

文章编号: 0258-7025(2010)06-1643-04

激光三维切割空间曲线的刀位点离散方法

汪 鏊¹ 胡关虎¹ 胡 俊¹ 罗敬文²

(¹ 上海交通大学机械与动力工程学院机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)
² 上海团结普瑞玛激光设备有限公司, 上海 200240)

摘要 针对空间曲面上的激光三维(3D)切割轨迹,提出了一种高效、快速的刀位点离散方法。根据空间轨迹曲线起始点的曲率,按照精度要求可以确定所选曲率圆的初始角度,从而根据几何知识即可确定初始步长。以初始步长为半径建立参考球,并将其与轨迹曲线求交即可获得初始刀位点。为了对刀位点进行优化以提高曲线离散的效率,通过比较弦高差采用二分法进行动态调整参考球半径,在满足精度要求下依次获得优化后的待加工轨迹刀位点。由此开发了激光三维切割自动编程软件,实现了轨迹提取,曲线快速离散以及刀位点法矢获得等功能,可用于激光三维切割加工。

关键词 激光技术;激光切割;自动编程;二分法;空间曲线

中图分类号 TG485 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103706.1643

A New Method to Obtain Discrete Cutting Points of Space Curve in Three-Dimensional Laser Cutting

Wang Liu¹ Hu Guanhu¹ Hu Jun¹ Luo Jingwen²

¹ *The State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China*
² *Shanghai Unity Prima Laser Machinery Co. Ltd. Company, Shanghai 200240, China*

Abstract For three-dimensional (3D) laser cutting profile in space surface, an optimized method to disperse cutting points is presented. By analyzing the curvature of starting point of the space curve, the initial step length can be determined according to precision. Then the intersection point of the reference ball founded by using the initial step length as the radius and the profile curve is the initial cutting point. Through adjusting the radius of the reference ball, the optimized discrete points can be obtained by using dichotomy according to chord length. An automatic programming software of 3D laser cutting is developed. The functions of track extraction, rapid dispersion of curves and normal vector calculation during the 3D laser cutting can be realized.

Key words laser technique; laser cutting; automatic programming; dichotomy; space curve

1 引 言

激光切割技术广泛应用于各类材料的加工中,可大大减少加工时间,降低加工成本,提高工件质量。近年来,为了满足立体工件切割的需要,激光切割技术也逐渐向三维(3D)切割方向发展。文献[1]主要介绍了激光平面切割自动编程的相关技术,但没有涉及到激光的三维切割。张永强等[2]研究了激光束姿态对三维激光切割质量的影响,但没有考虑

切割轨迹的影响。黄开金等[3]虽然研究了空间曲率对激光切割质量的影响,却仅仅适用于管材,不具有普遍的适用性。目前,汽车、航空航天等行业冲压件的裁边、开孔等加工需要采用三维激光切割工艺。三维激光切割机获取描述切割轨迹的空间曲线,通过离散化处理获得刀位点,在相邻刀位点之间通过直线插补实现切割加工控制。因此,激光加工空间轨迹的刀位点离散化方法直接关系到加工精度。

收稿日期:2009-10-23;收到修改稿日期:2009-10-30

基金项目:国家自然科学基金(50905112)和上海市科委科技特派员课题(09QT1404800)资助课题。

作者简介:汪 鏊(1984—),男,硕士研究生,主要从事计算机数控技术等方面的研究。E-mail:jacky_tt1360@yahoo.com.cn

导师简介:胡 俊(1975—),男,博士,副教授,主要从事计算机数控技术等方面的研究。E-mail:hujun@sytu.edu.cn

20 世纪 70 年代, Chaikin 等^[4,5] 引入了离散细分曲线的概念, 稍后 Catmull 等^[6] 提出了著名细分方法, 而 D. Doo 等^[7] 关于奇异点处行为的分析理论, 则标志着细分方法正式成为曲线曲面造型的一种手段。目前, CAD/CAM 等软件在解决曲面造型及重构等问题上都是通过采用 STL 文件格式中的三角网格划分来解决的, 这必然会涉及到曲线离散的问题^[8~10]。常用空间曲线离散化处理方法主要有等间隔法、等弦长法和等误差法^[11]。为避免等间隔法在大曲率处产生逼近误差过大的问题, 文献^[12] 预先判断曲线最大逼近误差, 并采用二分法动态调整步长的大小, 可减少直线逼近的冗余点数和高曲率处误差过大的问题, 但在高曲率处以及线段的端点处仍可能出现逼近线段过短的现象。为加快等误差法的运算速度, 文献^[13] 采用曲线两端点间的切矢量夹角近似地表示离散误差, 可提高运算速度, 但在曲率变化较大时仍会产生较大的逼近误差。王永军等^[14] 提出了一种利用直线段和圆弧逼近空间曲线的方法, 经过多次迭代可以获得符合精度要求的由直线和圆弧组成的空间曲线, 但该方法需要先人工将空间曲线分解, 增加了计算量, 也会产生人为误差。

