

基于光线跟踪的虚拟数控车削加工图形生成技术

葛研军¹ 江早² 王启义¹

(1. 东北大学机械工程与自动化学院 2. 东北大学软件中心308信箱, 沈阳 110006)

摘要 采用光线跟踪算法实现高真感数控车削加工的图形生成,并以离线方式实现其加工过程仿真。在仿真过程中简化了 Torrance-Sparrow 光照模型;利用特征造型技术避免了繁复的布尔运算。根据凸多面体的约束条件及凸多面体裁剪的 Cyrus-Beck 算法,设计出射线与长方体求交的高效算法,该算法不仅执行效率高,而且还可类推至光线与任意凸多面体的求交与测试计算。

关键词 高真感仿真 光线跟踪 特征造型

0 前言

目前数控加工过程仿真趋势已由仅对单个工件的操作发展到对整个加工环境的操作,以适应未来制造业虚拟现实发展的需要。近年来科技文献中,所谓屏幕制造(Manufacturing on Screen)、虚拟制造(Virtual Manufacturing)、象素制造(Manufacturing on Pixels)、软机床(Soft Machines)等均为此类仿真^[1,2]。

虚拟现实是一种高度逼真的模拟人在自然环境中视、听、动等行为的人机界面,它由沉浸—交互—构想(Immersion-Interaction-Imagination)组成^[3]。为使用户对虚拟环境产生身临其境的感觉,计算机生成图形的逼真性是至关重要的,因此图形生成一直是虚拟现实中的关键技术。

为适应虚拟现实图形生成技术的这种要求,并使其能在制造业中得以应用,我们以 Fagor 8025 数控车削加工中心为例,采用整体光照模型下的光线跟踪技术,开发了一个高真感虚拟数控车削加工系统。与传统数控加工过程仿真相比,该系统有如下突出特点:(1)具有金属体光滑表面高光效果;(2)可产生逼真的粗、半精及精加工纹理;(3)具有高真感所必需的阴影效果;(4)可使物体表面透明,以显示刀具加工工件内表面时的状态;(5)必要时可根据

Przemyslaw Rokita 算法^[4]产生景深效果。

1 简化 Torrance-Sparrow 光照模型

为计算相应景物可见点象素颜色,需建立一个能计算物体表面在空间给定方向上光亮度的光照模型。目前计算机生成高真感三维场景的绘制方法主要有两种:(1)采用整体光照模型下的光线跟踪算法;(2)辐射度算法。由于光线跟踪算法简单,实现方便,因此本文采用第一种方法。生成场景的光照模型为 Torrance-Sparrow 模型,该模型与实验结果拟合较好^[5],利用它不仅可模拟出多个点光源的照射效果,而且还可描述出数控加工中不同切削条件下所形成的物体表面粗糙度,特别是光滑表面由于镜面反射所引起的高光效果。其模型函数表达式为^[6]:

$$I = K_a I_a + (K_d(N \cdot L) + (K_s DFG / (N \cdot E))) I_j \quad (1)$$

式中 I 为反射光强, K_a 为泛光系数, I_a 为泛光光强, K_d 为漫反射系数, N 为描述物体朝向的法向量, L 为光源方向, K_s 为镜面反射系数, D 为微平面方向分布函数, F 是 Fresnel 反射率函数, G 是反映微平面之间相互遮光的几何衰减因子, E 为视方向。

由于数控加工中加工工件一般为金属材料,且表面较光滑(毛坯状态下的粗糙表面已被普通机床去除),因此可取 $F=1, G=1$ 。

取粗糙因子 D 为 Phong 型,即

$$D = (N \cdot H)^n = \cos^n a \quad \left(-\frac{\pi}{2} \leq a \leq \frac{\pi}{2}\right)$$

