

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.08.013

基于四边形网格参数细分的平面与自由曲面求交算法*

李慧莹, 陈良骥*

(郑州航空工业管理学院 机电工程学院, 河南 郑州 450015)

摘要: 为解决计算机辅助设计和制造过程中常见的平面与曲面精确求交问题, 提出了一种四边形网格参数面片结构模型, 并运用空间直线与平面的相交状态进而得出四边形面片与平面的相交状态。求交时将自由曲面在参数域内逐步细分为这样的面片结构, 对处于不同状态的四边形面片做不同的处理, 最后得出一张交线链表, 采用样条拟合算法即可得到交线。实例计算结果表明, 所提出的求交方法收敛性好而且精度高, 能很好地应用于实际求交运算中。

关键词: 自由曲面; 求交; 四边形面片; 算法

中图分类号: TP391.72; TH164

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)08-0956-04

Algorithm for finding plane & free-form surface intersection curve based on subdivision of quadrilateral mesh parameters

LI Hui-ying, CHEN Liang-ji

(School of Mechatronics Engineering, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: In order to find accurate intersection between a plane and free-form surface, a model of quadrilateral parametric facet structure was presented, intersection state of the model and a plane can be gotten from line-plane intersecting state. When calculating intersection points, the surface was firstly step-by-step subdivided as facets mentioned above and to facets with variant state, certainly, treating is different. In the end, a chained list of an intersection curve can be obtained and the intersection of plane-surface can be gotten by using a spline fitting method. It is verified through the computation example that the proposed method is well-convergence property and high-accuracy and can be used in actual intersection calculating.

Key words: free-form surface; intersection; quadrilateral facet; algorithm

0 引言

一直以来, 平面与曲面间求解交线的问题都是计算机辅助设计与制造(computer-aided design/manufacturing, CAD/CAM)编程领域中最普遍的工程问题。在曲面造型与裁剪、加工刀具轨迹计算、加工几何图形验证等实际应用中, 常常需要对平面与曲面进行求交运算^[1-3]。国内外在求交计算方面做了大量的研究, 大致包括牛顿迭代法^[4]、曲面离散法^[5-6]、区间算术法^[7]、光线跟踪法^[8-9]以及近年来出现的等值线法^[10]、三角网格

方法^[11-12]等。牛顿迭代法通常是在给定初值后将求交问题转化为求线性方程组或常微分方程解的问题, 但收敛与否以及收敛的速度与迭代初值的选取有很大关系。曲面离散算法是用小平面对逼近曲面的一种几何求交算法, 有较高的可靠性, 但缺点是运算量较大、效率低、精度低。区间算术法的提出则只是为了解决直线与隐曲面求交的问题。

鉴于以上各种求交算法各自的缺点, 本研究将首先提出一种四边形参数曲面片模型, 在此基础上可将平面与自由曲面的求交问题简化为直线段与平面的位置关

收稿日期: 2013-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275485); 河南省高校科技创新人才支持计划资助项目(13HASTIT036)

作者简介: 李慧莹(1981-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 主要从事多轴数控加工方面的研究。E-mail: lihuiying.lhy@163.com

通信联系人: 陈良骥, 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: chenjiacilj@163.com

系问题。与现行常见的求交方法相比,本研究算法的特点是计算稳定可靠、精度高而且具有较强的普适性。

1 自由曲面的NURBS表示

一张笛卡尔空间自由曲面可表示为如下非均匀有理B样条形式^[13-14]:

$$\begin{aligned} S(u,v) = \\ [x(u,v), y(u,v), z(u,v)]^T = \\ \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{ij} P_{ij}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{ij}} \quad 0 \leq u, v \leq 1 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: P_{ij} —三维控制点; w_{ij} — P_{ij} 对应权重; $(n+1)$, $(m+1)$ — u 向和 v 向控制点的数目; $N_{i,p}(u)$, $N_{j,q}(v)$ —沿 u 向的 p 次和 v 向的 q 次 B 样条基函数。

由自由曲面的 NURBS 定义可知,一张自由曲面对应于参数平面内一正方形区域 $\{(u,v) | 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1\}$, 笛卡尔空间与参数空间的映射关系如图 1 所示。

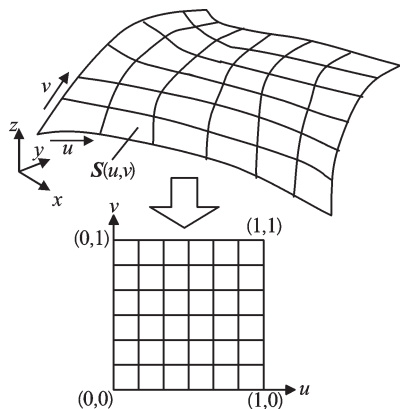


图1 笛卡尔空间与参数空间的映射关系

2 空间点、线与平面的关系

2.1 空间点 V 与平面的关系

已知平面单位法矢为 $\{A, B, C\}$ 、平面常数为 D , 平面与曲面相交如图 2 所示。平面为所有点 $V=(x, y, z)$ 的集合 $\{VF(V)=F(x, y, z)=Ax+By+Cz+D=0\}$ 。该平面将空间分为 3 个部分, 即 $\{VF(V)<0\}$ 、 $\{VF(V)=0\}$ 和 $\{VF(V)>0\}$ 。因此, 空间任一点 V 与平面有如下关系:

