

文章编号: 0258-7025(2010)03-0863-05

基于 STL 模型的五轴激光切割轨迹生成

朱 虎 扶建辉 刘志军

(沈阳航空工业学院机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要 提出一种基于切口特征自动识别的五轴三维激光切割轨迹自动生成方法。采用 STL 模型,通过切口特征自动识别实现了切口特征的自动选取,并通过对切口边环的偏置实现了激光束半径补偿;利用切口边环的离散点确定了激光束入射点位置,并利用激光束入射点所在三角面片的法向量确定了激光头姿态;算法应用实例表明,该方法能够实现切口特征的自动选取和激光束半径补偿,并能保证激光头始终与工件表面保持垂直,软件系统运行稳定可靠。

关键词 激光技术; 激光切割; 轨迹; STL 文件

中图分类号 TG485 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20103703.0863

Generation of 5-Axis Laser Cutting Path Based on STL Model

Zhu Hu Fu Jianhui Liu Zhijun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang, Liaoning 110136, China)

Abstract A method for automatically generation of 5-axis 3D laser cutting path was proposed based on automatic recognition of incision features. Automatic selection of incision features was realized through automatic recognition of incision features using STL (stereo lithography) model. The laser beam radius compensation was done by offsetting of the edge loop of incision. The positions of laser beam focal points were decided according the discrete points on the edge loop of incision. The laser head posture was determined using the normal vector of triangle face on which the laser beam focal points was located. The case studies indicate that the method can automatically select incision features and carry out laser beam radius compensation automatically, at the same time can ensure the laser head perpendicular to the surface of workpiece all the time. The operation of software system is stable and reliable.

Key words laser technique; laser cutting; path; STL file

1 引 言

五轴三维激光切割具有柔性高、切割质量好、效率高、绿色环保、材料适应性好的优点,不仅可应用于金属材料的切割,还可应用于有机玻璃^[1]、陶瓷^[2]等非金属材料的切割^[3],业已成为激光切割领域的研究热点^[4,5]。其中五轴三维激光切割轨迹生成是五轴三维激光切割中必不可少的一个重要环节,国内外学者们对此进行了大量的研究。苏敏等^[6]利用 UG 软件从工件的 CAD 模型中提取五轴三维数控加工的刀轨数据,并把它应用于五轴三维激光切割,但由于 UG 本身不是五轴三维激光切割专用软件,因此不能很好地满足五轴三维激光切割工艺要求。J. K. Kang 等^[7]和陈继民等^[8]分别研究了基于 UG

和 MDT 二次开发平台的五轴三维激光切割轨迹生成方法。国家产学研激光技术中心的左铁钏等研究开发了五轴三维激光切割软件 LaserCAM2000^[9]。目前在国内外应用最广泛的五轴三维激光切割软件是英国 Camtek 公司开发的 PEPS PentaCut 软件^[10]。上述研究和软件为五轴三维激光切割技术的发展做了不小的贡献,但也存在着以下问题:

1) 国内外所有的研究大多不能切口特征自动识别和选取^[6~9],而采用手工选取方式。这种方式在切割面上存在大量不规则切口特征时,费时费力,易发生错误。

2) 任何一个激光束都有一定大小的半径,然而现行的研究大多没有考虑激光束半径补偿问

收稿日期:2009-03-23; 收到修改稿日期:2009-06-03

作者简介:朱 虎(1964—),男,博士,教授,主要从事 CAD/CAE/CAM 和激光切割技术研究。

E-mail: zhuhu100@yahoo.com.cn

题^[6~9],这必将影响切割精度。

3) 现行的大多数研究和激光切割软件都依赖于其他商用软件的二次开发平台^[7~9],但由于这些商用软件本身价格非常昂贵,因而不利于激光切割软件的推广普及。

针对上述问题,本文充分考虑激光头的位姿,研究一种基于 STL 模型的具有切口特征自动识别与选取、激光束半径自动补偿等功能,并能保证激光束始终与被切割曲面垂直的五轴三维激光切割轨迹生成方法。