针对描述激光加工轨迹的空间三维参数曲线, 本文提出了一种基于空间曲线曲率的预优化刀位点离散方法, 可以快速地生成激光三维加工的刀位点。

2 激光三维切割空间轨迹

激光三维切割的轨迹一般由 NURBS 曲线描述。NURBS 曲线即非均匀有理 B 样条曲线, 作为 STEP 标准中定义自由曲线的唯一表示方法, 能精确统一地表示标准解析曲线和自由曲线, 目前被广泛应用于曲线及曲线造型中。可表示为

$$P(t) = \begin{cases} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{cases} \quad (a < t < b) \quad (1)$$

由于 NURBS 曲线是正则的, 其弧长参数可表示为^[15]

$$s(t) = \int_{t_0}^t \left| \frac{dP}{dt} \right| dt, \quad (2)$$

其曲率为

$$k = \left| \frac{d^2 P}{ds^2}(t) \right|, \quad (3)$$

式中 t_0 为起始点坐标。

3 基于曲率的刀位点优化求解

3.1 刀位点离散基本方法

如图 1 所示曲线, 可以确定一个圆心为加工轨迹起点的球, 即参考球。其中 R 为参考球半径, r 为曲率半径, θ 为曲率圆角度。则可知参考球的半径即为离散步长, 根据参考球与工轨迹曲线的交点确定下一离散点, 并可依次类推直至曲线的终点。由于在区域 1 处, 曲线曲率大, 需要较多的离散点可以保证精度。而在区域 2 处则可以减少刀位点数量。可以根据曲线的曲率动态调整参考球的半径, 获得优化后的刀位点列。

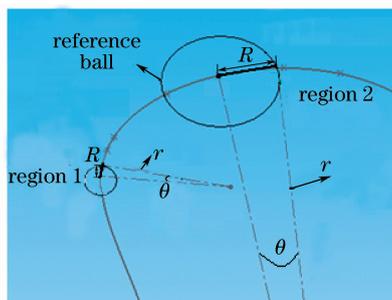


图 1 刀位点离散方法

Fig. 1 Way of scattering cutting points

对于 NURBS 曲线描述的加工轨迹, 首先通过 (3) 式确定曲率, 则曲率半径为 $r = 1/k$, 离散步长为

$$R = 2r \sin \theta, \quad (4)$$

式中 θ 表示相邻刀位点的曲率圆角度, 需要根据插值精度而定。

3.2 初始刀位点确定

采用一系列刀位点来近似表示空间曲线, 其插值精度为弦高差区间 (E_{\min}, E_{\max})。如图 2 所示, 可以得出相邻刀位点的曲率圆角度 θ 与弦高 H_p 的关系为

$$\theta = 2 \arccos \left(\frac{r - H_p}{r} \right), \quad (5)$$

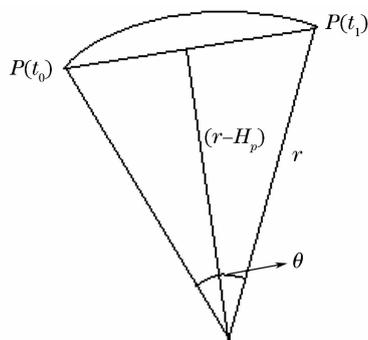


图 2 曲率圆角度优化

Fig. 2 Optimization for angle of curvature circle

取 $H_p = (E_{\min} + E_{\max})/2$, 可据此选定曲率圆角度 θ 。

由(3)式可获得初始点 t_0 处的曲率为 $\left| \frac{d^2 P}{ds^2}(t_0) \right|$ 。依据实际加工的精度要求, 确定弦高差 H_p 之后, 根据(4), (5)式可设定参考球半径 R , 进而建立起始点处参考球的参数方程

$$x^2(t-t_0) + y^2(t-t_0) + z^2(t-t_0) = R^2, \quad (6)$$

$$L = \sqrt{(\| \overrightarrow{P(t_0)P(t)} \|)^2 - \left(\frac{\| \overrightarrow{P(t_0)P(t_1)} \times \overrightarrow{P(t_0)P(t)} \|}{\| \overrightarrow{P(t_0)P(t_1)} \|} \right)^2}, \quad (7)$$