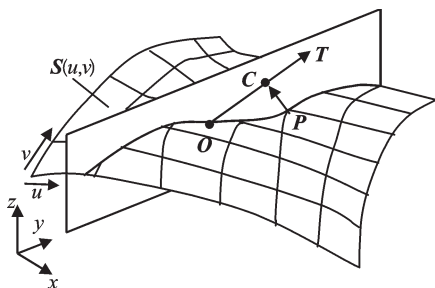


图2 平面与曲面相交

若点 V 在平面上, 则 $F(V)=0$; 反之, 若 V 使得 $F(V) \neq 0$, 则 V 定不在平面上。

2.2 空间线段 V_1V_2 与平面的关系

空间线段 V_1V_2 与平面的关系可由线段两个端点 V_1 和 V_2 分别与平面的关系来确定。具体位置关系可以有 4 种情形: ①若 V_1 和 V_2 分布在平面同一侧, 则线段 V_1V_2 与平面不相交, 此时 $F(V_1)$ 、 $F(V_2)$ 皆非零且具有相同的符号; ②若 V_1 和 V_2 分布在平面相异一侧, 则线段 V_1V_2 与平面交于一点, 此时 $F(V_1)$ 、 $F(V_2)$ 皆非零且具有相异的符号; ③若 V_1 (或 V_2) 在平面上而 V_2 (或 V_1) 不在平面上, 则线段与平面交于 V_1 (或 V_2); ④若 V_1 和 V_2 都在平面上, 则线段位于平面上。

将以上线段与平面之间的关系归纳如下:

$$\begin{cases} F(V_1)F(V_2) > 0 & V_1V_2 \text{ 与平面不相交} \\ F(V_1)F(V_2) < 0 & V_1V_2 \text{ 与平面相交于一点} \\ F(V_1)F(V_2) = 0 & \begin{cases} F(V_1)=0; F(V_2) \neq 0 & V_1V_2 \text{ 与平面交于 } V_1 \\ F(V_1) \neq 0; F(V_2)=0 & V_1V_2 \text{ 与平面交于 } V_2 \\ F(V_1)=0; F(V_2)=0 & V_1V_2 \text{ 在平面上} \end{cases} \end{cases}$$

3 四边形参数面片

如图 1 所示, 位于笛卡尔空间的曲面的每个空间四边形都对应于参数平面内的一小长方形。四边形参数面片模型如图 3 所示, 本研究将每个长方形分别按照一定顺序标记出 4 个角点 (1、2、3、4) 和 4 条边 (I、II、III、IV), 并定义这样的长方形为四边形参数面片。参数平面内, 平面与曲面交线的参数变化曲线 $v=f(u)$, 如图 4 所示。本研究用前一小节中介绍的两种关系可以判定出各个空间四边形每个边与平面的关系, 进而可以判断出四边形参数面片与 $v=f(u)$ 的位置关系。曲面所有四边形参数面片与 $v=f(u)$ 间的位置关系分别会有如图 3 所示的 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 等 7 种状态。

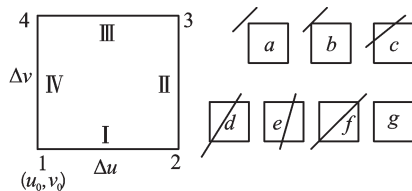


图3 四边形参数面片模型

本研究对这 7 种状态分别做如下定义: ①空间四边形的每个边均在平面的同一侧为 a 态; ②空间四边形的仅有一个顶点在平面上为 b 态; ③空间四边形的两个相邻边与平面相交为 c 态; ④空间四边形的一个顶点在平面上、一条边与平面相交为 d 态; ⑤空间四边形的两个对边与平面相交为 e 态; ⑥空间四边形的两个对角顶点在平面上为 f 态; ⑦空间四边形的某边位于平面上时为 g 态。

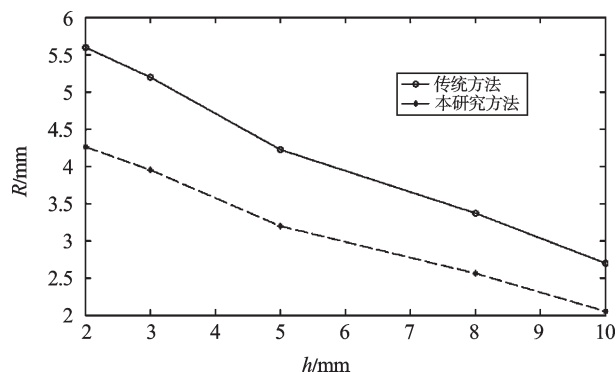


图3 分辨力比较图

藏深度 2.0 mm 的缺陷,而传统方法在计算盲区范围内则基本无法检测到缺陷,图 1 及图 2 也说明,本研究方法在检测过程中,测量误差及分辨力均更优于传统方法。