2 切口特征的自动识别

采用在快速原型制造、激光加工、反求工程、数控加工、金属板材成形等领域广泛使用的 STL 数据格式文件为输入文件,以克服现行的研究由于在昂贵的商用软件平台上进行二次开发而难于推广应用的问题。STL 数据格式用三角面片及其法向量来表达实体,不需要特定的运行平台,具有卓越的跨平台性和数据结构简单的优点,大多数 CAD/CAM 软件都支持 STL 文件的输入输出^[11]。

所谓切口特征自动识别就是识别出切口特征的切口边环以及与其切口边环相连的被切割面,为刀位点计算激光束半径自动补偿和激光头位姿实时自动控制提供必需的几何信息,具体算法如下:

1) 对于读入的 STL 数据通过顶点合并来消除冗余顶点,并根据模型数据中是否存在单边来判别是曲面模型还是实体模型。所谓单边是指只与一个三角面片连接的边。

2) 对于曲面模型,只要找出只与一个三角面片连接的边,并按一定的顺序连接即可得到切口边环。

3) 然而对于实体模型来说,提取切口边环比较复杂。首先在实体模型的所有三角面片中提取法向量 z 坐标值大于零的三角面片和被法向量 z 坐标值大于零的三角面片所包围的法向量 z 坐标值等于零的三角面片,得到模型外表面组 F 。

4) 在外表面组 F 中提取被两个互为垂直的三

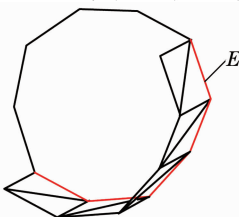


图 1 外表面组 F 中的垂直边组 E

Fig. 1 Group E of vertical edges in outer surface group F

角面片共享的垂直边组 E (切口边环的一部分,如图 1 所示)。

5) 在实体模型的所有三角面片中提取被两个互为垂直的三角面片共享的垂直边并按一定的顺序连接得到一系列封闭的垂直边环组 E_1 。

6) 在实体模型的所有三角面片中垂直边环组 E_1 中提取包含垂直边组 E 的单边环组 L_0 ,即切口边环。

7) 在外表面组 F 中,去除如图 2 所示的边组 E_0 和垂直边组 E 之间的三角面片组 F_0 ,为激光束半径补偿和激光头姿态确定所需要的、与切口边相连的被切割三角面片的提取做准备。为此需要先找出边组 E_0 。首先在外表面组 F 中提取只与一个三角面片连接的边,并按一定的顺序连接得到一个封闭的单边环 L ,然后在单边环组 L 中删除与切口边环 L_0 重复的边,得到多余边组 E_0 。判断多余边组

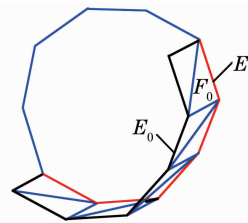


图 2 三角面片组 F_0

Fig. 2 Group F_0 of triangular patch

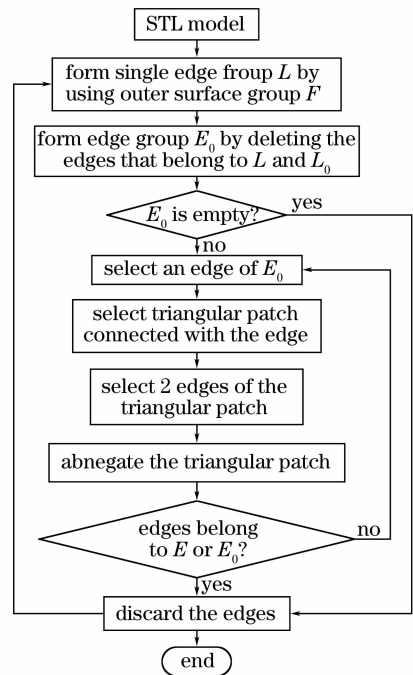


图 3 去除三角面片组 F_0 的算法流程

Fig. 3 Algorithm workflow of removing triangular patch group F_0

E_0 是否为空,如果是,则结束;如果不是,提取边组 E_0 的一条边和与该条边连接的三角面片,并提取该三角面片的 2 个边后舍弃该三角形,然后判断这 2 个边是否在垂直边组 E 或边组 E_0 ,如果是,则舍弃该边;如果不是,则提取与该边连接的三角面片并重复上述过程,具体算法流程如图 3 所示。

