

基于三轴线性插补的的裁剪跟随方法

吴献钢¹, 徐丽梅², 黄大贵¹

(1. 电子科技大学机械电子工程学院 成都 611731; 2. 电子科技大学空天科学技术研究院 成都 611731)

【摘要】针对多层自动裁床片式裁刀的运动控制,提出了一种新型的裁刀跟随算法,通过普通运动控制器的三轴线性插补功能来实现任意二维曲线的插补跟随。先将曲线按照精度要求离散为直线段,然后将裁片轨迹划分为若干直线组成的节段,以刀片围绕刀尖点的旋转运动实现节段内直线间的转接。该算法重点考虑刀具形状参数的影响,过剪量可控。误差分析和实验表明,该算法有效可行。与已有的技术相比,具有插补跟随精度高,实现成本低的特点。

关键词 三轴插补; 自动裁床; 数控裁剪机; 运动控制; 切向跟随

中图分类号 TP29

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.03.027

Tangential Following Method Based on 3-Axis Linear Interpolation

WU Xian-gang¹, XU Li-mei², and HUANG Da-gui¹

(1. School of Mechanical Electronic and Industrial Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract A new tangential following motion control method of knife blade is proposed for automatic fabric cutting. By this method, following interpolation algorithm of arbitrary 2D curves can be implemented by ordinary motion controllers with a 3-axis linear interpolation function. After curves are discretized into broken lines according to required precision, each cutting piece contour can be divided into a number of segments composing of several lines. And transition between lines in the same segment is realized by rotating knife blade around tool nose. Error analysis and experiments showed that this method, with cutter compensation and adjustable overcutting, is effective and practicable. Compared with existing technology, it provides higher precision and lower cost.

Key words 3-axis interpolation; automatic cutting table; CNC cutting machine; motion control; tangent following

自动裁床又称电脑裁床或数控裁床,被广泛用于服装行业、皮革制品行业、纺织工业的裁切加工^[1]。对于其中的多层裁剪(中、高层裁剪)应用场合,通常利用机械式的片状裁刀做高速的往复运动来实现,在加工过程中需要保证刀刃角度和裁剪的运动方向一致,也就是进行裁刀跟随运动。

针对这一问题,已有许多机构和个人做出了大量研究工作。文献[2]阐述了关于直线和圆弧的切向跟随算法;文献[3]针对裁刀在多层裁切过程中的受力变形问题,提出了基于模糊控制的裁刀变形矫正方法;文献[4]提出了Nurbs曲线的切向跟随插补方法以及裁刀半径补偿的方法;文献[5]中除了直线、圆弧、Nurbs曲线之外,还推导了椭圆的切向跟随插补算法。文献[3]的重点在于裁刀受力变形的测量和补偿,以解决上层和底层裁片上下尺寸不均匀的问题,

并未涉及裁刀的跟随或轨迹插补的算法;文献[2,4-5]涉及了直线、圆弧、椭圆、Nurbs曲线等各种具体轨迹的裁刀跟随和插补算法,尤其在曲线类轨迹的插补跟随方面,它们都是将目标曲线作为刀具回转中心(刀心)的移动轨迹来控制,当刀具尺寸与曲率半径相比较小时,会出现较大的原理性误差。对于这个问题,文献[5]提出了直刀冲裁的方法来解决内凹曲线的过切问题,但是这种方法属于连续切削,效率较低。文献[6]提出了自适应弓高误差直线段逼近插补内凹圆弧的裁切算法来解决该问题,但对于直线段之间的转接未做专门处理,由此造成的误差也没做分析和评价。

另外,国内外一些厂商研发的中高档运动控制器产品也具有曲线切向跟随硬件插补功能,可以用于控制裁刀保持与前进方向一致。如英国Trio公司的

MC206X、MC464等多轴运动控制器^[7], 美国Galil公司的DMC系列运动控制卡^[8], 台湾研华公司的PCI-1245、PCI-1265等运动控制卡^[9], 以及香港固高公司的GE系列连续轨迹运动控制器^[10]等。这些通用的配合两轴硬件曲线插补的切向跟随功能同样没有考虑刀心与裁切点不重合的情形, 而多数低成本的多轴运动控制器并不具备椭圆、抛物线、样条曲线等硬件插补功能, 更不具备相关的硬件跟随功能。

针对上述问题, 本文提出“以直代曲”的策略, 着重考虑刀尖点回转半径的影响, 以较简单经济的方式实现裁刀转角的跟随运动: 用三轴直线插补功能实现刀角跟随功能, 简化曲线插补的种类, 使用统一的方法进行运算和控制。