4 结束语

为了解决传统 TOFD 法对埋藏在近表面的缺陷波无法辨识等近表面盲区问题,本研究提出了一种新的近表面检测方法。通过理论分析和实验比较可知,与传统 TOFD 检测方法相比,基于变型波的方法能有效地检测到埋藏深度 2.0 mm 的缺陷,并有效地解决 TOFD 近表面盲区问题;该方法通过改变探头中心距和采用变型波检测方法能有效减小测量误差并提高盲区的分辨力;虽然提出的基于变型波的检测方法能有效解决表面盲区的问题,但是由于在波的传播过程中有纵波直通波、底面反射波及变型波等波型,较为复杂,目前要通过人工方法来首先调整探头中心距和

人工判断变型波的位置,而智能判别将是下一步研究的重点。

参考文献(References):

- [1] GANG Tie, CHI Da-zhao. Novel approach to the enhancement of ultrasonic TOFD B-scan image for the measurement of weld crack[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2007, 12(1): 87-93.
- [2] CHARLESWORTH J P, TEMPLE J. Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction[M]. 2nd ed. US: Research Studies Press Ltd., 2001.
- [3] 迟大钊, 钢铁, 姚学英. 一种基于超声 TOFD 法的近表面缺陷检测模式[J]. *焊接学报*, 2011, 32(2): 25-29.
- [4] 盛朝阳, 钢铁, 迟大钊. 基于分水岭的超声 TOFD 检测图像分割[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(8): 35-40.
- [5] 强天鹏. TOFD 技术的检测盲区计算和分析[J]. *无损检测*, 2008, 30(10): 738-741.
- [6] 张锐, 万明习. 超声衍射一回波渡越时间方法焊缝裂纹原位定量无损估计[J]. *机械工程学报*, 2000, 36(5): 54-57.
- [7] CHI Da-zhao, GANG Tie, GAO Shuang-sheng. Background removal and weld defect detection based on energy distribution of image[J]. *China Welding*, 2007, 16(1): 14-18.
- [8] 迟大钊, 钢铁, 姚英学, 等. 一种基于超声 TOFD 法的近表面缺陷检测模式[J]. *焊接学报*, 2011, 32(2): 25-28.
- [9] BASKARAN G. Shear-wave time of flight diffraction (S-TOFD) technique[J]. *NDT&E International*, 2006(39): 458-467.
- [10] 孙忠波, 郑红霞, 张平. TOFD 检测中借助变型波确定缺陷偏心距及缺陷精确深度的探讨[J]. *无损检测*, 2010, 32(7): 500-508.

[编辑: 洪炜娜]

(上接第 958 页)

参考文献(References):

- [1] 张和明, 柯映林, 程耀东. 参数曲面与平面求交的一种新方法[J]. *工程图学学报*, 1995(2): 31-37.
- [2] 张和明, 张玉云, 熊光楞, 等. 参数曲面与平面的精确求交及其应用[J]. *机械工程学报*, 1997, 33(5): 31-36.
- [3] 吕晓倩, 赵玉刚, 周海安. 空间曲面与平面交线的一种插补算法[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2008(3): 13-15.
- [4] ROY U, DASARI R. Implementation of polygonal algorithm for surface-surface intersections[J]. *Computers Industry Engineering*, 1998, 34(2): 399-412.
- [5] 马翔, 周儒荣. 自由曲面与平面的一种分割、跟踪求交方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 1994, 26(1): 75-79.
- [6] 郑立垠, 张丽, 张云鹏. 细分曲面求交线计算方法的研究[J]. *微计算机应用*, 2008, 29(1): 78-81.
- [7] 余正生, 李启炎, 肖少拥, 等. 一种直线与隐式曲面求交的方法[J]. *工程图学学报*, 2000, 21(3): 20-23.
- [8] ROTH S D. Ray casting for modeling solid[J]. *Computer Graphics & Image Process*, 1982, 18(2): 109-144.
- [9] 余正生, 楚广琳. 一种跟踪隐式曲面交线的算法[J]. *计算机应用研究*, 2008, 25(7): 2235-2237.
- [10] 宋宏勋, 韩毅, 吴初娜. 一种基于等值线法的 NURBS 曲面与平面的求交算法[J]. *数字技术与应用*, 2011(7): 103-105.
- [11] 孙殿柱, 孙永伟, 田中朝, 等. 三角网格曲面模型快速求交算法[J]. *北京工业大学学报*, 2012, 38(8): 1121-1124.
- [12] 孙殿柱, 康新才, 李延瑞, 等. 三角 Bézier 曲面快速求交算法[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(3): 89-94.
- [13] PIEGL L. On NURBS: a survey[J]. *IEEE Computer Graphics & Application*, 1991, 11(1): 55-71.
- [14] 隆强, 谢延敏, 杨川. 基于 Foleg 参数法反算三次 NURBS 曲线的算法研究[J]. *机械*, 2012, 39(7): 5-8, 40.

[编辑: 洪炜娜]