3 激光束半径补偿

由于激光束存在发散现象,因此聚焦后不可能是一个几何点而是一个具有一定直径大小的光斑,所以精密切割时必须对其进行激光束半径补偿。将切口边环沿着与被切割面平行的方向偏置激光束半径大小的距离来实现激光束半径补偿。如图 4 所示,首先分别求出两对三角面片 AFB 和 BFC , BFC 和 CED 的交线 BB_3 和 CC_3 ;然后将切口边 AB , BC 和 CD 分别在三角面片 AFB , BFC 和 CED 上进行偏置,并与交线 BB_3 和 CC_3 求交,得到交点 B_1 , B_2 , C_1 和 C_2 ;取交点 B_1 和 B_2 , C_1 和 C_2 的中点 B_0 和 C_0 ,并连接 B_0 和 C_0 得到一个切口边 BC 的偏置边

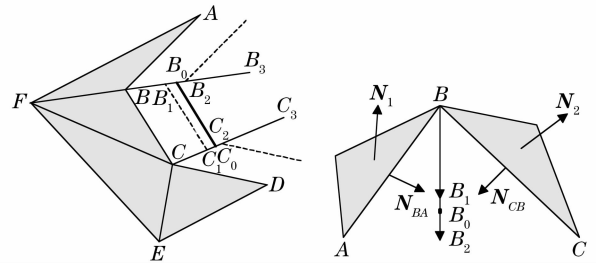


图 4 激光束半径补偿算法

Fig. 4 Laser beam radius offset algorithm

B_0C_0 ;按同样的方法可将所有的切口边进行偏置。下面以点 B 为例,根据与点 B 连接的三角面片的法向量平行和不平行两种情况,说明上述偏置计算方法。

若与点 B 连接的三角面片的法向量 N_1 与 N_2 不平行,则

$$\overrightarrow{BB_1} \parallel (N_2 \times N_1), \quad \frac{\overrightarrow{BB_1} \cdot N_{BA}}{|N_{BA}|} = R,$$

R 为激光束焦点半径, N_{BA} 为与 AB 边垂直且与 AB 边所在三角面片平行的法向量, N_{CB} 为与 BC 边垂直且与 BC 边所在三角面片平行的法向量。

设 $B_1(x_1, y_1, z_1)$, $N_2 \times N_1 = \{a, b, c\}$, $N_{BA} = \{l_1, m_1, n_1\}$, $B(v_{Bx}, v_{By}, v_{Bz})$, $A(v_{Ax}, v_{Ay}, v_{Az})$, $C(v_{Cx}, v_{Cy}, v_{Cz})$, 则

$$\begin{cases} \frac{x_1 - v_{Bx}}{a} = \frac{y_1 - v_{By}}{b} = \frac{z_1 - v_{Bz}}{c} = t_1 \\ \frac{(x_1 - v_{Bx}) \times l_1 + (y_1 - v_{By}) \times m_1 + (z_1 - v_{Bz}) \times n_1}{\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}} = R \end{cases}, \quad (1)$$

解得 B_1 的坐标

$$x_1 = v_{Bx} + a \times t_1, \quad y_1 = v_{By} + b \times t_1, \quad z_1 = v_{Bz} + c \times t_1, \quad (2)$$

其中

$$t_1 = \frac{R \times \sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}}{a \times l_1 + b \times m_1 + c \times n_1}, \quad (3)$$

$$N_2 \times N_1 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ n_{2x} & n_{2y} & n_{2z} \\ n_{1x} & n_{1y} & n_{1z} \end{vmatrix}, \quad (4)$$

$$N_{BA} = N_1 \times \overrightarrow{BA} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ n_{1x} & n_{1y} & n_{1z} \\ v_{Ax} - v_{Bx} & v_{Ay} - v_{By} & v_{Az} - v_{Bz} \end{vmatrix}, \quad (5)$$