1 数据处理

通常裁床加工数据来源于上游的CAD软件或排版软件, 裁切的数据文件由若干的裁片构成, 每个裁片又由若干的直线、圆弧、或者其他曲线首尾相接构成。

1.1 以直代曲

对数据文件中的几何元素进行处理: 保留直线, 而对曲线进行线性逼近, 将圆弧、椭圆、nurbs等曲线离散化为多个直线段。相关逼近算法在文献[6,11-12]中都有讨论, 本文不再赘述。裁片由此转变成若干折线组合成的封闭多边形, 不必再考虑某一种曲线的硬件插补以及曲线与直线转接、曲线与曲线转接等问题, 所有的后续处理都统一归结为直线插补和直线的相交转接问题。

1.2 片内分段

多层裁切使用的上下往复型片状裁刀在实际切割材料的过程中, 刀刃方向要始终刀具前进的方向保持一致(切向跟随), 如果裁切轨迹中有较尖锐的棱角情况下, 工艺上往往需要提刀偏转后再下刀继续裁切, 因为裁刀切入材料后进行大转角偏转容易损坏刀具或者裁片。故此, 转角是否尖锐需根据工艺参数“提刀转角” C_{max} 进行判别。

$$d\beta = \begin{cases} \beta_{i+1} - \beta_i & -\pi \leq \beta_{i+1} - \beta_i \leq \pi \\ -2\pi + \beta_{i+1} - \beta_i & \beta_{i+1} - \beta_i > \pi \\ 2\pi + \beta_{i+1} - \beta_i & \beta_{i+1} - \beta_i < -\pi \end{cases} \quad (1)$$

$$|d\beta| > C_{max} \quad (2)$$

如图1所示, 任意相邻线段AB和BC的倾角设为 β_i 和 β_{i+1} , 则按照式(1)可以计算在 $(-\pi, \pi)$ 之间的转角 $d\beta$, 进而由式(2)是否满足来判断B点的转角是否尖锐, 来决定是否需要抬刀偏转。

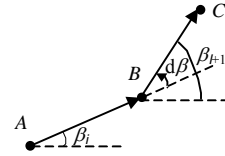


图1 裁刀转角计算示意图

由此在每个裁片内逐点判断, 可根据是否需要抬刀偏转来对每个裁片进行分段, 把裁片中能够连续切削的若干直线段划分为一个“节段”, 每个裁片由若干节段组成, 在每个节段的开始处下刀, 每个节段的结束位置提刀。节段内部为若干直线段, 裁刀连续切削。

1.3 过剪计算

通常每个裁片都是一个独立的封闭图形, 内部的每个节段的首尾都需要抬刀落刀, 为了保证裁片裁切后能够保持必要的棱角以及脱料时不粘连, 需要在抬刀和下刀的位置额外多剪切一小段长度, 也就是要求裁切的时候必须保证“过剪量”。在考虑刀具自身的形状尺寸之后, 可以由目标轨迹推导出过剪处的刀心位置。

假设刀具的自身回转中心为T, 刀尖回转半径以R表示, 刀背回转半径则为 L_T , 切入和切出过剪量分别为 L_{in} , L_{out} 。

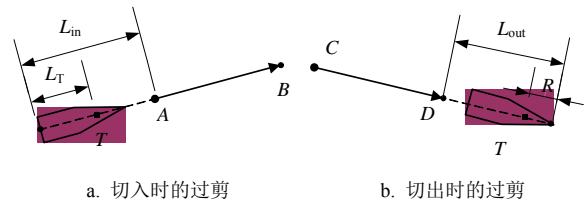


图2 过剪示意图

如图2所示, 落刀切入直线段AB时, 计算得刀心 $T(x_T, y_T)$ 位置为:

$$\begin{cases} x_T = x_A - (L_{in} - L_T) \frac{x_B - x_A}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}} \\ y_T = y_A - (L_{in} - L_T) \frac{y_B - y_A}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}} \end{cases} \quad (3)$$

同理, 沿线段CD切出, 抬刀之前的刀心位置为:

$$\begin{cases} x_T = x_D + (L_{out} - R) \frac{x_D - x_C}{\sqrt{(x_D - x_C)^2 + (y_D - y_C)^2}} \\ y_T = y_D + (L_{out} - R) \frac{y_D - y_C}{\sqrt{(x_D - x_C)^2 + (y_D - y_C)^2}} \end{cases} \quad (4)$$

