

文章编号: 1000-582X(2012)12-027-07

工业 CT 切片图像直接生成粗加工数控代码

段黎明^{1a,1b}, 郭 琰^{1b,1c}, 陈 中^{1b,1c}, 陈晓丽²

(1. 重庆大学 a. 光电技术及系统教育部重点实验室, b. ICT 研究中心; c. 机械工程学院, 重庆 400044;
2. 西南石油大学研究生院, 四川成都 610500)

摘 要: 对于可直接仿形加工的产品, 提出了一种由产品工业 CT 切片图像直接生成粗加工数控代码的方法。首先对工业 CT 切片图像进行阈值分割、边缘提取、轮廓跟踪获取产品的轮廓数据; 然后进行内外轮廓判定, 并据此将各个轮廓向内或向外偏移, 以进行刀具半径补偿和加工余量预留; 最后逐层划分加工区域得到粗加工刀具路径并有序连接, 生成粗加工数控代码。在轮廓偏移步骤, 提出了新的判定内外轮廓的方法。开发了软件系统, 最后以实际应用案例验证了方法的有效性与实用性。

关键词: 逆向工程; 计算机断层成像; 切片图像; 刀具路径; 数控指令

中图分类号: TH164; TP391.7

文献标志码: A

Direct generation of rough cut numerical control code from industrial CT slice images

DUAN Liming^{1a,1b}, GUO Yan^{1b,1c}, CHEN Zhong^{1b,1c}, CHEN Xiaoli²

(1. a. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education;
b. ICT Research Center; c. College of Mechanical Engineering, Chongqing University,
Chongqing 400044, China; 2. Graduate school of Swpu, Chengdu 610500, Sichuan, China)

Abstract: This paper proposes a new method of generating a rough cut Numerical Control (NC) codes directly from industrial computerized tomography (CT) slice images for the products which work-piece did not need to be redesigned. The contour structure data of the work-piece are obtained by the threshold segmentation, edge extraction and contour tracing. The inner and outer contours are judged, and the tool radius compensation and the allowance reservation are performed by offsetting the contours according to the judgments. The authors generate the rough cut NC code cut area distinguishing and rough cut path generating in a slice by slice manner. In contour offsetting step, a new approach is proposed to judge inner and outer contours. A software system is developed to generate NC codes. An example is used to verify this approach and results show the feasibility and validity of the approach.

Key words: reverse engineering; computerized tomography; slice images; tool path; numerical control instruction

收稿日期: 2012-07-04

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2006AA04Z104), 重庆市科技攻关项目(CSTC2009AC3047)

作者简介: 段黎明(1964-), 男, 重庆大学教授、博士生导师, 主要方向为工业 CT 技术及应用、逆向设计、制造自动化,
(E-mail)duanliming163@163.com。

逆向工程一般包括以下步骤:第一,得到测量数据;第二,CAD 模型重构;第三,改进设计;第四,进行生产加工。其中第二步的 CAD 模型重构非常费时,且建模时对测量数据进行近似逼近的过程还会引起原始数据形状的扭曲^[1-2]。在实际应用中存在大量无需改进设计而可直接仿制其外形的产品,这些产品在经扫描测量获得数据后,原则上不需要 CAD 建模,即可直接生成产品数字控制(numerical control,NC)代码,然后进行生产加工,以达到尽快仿制的目的。

当产品的加工质量要求较高时,加工过程一般可分为粗加工阶段和精加工阶段。粗加工阶段的主要任务是切除毛坯上的大部分加工余量,使毛坯在形状和尺寸上接近产品成品,是精加工的基础。

目前,由测量数据直接生成 NC 代码的研究比较少,按照测量数据种类的不同可分为 3 种:①基于三坐标测量数据的研究,文献[3]通过构造 Z-map 模型,记录每个切削层与 Z-map 模型的交点信息,由此判断加工区域与非加工区域,并生成粗加工刀具路径;文献[4]提出了改进的 Z-map 模型,解决了传统 Z-map 模型在曲率较大处精度太低的问题;文献[5]研究了 Z-map 模型下,使用圆刃铣刀螺旋铣削加工的方法及其精度;文献[6]通过将测量数据纵向分层构造了 PSC 模型,利用文献[7]提出的边界提取法得到每层的轮廓线并确定加工区域,再利用 PWD 算法得到粗加工刀具路径;文献[8]构建了投影 CL 网格,通过最小化每个 CL 网格内的加工误差来建立更优化的 CL 节点位置,最后根据相关节点的加权平均值得到 CL 点;文献[9]将散乱数据点云向 XY 平面投影,依据加工误差和残留高度划分和优化刀位网络单元,最终生成数控加工刀具路径。②基于数码相机等拍摄的单张二维图像的研究,文献[10]采用链码跟踪的方法得到图像边缘轮廓,并用 SFS 方法获得图像三维形状信息,再通过适应性包容盒算法得到产品的矢量化模型,最后生成 NC 代码;文献[11]研究了字画的数控雕刻加工,首先将字画转换为点阵格式的图像文件并将其矢量化,然后通过代码生成模块自动生成数控雕刻加工代码;文献[12]针对雕刻加工,提出了一种一步多点的数控加工方法,提高了加工效率。③基于工业计算机断层成像(computerized tomography,CT)切片图像数据的研究,文献[13]提出一种直接生成 NC 代码的方法,首先提取每层切片的轮廓数据并用 B 样条曲线进行拟合,然后应用文献[14]的方法矢量化轮廓曲线并进行加工区域判断和刀具路径规划,得