上式 $H = \frac{L+E}{2}$ 且须单位化, a 为 N 与 H 之夹角, n 为大于0的整数。对于金属光滑表面,由于 n 一般取值较大,因此上式只需计算 $-\frac{\pi}{3} \leq a \leq \frac{\pi}{3}$ 时的函数值。当 a 超出此值时,可认为 D 在 n 作用下其值迅速趋近于0,即 $D=0$ 。

为把 Torrance-Sparrow 模型用于光线跟踪,还须考虑从反射方向及折射方向传来的光强。这时要将式(1)改为 $I = K_a I_a + (K_d(N \cdot L) +$

$$K_3 DFG / (N \cdot E)) I_j + K_r I_r + K_t I_t$$

式中 I_r, I_t 分别为反射光强及折射光强, K_r, K_t 为相应的系数。因此依据数控加工的具体条件,本系统最终的光照模型可简化为

当 $-\frac{\pi}{3} \leq a \leq \frac{\pi}{3}$ 时:

$$I = K_a I_a + \sum_{j=1}^m K_d (N \cdot L) + K_3 \cos^n a / (N \cdot E) I_j + K_r I_r$$

当 $a < -\frac{\pi}{3}$ 或 $a > \frac{\pi}{3}$ 时:

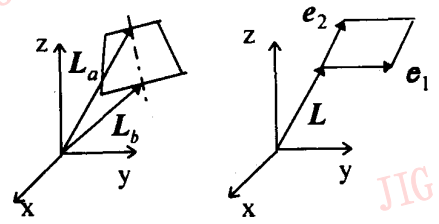
$$I = K_a I_a + \sum_{j=1}^m K_d (N \cdot L) I_j + K_r I_r$$

m 为点光源个数,在实际计算过程中, I_j 取为第 j 个点光源光强, I_r 是对光照模型函数的递归调用。

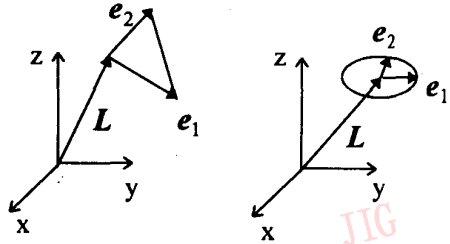
2 高真感三维场景生成

2.1 特征体的矢量描述方式

考虑到光线跟踪的求交计算量较大,若采用传统的布尔(集合)运算去实现数控加工过程仿真,则计算机的计算与图形显示速度都是令人无法接受的。因此,我们用特征造型技术取代传统的布尔(集合)运算,以使计算机在几何造型上的计算更加简洁、高效。为降低虚拟场景的复杂程度,减少绘制高真感图形所需的时间,我们假定虚拟车削加工中心仅由卡盘、车刀、钻头、回转体工件以及盘状刀库组成,并将其作为构型特征。对构型特征进一步进行几何形状细分,最终可将其抽象为由2个基本几何体素—圆锥体与平面组成(圆柱体可视为圆锥体的特例)。将这2个基本几何体素作为 C++ 语言的基类,其余各层次可分别视作其派生类。图1为其基本形体的矢量描述方式,其共同特点是形体由位置矢量(如 L_a, L_b, L)控制方位,由特征矢量(如 e_1, e_2)决定形状。



(a)圆锥体矢量 (b)平行四边形矢量



(c)三角形矢量 (d)圆矢量

图1 基本形体矢量描述

2.2 特征体求交

光线跟踪算法的基本特点是求交运算。由图1知,对特征体求交即是射(光)线与有限区域的平面或二次曲面(圆锥面)求交,由于平行四边形,三角形及圆的求交方式较为简单,因此本文仅讨论射(光)线与圆锥体求交。

如图2,设圆锥体底位置矢量为 L_b ,顶位置矢量为 L_a ,底半径 $o_1 a$ 为 R ,顶半径 $o_2 b$ 为 r ,射线始点位置矢量为 s_t ,其方向矢量为 D (已单位化), r_t 为过交点与轴线垂直的矢量,且已单位化,其模长为 v ,垂足为 q , t 为射线始点到射线与物体表面交点的距离,圆锥体高度 $o_1 o_2$ 为 h ,图中所示的剖面为交点与轴线组成的平面。