同理可得 $B_2(x_2, y_2, z_2)$ 的坐标,那么 B 点的偏置点 $B_0(x_0, y_0, z_0)$ 的坐标为

$$x_0 = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad y_0 = \frac{y_1 + y_2}{2}, \quad z_0 = \frac{z_1 + z_2}{2}, \quad (6)$$

若与点 B 连接的三角面片的法向量 N_1 与 N_2 平行,则点 B_0, B_1 与 B_2 重合。显然

$$\overrightarrow{BB_0} \parallel \left(\frac{\overrightarrow{BA}}{|\overrightarrow{BA}|} + \frac{\overrightarrow{BC}}{|\overrightarrow{BC}|} \right), \quad \frac{\overrightarrow{BB_0} \cdot N_{BA}}{|N_{BA}|} = R,$$

设 $\left(\frac{\overrightarrow{BA}}{|\overrightarrow{BA}|} + \frac{\overrightarrow{BC}}{|\overrightarrow{BC}|} \right) = \{a_0, b_0, c_0\}$, 则

$$\begin{cases} \frac{x_0 - v_{Br}}{a_0} = \frac{y_0 - v_{By}}{b_0} = \frac{z_0 - v_{Bz}}{c_0} = t_0 \\ \frac{(x_0 - v_{Br}) \times l_1 + (y_0 - v_{By}) \times m_1 + (z_0 - v_{Bz}) \times n_1}{\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}} = R \end{cases}, \quad (7)$$

解得

$$x_0 = v_{Br} + a_0 \times t_0, \quad y_0 = v_{By} + b_0 \times t_0, \quad z_0 = v_{Bz} + c_0 \times t_0, \quad (8)$$

其中

$$t_0 = \frac{R \times \sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}}{a_0 \times l_1 + b_0 \times m_1 + c_0 \times n_1},$$

$$\left(\frac{\overrightarrow{BA}}{|\overrightarrow{BA}|} + \frac{\overrightarrow{BC}}{|\overrightarrow{BC}|} \right) =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{v_{Ax} - v_{Bx}}{\sqrt{(v_{Ax} - v_{Bx})^2 + (v_{Ay} - v_{By})^2 + (v_{Az} - v_{Bz})^2}} + \frac{v_{Cx} - v_{Bx}}{\sqrt{(v_{Cx} - v_{Bx})^2 + (v_{Cy} - v_{By})^2 + (v_{Cz} - v_{Bz})^2}}, \\ \frac{v_{Ay} - v_{By}}{\sqrt{(v_{Ax} - v_{Bx})^2 + (v_{Ay} - v_{By})^2 + (v_{Az} - v_{Bz})^2}} + \frac{v_{Cy} - v_{By}}{\sqrt{(v_{Cx} - v_{Bx})^2 + (v_{Cy} - v_{By})^2 + (v_{Cz} - v_{Bz})^2}}, \\ \frac{v_{Az} - v_{Bz}}{\sqrt{(v_{Ax} - v_{Bx})^2 + (v_{Ay} - v_{By})^2 + (v_{Az} - v_{Bz})^2}} + \frac{v_{Cz} - v_{Bz}}{\sqrt{(v_{Cx} - v_{Bx})^2 + (v_{Cy} - v_{By})^2 + (v_{Cz} - v_{Bz})^2}} \end{array} \right\}.$$

这里是把一定焦距下的激光束焦点半径作为补偿半径。在大多数情况下,激光束与被切割工件表面保持垂直,因此投射到工件表面上的激光束光斑与激光束焦点大小差别很小。但由于三维工件形状的复杂性,为了避免激光头与三维工件碰撞或干涉,激光束与被切割面不能保持垂直的情况也会发生^[12],使得实际投射到工件表面上的光斑与激光束焦点大小差别较大,此时应以实际投射到工件表面上激光束光斑大小作为补偿半径为宜,该激光束光斑大小利用激光束入射角根据投影关系很容易求出。