到 NC 代码。针对需要粗加工和精加工的情况,由工业 CT 切片图像直接生成加工数控代码的方法研究还未见报道。

针对无需重新设计而直接仿形的产品,根据粗加工与工业 CT 切片图像的特点与精度,将层间距作为吃刀深度,应用平头铣刀逐层铣削的加工方式,首先对产品的每层切片图像提取轮廓,然后直接对轮廓点进行处理,对每层切片求二维平面内的加工路径,最后连接各层并生成粗加工数控代码。

1 总体思路

工业 CT 是基于射线束穿透被测物体进行断层扫描,能在无损条件下以二维剖面的形式,准确地展示物体内外结构,实现物体内外结构的同时测量,不受被测物体内外结构复杂程度影响。凡是不会因射线照射而发生变质,都可以通过工业 CT 扫描的方式得到其切片图像。

首先对切片图像进行阈值分割、边缘提取和轮廓跟踪得到产品边界轮廓;接下来进行内外轮廓判定,并且根据判定结果对轮廓进行偏移,来实现刀具半径补偿和粗加工余量预留;然后划分加工区域,生成各层的刀具路径;最后连接各层的刀具路径并生成粗加工 NC 代码文件。总体思路如图 1 所示。

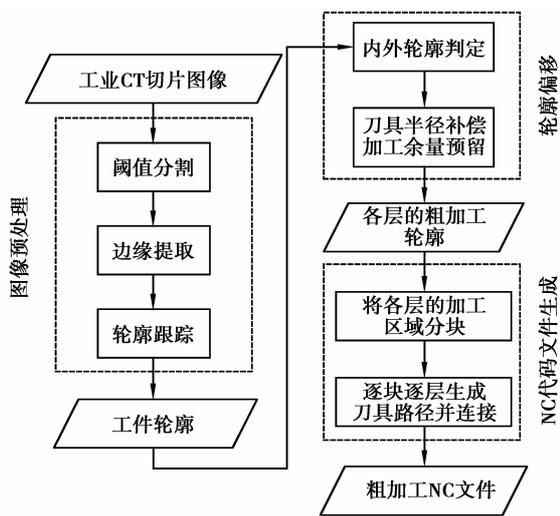


图 1 总体思路

2 图像预处理

对产品的工业 CT 切片图像进行预处理,得到产品轮廓数据,这是直接生成 NC 代码的前提。

2.1 阈值分割

利用改进的 CV 算法^[14]对切片图像进行轮廓提取,由于 CV 算法是通过能量收缩的方式将图像的

前景和背景区分开来,得到二值化的图像,所以它既是一个轮廓提取的过程,也可以看做是一个阈值分割的过程。图 2(a)为使用 CV 算法对一张图像处理的结果。在图 2(a)中,白点代表加工区域,即要从毛坯上切掉的部分,而黑点代表非加工区域。

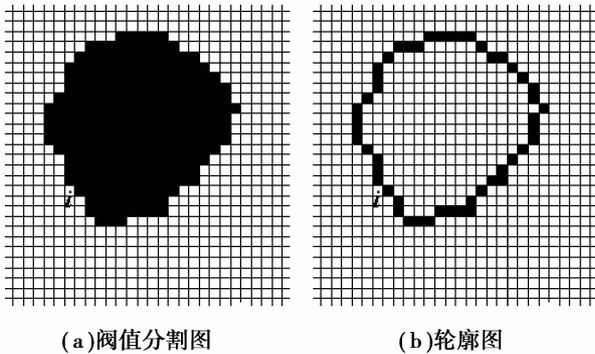


图 2 阈值分割图与轮廓图

2.2 边缘提取、轮廓跟踪

对阈值分割后的图像,采用文献[15]的方法提取图像轮廓边缘,然后对边缘进行去噪和细化,得到无噪声、单像素边缘、封闭的轮廓数据,最后通过轮廓跟踪得到所有层的轮廓点信息。如图 2(b)所示,其中黑点代表轮廓点,白点代表非轮廓点。