对 L 求导, 并令其为零, 即

$$\frac{dL}{dt} = 0. \quad (8)$$

图3中, L 为区间 (t_0, t_1) 间曲线 C 上任一点到弦的距离。

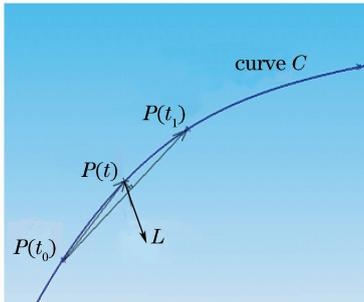


图3 刀位点优化求解模型

Fig. 3 Optimized model of cutting point

因此可获得空间参数曲线区间 (t_i, t_{i+1}) 到弦 $\overline{P(t_i)P(t_{i+1})}$ 的最大距离 H_{\max} 。将实际最大距离 H_{\max} 和允许弦高 H_p 之差与允许插值精度 $\delta = (E_{\max} - E_{\min})/2$ 进行比较:

1) 如果 $|H_{\max} - H_p| \leq \delta$, 说明刀位点精度符合要求。令参考球的半径 R 为原来的2倍, 代入上述计算过程重新求刀位点。若此次计算出的弦高差精度不符合要求, 则仍选用上一次计算的刀位点为 $P(t_1)$ 。若计算出的弦高差仍然符合精度要求, 则继续将参考球的半径 R 扩大2倍, 重新迭代计算, 直到超出精度要求时, 将最近一次计算的刀位点记为 $P(t_1)$ 。

2) 如果 $|H_{\max} - H_p| > \delta$, 表示该点的弦高差已经超出了精度要求。则令参考球的半径为原来的 $1/2$, 重新代入计算过程。若此时计算出的精度符合要求, 则记该交点为刀位点 $P(t_1)$ 。若此时计算出的精度仍不符合要求, 则继续令参考球的半径为 $1/2$, 进行下一步的验证计算, 直到所求刀位点符合弦高

联立(1)和(6)式, 可获得下一刀位点 P_1 , 对应的参数为 t_1 。

3.3 刀位点精度验证与优化求解

为确保离散精度符合要求, 需要对刀位点 P_1 进行精度验证。连接点 $P(t_0)$ 和 $P(t_1)$ 点, 则空间参数曲线 (t_0, t_1) 区间内任一点 $P(t)$ 到弦 $\overline{P(t_0)P(t_1)}$ 的距离为

差精度要求。

以 $P(t_1)$ 作为起点, 依照上述步骤以此求解下一个离散点, 直至曲线的终点, 即可获得完整的刀位点点列。

4 刀位点离散算法实现与验证

由于激光进行曲面三维切割时, 通过 $X/Y/Z$ 三轴直线运动和 B/Z 轴旋转运动进行5轴联动, 来保证激光入射角始终与工件表面垂直, 确保加工质量。所以, 在获得激光切割刀位点 (x, y, z, i, j, k) 的集合后, 通过坐标转换就可获得激光光路矢量的 (X, Y, Z, A, B, C) 集合。

选取如图4所示的钣金件零件的三维CAD模型, 对图中5条待加工轨迹求解刀位点, 得到如图5所示的刀位点及其对应的光路矢量。

图4中 a 代表激光头, b 代表待加工工件, c 代表需要加工的轨迹。

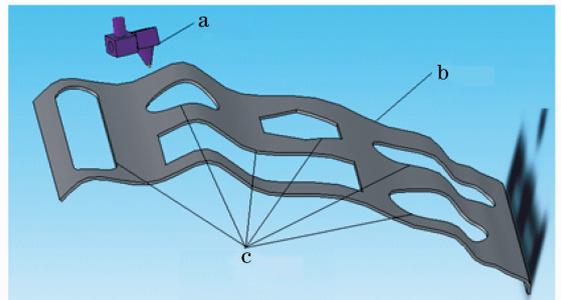


图4 激光三维切割零件模型

Fig. 4 Part model of 3D laser cutting

如图5所示, 该算法能有效获得激光三维加工轨迹的刀位点, 而且可以由CAD模型求解出刀位点的法向量, 可以保证在加工过程中激光入射角始终与工件表面垂直。该方法预先利用曲线起点曲率和精度要求得到离散初始步长, 然后根据精度进行依次验证选取, 计算效率高。