2 段内直线转接算法及误差分析

2.1 段内直线转接算法

与前文述及的其他跟随算法相比, 本文算法的

关键不同在于刀具在转接点处是围绕刀尖，也就是切削点进行旋转，原理上的精度更高。如图3a所示，直线段 P_0P_1 和 P_1P_2 为切片某“节段”内的两个相邻边，刀具从 P_0 位置开始下刀切割，当刀尖切割至前一直线段的段末 P_1 后，刀具围绕刀尖点 P_1 位置做旋转运动至下一直线 P_1P_2 的起始角度，然后继续切割。由于刀尖并非刀具回转的机械中心轴，因此绕刀尖点 A 所做的旋转运动必须由刀具的 XY 平动和绕刀心 T 的回转运动(C 坐标)来合成。为了实现刀心 T 绕刀尖 A 的旋转运动，将 A 点的圆弧轨迹以弦线来逼近，按照等圆心角 θ 离散化等节点 $T_1, T_2, \dots, T_{n-1}, T_n, \dots, T_N$ 。如图3b所示，刀心 T 在沿着弦线 $T_{n-1}T_n$ 做直线插补运动的同时，刀具绕自身刀心均匀旋转，这样可以保证刀尖 A 一直指向 P_1 点。基于上述分析， XYC 的三轴线性(直线)插补完全可以进行上述运动。

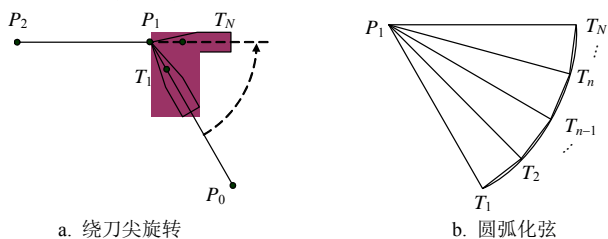


图3 直线转接示意图

2.2 段内直线转接的误差分析

按照上述方法进行 XYC 三轴线性插补时，刀心 T 沿弦线 $T_{n-1}T_n$ 前进同时，刀尖 A 围绕刀心 T 均匀旋转，由于刀具回转半径 R 固定，刀尖 A 将会超出 P_1 位置，划出一个花瓣形的封闭曲线，该区域的大小即表征了前述方法的主要误差大小。

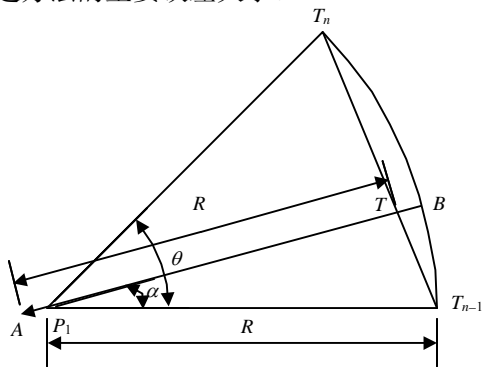


图4 直线转接的误差成因示意图

为了进一步精确描述误差的范围，如图4所示，已知弦 $T_{n-1}T_n$ 对应的圆心角为 θ ，刀具半径为 R ，有：

$$P_1T_{n-1} = P_1T_n = P_1B = TA = R$$

当刀尖矢量 TA 旋转到角度 α 时，假设线段 $T_{n-1}T$ 长度为 M ，线段 PT 长度为 L ，有：

$$\begin{cases} L \sin \alpha = M \sin \left(\frac{\pi - \theta}{2} \right) \\ L \cos \alpha + M \cos \left(\frac{\pi - \theta}{2} \right) = R \end{cases}$$

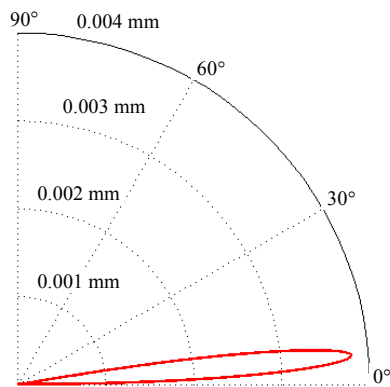
解得：

$$M = \frac{L \sin \alpha}{\sin \left(\frac{\pi - \theta}{2} \right)}, \quad L = \frac{R}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\tan \left(\frac{\pi - \theta}{2} \right)}}$$