3 轮廓数据处理

逐层对轮廓数据进行处理。针对本层切片的各个轮廓进行内外轮廓判定,根据判定结果对轮廓向内或向外偏移,以实现刀具半径补偿和加工余量预留。

3.1 内外轮廓判定方法

可分为两步。首先为各个轮廓点设置一个标识位 flag1,其中 flag1 为 1 表示该轮廓点是一段加工区域的起始点,而 flag1 为 0 表示该轮廓点是一段加工区域的终点;然后通过一个轮廓点的 flag1 来判断该轮廓是内轮廓还是外轮廓。

3.1.1 设置各轮廓点的 flag1

按列来处理一层的所有轮廓点,在各列中判断加工区域。所有轮廓点 flag1 的初始值都为 0,通过下面 4 步的处理,本列剩下偶数个轮廓点来表示该列的若干段加工区域,其 flag1 呈“1010…”规律变化,而每对“10”点之间的部分是要加工的区域,其中“1”点的 y 坐标小于“0”点的 y 坐标。

步骤 1 按列划分轮廓点。

对于每一层切片,本文采用的是逐列的双向铣削的加工方式,所以要从列的角度来处理本层切片

的所有轮廓点。将 x 坐标相同的轮廓点划分到一列,以向量形式建立本层切片的列数据结构 R_i ,其中 i 表示第 i 列。由于 CT 扫描视场大于产品尺寸,那么所有切片图像最上面一行和最下面一行的点必定为加工区域的边界点,将其作为轮廓点分别添加到各列 R_i 的起始和结束位置,此时每一列的轮廓点数都大于等于 2。

图 3(a)为图 2(a) 阈值分割图中的第 i 列;(b)图为图 2(b)轮廓图中的第 i 列, $P_{10} \sim P_{15}$ 为本列的轮廓点,存储在列结构 R_i 中;(c)图中,添加了本列最上面和最下面的点,更新了 R_i 。

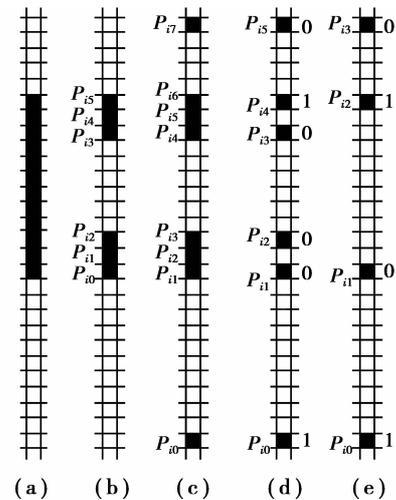


图 3 设置各轮廓点的 flag1

步骤 2 处理同一列中 3 个以上的连续轮廓点。

对于一列中有 3 个以上连续轮廓点的情况,没有必要逐点进行判断,只保留连续轮廓点的两 endpoint,即可确定加工区域的位置,这样并不丢失有用的信息。

如图 3(d)所示, $P_{11} P_{12} P_{13}$ 与 $P_{14} P_{15} P_{16}$ 分别是连续的轮廓点,删除 $P_{12} P_{15}$ 只保留连续轮廓的 endpoint 即可。

步骤 3 设置各轮廓点的 flag1。

将当前的轮廓点对应到阈值分割图像中,在阈值分割图像中判断对应列的逐对轮廓点之间是否为加工区域,以此来设置轮廓点的 flag1。

理想情况下,若两轮廓点之间全为白点,则表示这两轮廓点之间为加工区域;反之若两轮廓点之间全为黑点,则为非加工区域。但是实际的边界提取算法提取出来的轮廓与实际轮廓总会存在一些误差,因此有可能在加工区域存在少数黑点,也有可能非加工区域存在少数白点,文中按照占多数的点

的类型来进行判断。若两相邻轮廓点之间,白点数大于黑点数,则认为两点之间为加工区域,将第一个点的 flag1 设置为 1;反之将第一个点的 flag1 设置为 0;每列的最后一个轮廓点必为本列最后一个加工区域的终点,所以其 flag1 必为 0,不用再进行设置。

将图 3(d)中的轮廓点对应到图 3(a)中,在图 3(a)中, P_{i0} 到 P_{i1} 之间、 P_{i4} 到 P_{i5} 之间对应的为白点,即加工区域,则将两段区域的起始点 P_{i0} 和 P_{i4} 的 flag1 设为 1;同理,在图 3(a)中, P_{i1} 到 P_{i2} 之间、 P_{i2} 到 P_{i3} 之间、 P_{i3} 到 P_{i4} 之间为黑点,即非加工区域,则将这 3 段区域的起始点 P_{i1} 、 P_{i2} 、 P_{i3} 的 flag1 设置为 0。本步骤后,本列 R_i 的各轮廓点及其 flag1 如图 3(d)所示。