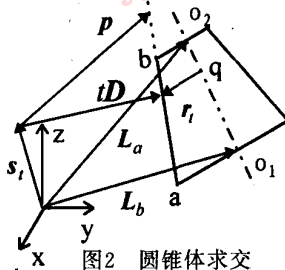


图2 圆锥体求交

设 $o_1 o_2$ 的单位矢量为 w , $o_1 q$ 的长度值为 h_0 ,则

$$w = \frac{o_1 o_2}{|o_1 o_2|} = \frac{L_a - L_b}{|L_a - L_b|}$$

$$\text{由于: } L_b + h_0 w + r_t = s_t + tD \quad (2)$$

$$\text{所以 } r_t = s_t + tD - L_b - h_0 w \quad (3)$$

式(2)两端与 w 做点积,可得:

$$L_b \cdot w + h_0 = s_t \cdot w + tD \cdot w \quad (4)$$

$$\text{因为 } r_t \cdot r_t = v^2 \quad (5)$$

$$h_0 = \frac{h}{R-r} (R-v) \quad (6)$$

所以由式(4)及式(6)可得:

$$u(L_b \cdot w - s_i \cdot w - tD \cdot w) \frac{R-r}{h} + R \quad (7)$$

将式(3)及式(7)分别代入式(5)并整理得:

$$at^2 + bt + c = 0$$

a, b, c 分别为上述各式系数或常数的关系表达式, 由于篇幅所限, 在此不予列出。

讨论:

(1) 当 $b^2 - 4ac \geq 0$ 且 $a \neq 0$ 时, $t_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2d}$, 但此时所求的只是射线与圆锥体

侧面(或其延伸面)的交点, 未必落在场景中所定义的那段圆锥体上, 例如图2中点 p 。因此需加约束条件判断, 由图2显见, 当 t 值满足 $L_b \cdot w \leq (tD + s_i) \cdot w \leq L_a \cdot w$ 时, 所求交点满足定义条件。当 $a=0$ 时为单交点。

(2) 若为双交点时, t 值应舍大取小, 即保留离视(始)点近者。

(3) 当 $R=r$ 时, 圆锥体变为圆柱体, 此时由式(7)知 $v=R$, 但对式(6)而言 h_0 为一定极限, 其值可由式(4)直接获得, t 值求法同上。

(4) 当时 $b^2 - 4ac < 0$ 时, 无交点。

求出光(射)线与基本形体的交点参数值 t 后, 还需计算其法向量 n , 然后按所求值的大小对场景中每一物体排序, 进行消隐计算, 并根据该点法向量的方向, 确定射线在此点的反射或折射方向, 将该反射或折射光线做为入射光线对场景中的其它物体进一步进行求交计算, 如此递归下去, 直至满足递归条件, 完成光线跟踪计算, 求出场景中所有物体对该点的亮度(颜色)贡献值。计算过程中由交点向各光源发射阴影探测线, 完成阴影计算。

2.3 利用特征造型完成数控加工过程仿真

由于回转体类都可视为由微小圆锥体组成, 对圆锥体外表面法向量取反便可生成描述内孔的形体特征。有了这些基本形体模型后, 即可将零件视为由若干加工特征按一定拓扑关系的组合。按序实现各特征的加工, 也就完成了对整个零件的加工。

图3为我们在 Windows 95下, 利用 Visual C++ 开发的一个基于光线跟踪的虚拟数控车削加工中心加工过程仿真系统, 图中右侧控制按钮为 Fagor 8025 面板的命令输入键。从图中可以清楚地看到圆柱形金属光滑表面所特有的高光带、两个点光源所形成场景中各个物体的阴影以及物体表面由于每个像素的亮度(颜色)值都单独计算所形成丰富的层次