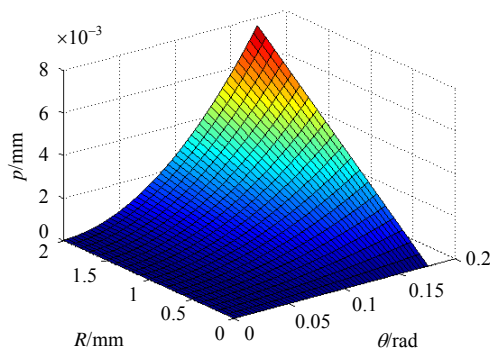
设刀尖点超出圆心距离 AP_1 为极半径 ρ ，可得误差变化的极坐标为：

$$\rho(\alpha) = R - \frac{R}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\tan \left(\frac{\pi - \theta}{2} \right)}} \quad 0 \leq \alpha < \theta \quad (5)$$

不失一般性，取 $R=1 \text{ mm}$ ， $\theta=10^\circ$ ，可以做出上述方程的曲线图像，如图5a所示。



a. 误差曲线



b. 最大误差影响因素分析

图5 直线转接的误差分析

从式(5)可以化简为：

$$\rho(\alpha) = R - R \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{\cos \left(\alpha - \frac{\theta}{2} \right)} \quad 0 \leq \alpha \leq \theta \quad (6)$$

分析 $\rho(\alpha)$ 的最大值和最小值。由于 $0 \leq \alpha \leq \theta$ ，

则有 $-\frac{\theta}{2} \leq \alpha - \frac{\theta}{2} \leq \frac{\theta}{2}$, 所以得到 $\cos \frac{\theta}{2} \leq \cos\left(\alpha - \frac{\theta}{2}\right) \leq 1$ 。据此, 从式(6)可以推导得到: 当 $\alpha = 0, \theta$ 时, $\rho(\alpha)$ 取得最小值 $\rho_{\min} = 0$; 当 $\alpha = \frac{\theta}{2}$ 时, $\rho(\alpha)$ 取得最大值。因此有:

$$\rho_{\max} = R - R \cos \frac{\theta}{2} \quad (7)$$

根据式(7)做出最大误差影响因素的三维网格如图5b所示, 半径 R 越大, 最大误差 ρ_{\max} 越大, 分度的圆心角 θ 越大, 最大误差 ρ_{\max} 越大。一般实际应用中, 刀尖回转半径 R 不会超过 2 mm, 取 $\theta = 10^\circ$ 时, 有 $\rho_{\max} \approx 0.0019$ mm, 相对于一般裁切的尺寸精度要求 ± 0.25 mm 或者 ± 0.5 mm, 可以忽略。

3 实验与分析

本文的实验裁床是在一台旧的国外裁床基础上进行改造得到的实验样机, 保留了裁头和其他主要机械结构, 电气控制部分则更换为自主设计集成的部件。进给系统采用欧姆龙的交流伺服系统进行驱动: X轴为R7M-AP75030电机和R7D-AP08H驱动器, Y轴为R7M-AP40030电机和R7D-AP04H驱动器, C轴是R7M-AP20030电机和R7D-AP02H驱动器。控制系统则选用了固高GE-300-SG运动控制卡和工控机来实现, 通过自主编写的控制软件控制裁切过程。选用段间交接分度角5度, 实测刀尖回转半径 $R = 1$ mm。

图6是在实验裁床上裁剪的3个皮革裁片的实物照片, 可以看出, 裁片尖角的部位棱角分明, 同时连续的曲线部分也很平滑, 实测裁片的尺寸精度基本在 1 mm 以内, 充分说明了上述方法的可行性与有效性。裁片A的边缘为标准圆弧和直线段的组合, 可以观察到弧线部分光滑连续, 圆弧与直线连接的部位以及直线之间连接的部位保持了明显的棱角。裁片B和C的边界则主要是非圆曲线, 同样可以观察到这些曲线的光滑和连续。裁片B在左右两个尖角位置可以观察到有少量絮状纤维残留的现象, 这可能是由于在多层裁切和刀具自动刃磨的过程中刀刃磨损不均匀, 当切入切出的过切量选择不合理时, 导致部分片层的裁片脱料不够彻底, 发生粘连造成的。裁片C中可以观察到内凹曲线左右不对称的现象, 这很可能是由于皮鞋裁片的本身尺寸小, 曲率半径也偏小, 而实验机床的裁刀为服装裁剪的裁刀, 其尺寸较大, 特别是刀尾的回转半径较大(4 mm左右),