4 激光头位姿确定

激光头位姿是指五轴三维切割激光束入射点位置和激光头姿态。激光束入射点位置的计算比较简单,可直接由激光束半径补偿后的切口边环离散得到。然而,在确定激光头姿态时,不仅要考虑切口边环,还要考虑与切口边环相连的被切割面。这是因为在激光切割过程中,为了最大限度地利用激光束能量来保证切割的精度和切口质量,要求激光束始终与工件的被切割面垂直^[13]。为此根据第2节中识别出的切口边环,找出与切口边环相连接的被切割三角面片,利用这些三角面片的法向量确定激光头姿态,也就是使激光束的方向和被切割三角面片的法线方向一致,这样就可切割过程中保证激光束始终与工件的被切割面垂直。在第2节提取的外

表面组 F 中去除如图2所示的三角面片组 F_0 。以后,与切口边环中的每个边连接的三角面片即为被切割的三角面片。

5 算法应用实例

本算法在 Windows XP 环境下利用 Visual C++ 和 OpenGL 实现。为验证本算法的可行性,以如图5所示的工件模型为对象,进行了五轴三维激光切割轨迹生成算法应用探讨。工件模型上有2个内切口特征和1个外切口特征,其中一个切口特

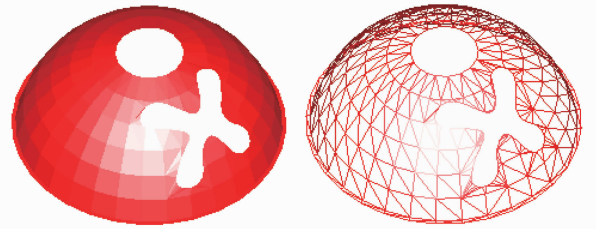


图5 工件模型

Fig. 5 Part model for test

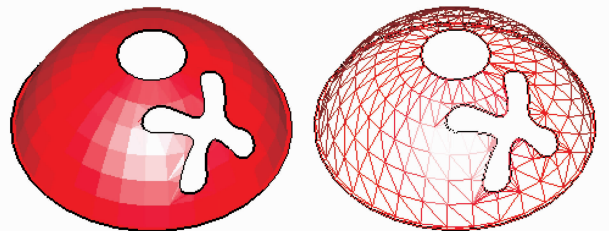


图6 切口边环

Fig. 6 Loop of incision edges

征是比较复杂的任意形状。如图 6 所示为自动识别出的 3 个切口边环;图 7 显示了根据输入的激光束半径将 3 个切口边环进行偏置而得到的激光束半径补偿后的切口边环;图 8 显示的是激光头沿着所生成的轨迹进行五轴三维激光切割的仿真过程。从应用实例和激光切割仿真过程中可以看出,提出的方法能够准确识别出切口特征,自动补偿激光束半径,并且激光头的姿态随工件切割路径上曲面的法线方向及时调整,始终与激光束入射点所在处的三角面片保持垂直,系统运行稳定可靠。