感, 其逼真度可近似一幅摄影照片。

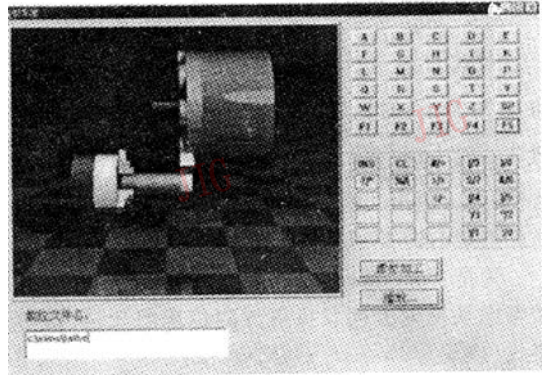


图3 虚拟车削加工中心加工过程仿真

3 加速求交算法

光线跟踪算法中70%~90%的运算时间花费在求交计算上, 而一根光线只与场景中极少数的物体表面相交, 即与场景中绝大多数物体的求交计算均属无效运算, 因此减少这种无效运算是十分必要的。

除采用常见的包围体树方法, 考虑到数控车削加工中心主要由圆锥体、长方体及五面体(车刀头可看做一长方体由其上、下二面对角线所组成的平面剖分而得, 是一个五面体)构成。对于圆锥体, 其与光线的求交测试(采用圆柱体做为它的包围盒)较为简单, 因此光线与长方体及五面体的求交测试在本系统中尤为重要, 提高它们的求交效率是十分必要的。

由于长方体本身是一种较常见的构型体素, 且经常做场景中物体的包围盒, 因此对它与光线的求交特性研究较多, 概括起来大致有以下几点:

(1) 将射线与长方体的求交运算转化为射线与长方体的6个面求交, 仅当射线与某一个面相交时, 射线与长方体相交^[6]。这种算法简便、直观, 但效率较低。

(2) 变换坐标系使光线与新坐标系 z 轴重合, 若在新坐标系中长方体的 x_{min} 和 x_{max} , y_{min} 和 y_{max} 符号均相反, 则光线与长方体相交^[5]。该算法由于需做坐标旋转变换, 因此执行效率并不高, 且具有唯一性, 不适合其它凸多面体。

(3) 借助凸多面体裁剪的 Cyrus-Beck 算法, 构造射线与长方体的求交算法。该算法的主要特点是: 有交时计算量大, 无交时计算量小。即当射线与长方体相交时, 必须在处理所有6个面后, 才能获得交点参数, 而当射线与长方体无交时, 最少只要处理2个

面即可^[6]。此种方法在长方体相对较小,特别是作为复杂物体的包围盒时,执行效率较高。

实际上我们可以利用凸多面体的约束条件,设计出更为高效的算法。

3.1 构造长方体的包围球

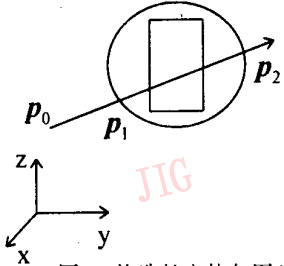


图4 构造长方体包围球

图4为一长方体及其包围球,包围球应略大于长方体的外接球。构造包围球主要有2个作用:

(1) 做为普通的包围盒,仅当射线与包围盒相交时,才对其内部的长方体做求交测试与运算。

(2) 确定使用 Cyrus-Beck 算法时射线的起点参数值 t_{min} 及终点参数值 t_{max} 。

$$\text{由图4知: } t_{min} = 0 \quad t_{max} = t_1 + t_2$$

其中 $t_1 = |p_0 p_1|$, $t_2 = |p_1 p_2|$, 即 t_1, t_2 为该射线与球相交时,所得的2个交点参数值。

3.2 利用长方体面上点的约束条件及 Cyrus-Beck 算法进行求交测试与运算

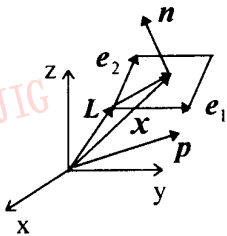


图5 点 p 与 n 的位置关系

如图5, L, e_1, e_2 意义同图2(b), n 为组成长方体所在面的外法向量, x 为射线与平面相交的交点矢量, p 为空间任意一点矢量,当 p 位于由图5所示的6个平行四边形所组成的长方体面上或其内时,其与 n 的关系须满足如下约束条件:

面即可^[6]。此种方法在长方体相对较小,特别是作为复杂物体的包围盒时,执行效率较高。

$$(p - L_i) \cdot n_i \leq 0 \quad i \in [1, 6] \text{ 之间的整数。}$$

设空间任意射线矢量表达式为: $p = p_0 + tD$, 其中 p_0 为射线始点矢量, D 为射线方向矢量(已单位化), t 为参数。则当射线与长方体相交时,必满足如下约束条件:

$$t_i \leq \frac{(L_i - p_0) \cdot n_i}{D \cdot n_i}, i \in [1, 6] \text{ 之间的整数} \quad (8)$$

讨论:

当 $D \cdot n_i \neq 0$ 时,首先按式(8)中的等式求出该射线与组成长方体的平行四边形所在面之所有交点参数值,然后按序取出一个参数值,例如,此时有2种情

况:

(1) 若 $D \cdot n_i < 0$,按 Cyrus-Beck 算法的几何意义,此种情况代表射线接近或进入长方体内侧,此时若 t_1 满足式(8)中的约束条件,表明该射线必与长方体相交,且 t_1 即为所需的参数值。若 t_1 不满足式(8),则根据 Cyrus-Beck 算法,取 $t_{min} = \max(t_1, t_{min})$,若 $t_{min} > t_{max}$, 则该射线一定不与长方体相交。反之,应再取一个点,例如 t_2 ,继续进行求交测试。

(2) 若 $D \cdot n_i > 0$,表示射线沿 D 方向越来越远离长方体。

此时若 t_1 满足式(8)中的约束条件,表明该射线必与长方体相交,但 t_1 一定不是所需的参数值,可把此值略去,程序转入 $D \cdot n_i < 0$,求所需的参数值。

若 t_1 不满足约束条件,则根据 Cyrus-Beck 算法,取 $t_{max} = \min(t_1, t_{max})$,若此时 $t_{min} > t_{max}$, 则表明射线不与长方体相交。反之,应再取一点,继续进行求交测试。

当 $D \cdot n_i = 0$ 时,表明射线与长方体的第 i 个面平行,此时也有2种情况:

(1) 若 $(p - L_i) \cdot n_i > 0$,表明 p 点与第 i 个面外法线同侧,此时它一定不与长方体相交。

(2) 若 $(p - L_i) \cdot n_i < 0$,表明 p 点位于第 i 个面外法线异侧,此时可把此面忽略,按 $D \cdot n_i \neq 0$ 时的情况继续处理其它面。

综上所述,当射线与长方体有交时,最少处理一个面、最多处理6个面,即可将所需交点的参数值求出。当射线与长方体无交时,最少处理2个面(当 $D \cdot n = 0$ 时,最少处理一个面)即可判断出来。因此,该算法在射线对长方体有交时计算量也小,无交时计算量也小,所以它比单独使用 Cyrus-Beck 算法时效率要高,特别是当长方体在包围球中所占的比例较大时,执行效率会更高。

这种结合 Cyrus-Beck 算法的约束条件判断法,其原理可适用于射线与任意凸多面体的相交测试与运算。

另外,由于数控加工仿真过程中在视点不变的前提下,卡盘座、卡盘在场景中的位置是固定不变的,因此,在求出第一帧光线与卡盘座、卡盘的交点后,即可存储它们的光线树,在绘制其它帧新的图像时,这部份的求交运算即可省去。