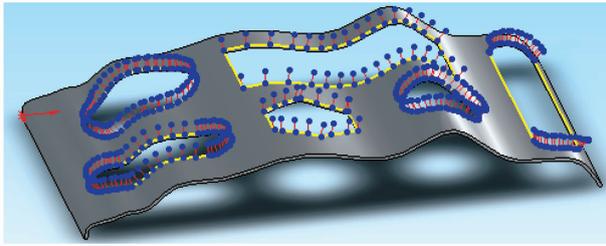


图 5 加工轨迹的刀位点序列

Fig. 5 Discrete cutting points of processing track

5 结 论

针对空间曲面上的激光三维切割轨迹,提出一种优化的刀位点离散方法。通过分析空间轨迹曲线起始点的曲率,按照精度要求确定初始步长,以初始步长为半径建立参考球与轨迹曲线求交可获得初始刀位点。通过比较弦高差采用二分法进行动态调整参考球半径,可获得优化后的待加工轨迹刀位点。该算法计算效率高,由此所开发的激光三维切割自动编程软件,可用于激光三维切割加工自动编程,具有较高的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Bao Yong, Wu Qiang, Wang Xibing *et al.*. Key technologies of auto programming for laser planar cutting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1):126~129
鲍勇,武强,王喜兵等. 激光平面切割自动编程的关键技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1):126~129
- 2 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
- 3 Huang Kaijin, Xie Changsheng, Xu Desheng. Effects of spatial curvature radius on the three-dimensional laser cutting quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(5):471~475
黄开金,谢长生,许德胜. 空间曲率半径对三维物体激光切割质量的影响[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(5):471~475
- 4 G. Chaikin. An algorithm for high speed curve generation [J]. *Computer Graphics & Image Processing*, 1974, **3**(4):346~

- 349
- 5 R. F. Rieseefeld. On Chaikin's algorithm [J]. *Computer Graphics & Image Processing*, 1975, **4**(3):304~310
- 6 E. Catmull, J. Clark. Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes [J]. *Computer-Aided Design*, 1978, **10**(6):350~355
- 7 D. Doo, M. Sabin. Behavior of recursive division surfaces near extraordinary points [J]. *Computer-Aided Design*, 1978, **10**(6):356~360
- 8 Piegl A. Leslie, Richard M. Arnaud. Tessellating trimmed NURBS surfaces [J]. *Computer-Aided Design*, 1995, **27**(1):16~26
- 9 X. Sheng, B. E. Hirsch. Triangulation of trimmed surfaces in parametric space [J]. *Computer-Aided Design*, 1992, **24**(8):437~444
- 10 Xu Song, Wang Jianying. Adaptive triangulation of curved surface [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2000, **12**(4):267~271
徐松,王剑英. 曲面的自适应三角网格剖分[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2000, **12**(4):267~271
- 11 Li Ketian, Chen Tongjian, Deng Detao. Principle of the line approach curves and application in cam manufacturing [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2002, (1):66~68
李克天,陈统坚,邓德涛. 直线逼近曲线的原理及在加工凸轮中的应用[J]. *机械设计与制造*, 2002, (1):66~68
- 12 Chen Hanjun, Liao Wenhe, Zhou Rurong. Approximating a random circle curve by air spline [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 1995, **27**(6):773~777
陈汉军,廖文和,周儒荣. 任意平面曲线的圆弧逼近方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 1995, **27**(6):773~777
- 13 Wu Zhongke, Jiao Haixing, Dai Guozhong. An algorithm of approximating linesegment and circular arcs and its application in vectorization of engineering drawings [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 1998, **10**(4):328~332
武仲科,焦海星,戴国忠. 一种线段和圆弧的逼近方法及其在工程图矢量化中的应用[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 1998, **10**(4):328~332
- 14 Wang Yongjun, Zhang Jinran, Xie Youjin *et al.*. A method for approximating space curve by lines and arcs [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2008, **27**(11):1361~1364
王永军,张尽染,谢友金等. 空间曲线的直线圆弧逼近算法研究[J]. *机械科学与技术*, 2008, **27**(11):1361~1364
- 15 Meng Daoji, Liang Ke. *Differential Geometry* [M]. Second edition. Beijing: Science Press, 2004
孟道驥,梁科. *微分几何*[M]. 第二版. 北京:科学出版社, 2004