当裁刀依照逆时针切割内凹曲线时, 裁刀尾部对皮革材料不均匀挤压所导致, 可考虑选用或者设计刀刃尺寸更小的裁刀来解决此问题。



a. 裁片A



b. 裁片B



c. 裁片C

图6 试切裁片实物照片

4 结论

针对裁刀插补的跟随算法的特殊性, 本文提出了一种能够在普通三轴运动控制器上实施的裁刀跟随方法, 可以依靠最常见的三轴直线插补功能完成裁切运动。按照以直代曲的思路将裁切轨迹按照精度要求离散成直线段, 并且根据工艺要求的提刀角度将每个裁片的轨迹划分为若干节段; 在节段的首尾位置抬刀和下刀, 保证一定切入和切出的过切量; 每个节段内部连续裁切, 节段内部的直线段之间围绕裁刀的刀尖位置做旋转运动以完成直线段之间的转接; 进而进行了直线转接的原理误差分析和试切实验。结果表明, 该方法能很好地保证裁片的尖角部位和圆滑部位的形位精度, 在旧机床改造的实际实验机床上能够 1 mm 以内的尺寸精度, 具有较好的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 季国顺. 皮革数控高速裁剪运动控制技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
JI Guo-shun. Study on kinetic control technologies for high speed CNC leather cutting[D]. Hangzhou: Zhejiang

- University, 2007.
- [2] 徐新平, 李文斌. 正切控制算法研究[J]. 机械工程与自动化, 2008, 43(4): 139-141.
XU Xin-ping, LI Wen-bin. Research on tangent interpolating algorithm[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2008, 43(4): 139-141.
- [3] 赵豁峰, 裴仁清, 华尔天, 等. 裁剪机裁刀的控制[J]. 机电一体化, 2005, 20(5): 55-57.
ZHAO Huo-feng, PEI Ren-qing, HUA Er-tian, et al. Control of cutting shear knife[J]. Mechatronics, 2005, 20(5): 55-57.
- [4] 赵燕伟, 田先斌, 杨帆, 等. 数控皮革裁剪的NURBS曲线切向跟随插补方法[J]. 制造业自动化, 2009, 31(4): 80-84.
ZHAO Yan-wei, TIAN Xian-bin, YANG Fan, et al. Tangent following interpolation method of NURBS curve in CNC leather cutting machine tool[J]. Manufacturing Automation, 2009, 31(4): 80-84.
- [5] 田先斌. 面向数控皮革裁剪的切向跟随控制研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
TIAN Xian-bin. Research of tangent interpolation in CNC leather-cutting[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009.
- [6] 赵燕伟, 卢东, 杨帆, 等. 面向内凹小圆弧数控裁剪方法研究[J]. 机械制造, 2010, 48(1): 16-18.
ZHAO Yan-wei, LU Dong, YANG Fan, et al. Research on cutting method of small concave ARC in CNC leather cutting machine tool[J]. Machinery, 2010, 48(1): 16-18.
- [7] Trio Motion Technology Ltd. Tangential axis control[EB/OL]. [2013-02-30]. <http://www.triomotion.com/tmt2/sitefiles/examples/tangent.asp>.
- [8] Galil Motion Control Inc. Galil controllers[EB/OL]. [2007-10-30]. <http://www.galilmc.com/catalog/contrgendesc.pdf>.
- [9] 研华股份有限公司. 研华设备自动化全系列解决方案[EB/OL]. [2012-01-04]. <http://www.advantech.com.tw/catalogs/pdf/2012/01201530.pdf>.
Advantech Co., Ltd. Advantech machine automation solutions[EB/OL]. [2012-01-04]. <http://www.advantech.com.tw/catalogs/pdf/2012/01201530.pdf>.
- [10] 固高科技(香港)有限公司. GE系列多轴连续轨迹运动控制器[EB/OL]. [2009-04-30]. <http://googoltech.com.hk/uploads/catalog/868/GE%202.pdf>.
Googol Technology (HK) Limited. GE series multi-axes motion continuous path controller[EB/OL]. [2009-04-30]. <http://googoltech.com.hk/uploads/catalog/868/GE%202.pdf>.
- [11] 周杨, 刘瑛. 数控加工中非圆曲线离散方法的误差分析[J]. 机械研究与应用, 2012, 27(4): 57-56.
ZHOU Yang, LIU Ying. Error analysis for the non-circular curve discretization method in CNC machining[J]. Mechanical Research & Application, 2012, 27(4): 57-56.
- [12] 吴宝海, 王尚锦. 三维参数曲线的离散算法[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(11): 1363-1365.
WU Bao-hai, WANG Shang-jin. An algorithm for the discretization of 3D parametric curves[J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(11): 1363-1365.

编辑 黄 莘