经过上述的求交优化算法后,我们用 P5/133 微机(无任何图形加速卡)在 Windows 95 环境下,生成一帧分辨率为 800×600 , 图幅为 450×400 , 颜色为 24 位真彩画面所需的时间由原来不经任何优化算法的

6分钟左右缩减至2分钟。

4 实时仿真可行性讨论

由于单个 CPU 的运算速度不可能无限制地提高,所以目前人们把多 CPU 的并行处理作为大幅度提高计算机运算速度的主要途径。而光线跟踪算法中屏幕每一像素均是相互独立的,所以非常适合计算机并行处理^[7]。目前已有基于 DMPC(多指令、多数据、高性能计算机)对光线跟踪并行处理的算法^[8]。因此,我们有理由相信,若能进一步提高算法效率,减少图形画面的复杂度,将基于光线跟踪算法所产生的每帧画面时间限制在以分钟计时之内,那么在配以适当的硬件后(如安装图形加速卡,采用64位或更高位的总线结构,增加芯片的并行处理功能等),则实时地用光线跟踪产生高真感数控加工图像仿真是极有可能实现的。

由于计算机显示时间的限制,我们预先将每帧仿真画面计算好,然后将其转换成 avi 文件格式,利用 Windows 95中的媒体播放器进行播放。



江 早 1989年毕业于清华大学。1995年在东北大学获博士学位。现为东北大学软件中心副教授,主要研究方向为图象图形处理及 CAD/CAM。



葛研军 1996年于哈尔滨工业大学机电工程学院获硕士学位,现为东北大学机械工程与自动化学院博士研究生,主要研究领域为 CAD/CAM、数控加工图象编程及数控加工过程仿真等。



王启义 东北大学教授,机械制造专业博士生导师,东北大学副校长。主要研究方向为 CAD/CAM 集成系统,虚拟制造,机械加工智能化控制等。

Graphical Generation Technology Based on Ray Tracing for a Virtual NC Turning Process

Ge Yanjun¹, Jiang Zao², Wang Qiyi¹

(1 School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110006)

(2 Software Center of Northeastern University, Shenyang 110006)

Abstract The ray tracing algorithm is adopted to complete the realistic graphical generation for a NC turning machining center and it's processing simulation is realized in off line. In the simulation, on the basis of characteristics in NC processing, the Torrance-Sparrow's illumination model is simplified and the complicated Boolean operation is avoided using the feature model technology. Since the main task in the ray tracing is to calculate intersection points, a new method is designed based on a convex polyhedron constraint condition and the Cyrus-Beck's algorithm for line clipping. The method is not only efficient, but it can lead to the test and the intersection calculation between a ray and an arbitrary convex polyhedron. In the end, the possibility to generate an real time fidelity scenario based on ray tracing method is discussed.

Keywords High-fidelity simulation, Ray tracing, Feature model

参考文献

- 1 Jean V Owen. Making Virtual Manufacturing Real. *Manufacturing Engineering*, 1994, 11: 33~37.
- 2 Soft Machines. <http://www.silma.com/Softm.html>. 1996.
- 3 汪成为. 灵境技术与人机和谐仿真环境. *计算机研究与发展*. 1997, 34(1): 1~12.
- 4 Przemyslaw Rokita. Generating Depth-of-Field Effects in Virtual Reality Applications. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1996, 5: 18~21.
- 5 罗杰斯 D F. 计算机图形学的算法基础. 北京: 科学出版社, 1987.
- 6 孙家广. 计算机图形学(新版). 北京: 清华大学出版社, 1995.
- 7 沃特金森 C D. C 语言成像与光线跟踪程序设计. 北京: 科学出版社, 1995.
- 8 Didier Badouel, Kadi Bouatouch. Distributing Data and Control for Ray Tracing in Parallel. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1994, 7: 69~77.