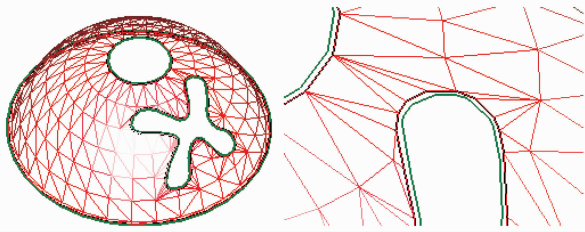


图 7 偏置后的边环

Fig.7 Offset loop of edges

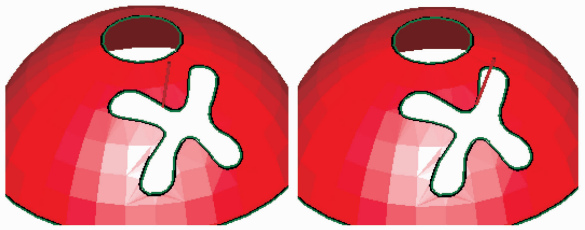


图 8 五轴激光切割仿真

Fig.8 Simulation of 5-axis laser cutting

6 结 论

研究开发了基于 STL 模型的五轴三维激光切割轨迹生成算法及其软件系统。该软件系统具有切口特征自动识别与选取、激光束半径自动补偿、实时自动调整激光头姿态使其与工件被切割表面垂直等功能,自动化程度高,能够减轻操作者劳动强度,提高工作效率,减少人为错误。由于采用了在激光加工行业应用广泛而又无需特定运行平台的 STL 数据模型,因此有利于该软件的推广和商用化。今后的研究工作中有必要进一步开展有关激光头与工件干涉检查及修正方面的研究。

参 考 文 献

1 Ji Lingfei, Yan Yinzhou, Bao Yong *et al.*. Research and consideration on laser cutting technique of ceramics [J]. *Chinese*

J. Lasers, 2008, **35**(11):1686~1692

季凌飞,闫胤洲,鲍 勇等. 陶瓷激光切割技术的研究现状与思考[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11):1686~1692

2 Xie Xiaozhu, Li Lijun, Wei Xin *et al.*. Evaporative front of laser cutting PMMA [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6):925~930

谢小柱,李力钧,魏 昕等. 有机玻璃激光气化切割前沿[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6):925~930

3 Chen Genyu, Huang Fengjie, Liu Xufei *et al.*. Application and research of three-dimensional laser cutting technology in auto-body panel manufacturing [J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(4):67~69

陈根余,黄丰杰,刘旭飞等. 三维激光切割技术在车身覆盖件制造中的应用与研究[J]. *激光杂志*, 2008, **29**(4):67~69

4 Zhang Yongqiang, Wu Yanhua, Chen Wuzhu *et al.*. Effect of laser beam attitude on 3D laser cutting quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):124~127

张永强,吴艳华,陈武柱等. 激光束姿态对三维激光切割质量的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):124~127

5 B. S. Yilbas. Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, **155**(30):2106~2115

6 Su Min, Shi Shihong, Hu Jin. Auto programming system for 3D laser processing based on PMAC [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(6):433~435

苏 敏,石世宏,胡 进. 基于 PMAC 的三维激光加工自动编程系统的研究[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(6):433~435

7 J. K. Kang, S. B. Yeom, B. S. Kang. Development of 5-axis CO₂ laser cutting machine and CAM [C]. *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, Seoul: 2006. 245~246

8 Chen Jimin, Bao Yong, Xiao Rongshi. Auto-programming system for 3D laser processing [J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(3):217~220

陈继民,鲍 勇,肖荣诗. 三维激光加工自动编程系统的研究[J]. *激光技术*, 2001, **25**(3):217~220

9 Chen Genyu, Cao Maolin, Huang Fengjie. Application and research of three-dimensional laser cutting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(3):38~42

陈根余,曹茂林,黄丰杰. 三维激光切割的应用和研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(3):38~42

10 Lin Mao. The application of Pentacut laser cutting software in die & mold manufacture [J]. *Die & Mould Manufacture*, 2006, **6**(7):61~63

林 茂. Pentacut 激光切割软件在模具制造中的应用[J]. *模具制造*, 2006, **6**(7):61~63

11 Ma Liang, Huang Weidong. Rapid slicing algorithm based on dynamic topological reconstruction for STL model [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10):1623~1626

马 良,黄卫东. 基于 STL 数据模型动态拓扑重构的快速切片算法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10):1623~1626

12 Chen Jimin, Zuo Tiechuan. Effect of laser beam incident angle on laser cutting quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11):1037~1040

陈继民,左铁钊. 激光切割中入射角对切割质量的影响[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(11):1037~1040

13 Chen Jimin, Zuo Tiechuan. The generation of 3-dimensional trace for 3D laser processing [J]. *Applied Laser*, 2001, **21**(1):1~3

陈继民,左铁钊. 三维激光加工的加工轨迹生成[J]. *应用激光*, 2001, **21**(1):1~3