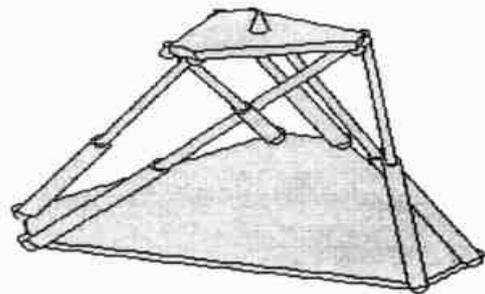


图 5 经过支撑腿包围盒求交运算后消除了失真

### 3 运动过程中的干涉判断

Stewart 平台机构作为一种并联机器人机构, 在运动过程中其支撑腿之间及支撑腿与两个平台之间是相互牵制的, 也就是说在运动到某些位置时可能会出现干涉, 即所谓的“卡住”现象. 出现干涉的情况概括起来有以下三种: a. 任意一条支撑腿与两平台中任一平台的摆角大于支撑腿与平台铰接处虎克铰或球铰所允许的最大摆角; b. 支撑腿的伸缩范围大于其移动副所允许的最大行程; c. 两条支撑腿之间可能相互干涉. 对于第一种情况, 可通过各支撑腿的方向矢量与上、下平台法矢的点积运算来求出各支撑腿相对上下平台的摆角, 并对此摆角是否大于支撑腿与上下平台铰接处的球铰或虎克铰所允许的最大摆角进行判断. 而第二种情况, 只要根据各支撑腿的位移反解值是否在给定的限定值范围以内即可判断. 对于第三种情况比较复杂, 因为涉及到判断空间两条线段的位置关系的问题. 我们对支撑腿的轴心线的线段进行讨论. 通过分析不难得出, 只有在以下两种情况下才会出现干涉: 一是两条线段共面且相交, 同时交点在线段内; 二是两条线段异面, 但公垂线与两条线段的垂足在线段以内, 且公垂线的距离小于两液压缸的半径之和. 我们只要利用空间几何的有关知识, 对任意两条支撑腿的位置关系进行判断, 检查是否出现上述两种情况, 就可确定它们之间是否发生干涉了. 在我们开发的 Stewart 平台机构运动学仿真软件里, 对 Stewart 平台机构运动过程中的每一个位置都分别进行了

上述的几种干涉判断,并给出了相应的警告信息并指明了干涉类型,图6所示为其中两条支撑

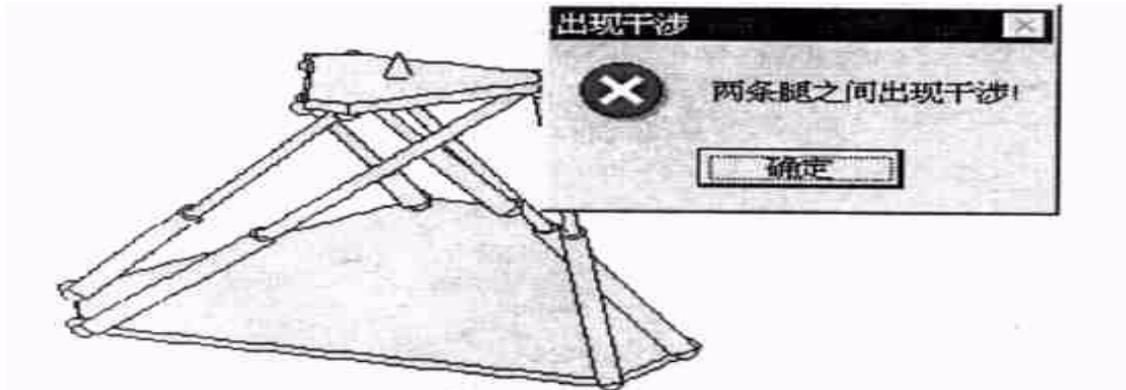


图6 出现干涉时给出警告信息并指明干涉类型

腿干涉时软件运行给出的警告.

#### 4 结论

本文提出的 Stewart 平台机构实体模型的建立方法和真实感的消隐算法,有效地解决了 Stewart 平台机构运动学仿真软件中对 Stewart 平台机构进行直观、形象表达的要求.该做法对于简单形体的造型及消隐也有一定的借鉴意义.同时本文中对 Stewart 平台机构运动过程中可能出现的干涉情况的讨论及软件实现对这种机构的实际工程应用都有较为重要的意义.

#### 参 考 文 献

- 1 Stewart D. A Platform with Six Degree of Freedom. In: Proc. Inst. Mech. Eng, 1965- 1966, 180(5): 371- 386
- 2 吴生富,王洪波,黄真. 并联机器人工作空间的研究. 机器人, 1991, 13(3): 33- 38
- 3 Jean-Pierre Merlet. Trajectory Verification in the Workspace for Parallel Manipulators. The International Journal of Robotics Research, 1994, 13(4): 326- 333
- 4 孙家广,杨长贵等著. 计算机图形学. 北京:清华大学出版社, 1995

## SOLID MODELING IN KINEMATICS SIMULATION OF STEWART PLATFORM MECHANISM

HUANG Fu-lin XIAO Da-zhun

(Department of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology 116024)

**Abstract:** Based on the constructive solid geometry (CSG) and the painter algorithm, the construction of the solid model of Stewart Platform Mechanism (SPM) and its hidden surface removal are presented in this paper. At the same time, the interference problems of SPM in motion are discussed. These methods have been successfully used in the software development of kinematics simulation of SPM.

**Keywords:** Stewart platform mechanism; solid modeling; hidden surface removal; interference

作者简介:

黄福林 (1973-), 男, 工学硕士. 研究领域: 机构学, 计算机辅助设计与分析.

肖大准 (1938-), 男, 教授. 研究领域: 机械原理与机构学、计算机辅助设计与分析.