步骤 4 修正轮廓点 flag1。

按照产生原因来划分,可归纳为以下三种情况,使得轮廓点的 flag1 不能呈“1010...”规律变化,接下来按照将连续边界认定为非加工区域的原则分别对这 3 种情况进行修正。

如图 4 中的各图所示,每幅图中,左图所示的为本列的轮廓图;右图所示的为阈值分割图中对应的列。

①“11”情况。

当存在 2 个连续的加工区域时,如图 4(a)所示,按照步骤三的方法进行设置,左图中的第 1 个轮廓点和第 2 个轮廓点之间的部分对应于阈值分割图像中为白点,则将第 1 个轮廓点的 flag1 设置为 1。同理第 2 个轮廓点的 flag1 设置为 1。此列 3 个轮廓点的 flag1 分别为 110,出现了“11”的情况,此时可以不考虑第 2 个轮廓点,即把两个连续的加工区域连成一个。

②“00”情况。

当一个非加工区域的上轮廓或下轮廓为连续轮廓点时,如图 4(b)、(c),同理按照步骤三的方法进行设置,5 个轮廓点的 flag1 分别为 10010,出现了“00”的情况,此时可以不考虑第 3 个轮廓点,即把连续的边界与非加工区域连在一起。

③“000”情况。

如图 3 所示当一个非加工区域的上下轮廓均为连续轮廓点时,或者如图 4(d)所示当一个两个非加工区域之间为一段连续轮廓点时,同理按照步骤三的方法进行设置,6 个轮廓点的 flag1 分别为 100010,出现了“000”的情况,此时可以不考虑第 3 和第 4 个轮廓点,即把连续的边界与非加工区域连在一起。

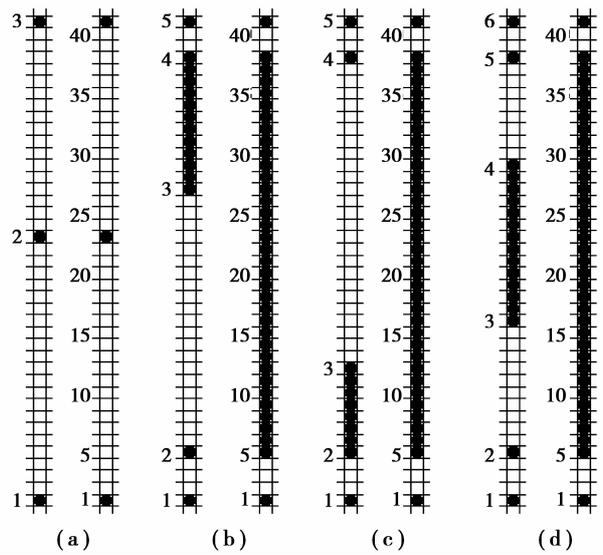


图 4 轮廓图与阈值分割图对应列的比照

通过本节的设置,每列轮廓点的 flag1 均呈“1010...”规律变化,如图 3(e)所示,每一对“10”间的点则是本列的一段加工区域。

3.1.2 内外轮廓判定

针对各个轮廓 $contour[i]$,在其横坐标范围 (x_{min}, x_{max}) 内取一列,如第 $\lceil \frac{x_{min} + x_{max}}{2} \rceil$ 列,将经 3.1.1 步骤后得到的这列的数据按照 y 值从小到大查找,直到找到第一个属于该轮廓的轮廓点,即该轮廓在本列的下轮廓点。若此点的 flag1 为 1,则该点为本列一段加工区域的开始,可认定此轮廓为内轮廓,所围的为加工区域;反之若此点的 flag1 为 0,则此轮廓为外轮廓。

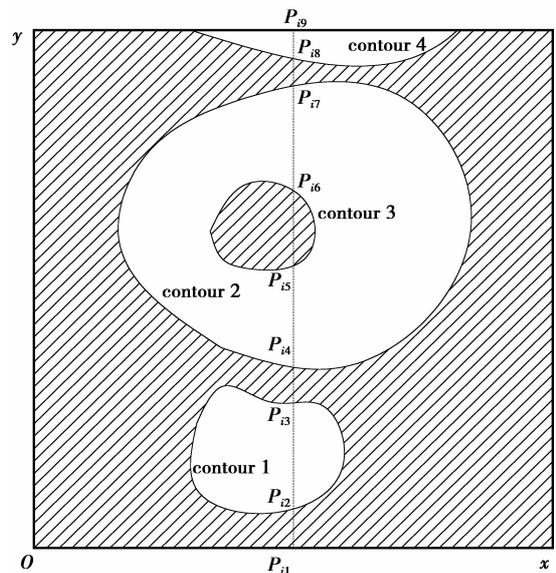


图 5 内外轮廓的判定

如图 5 所示,第 i 列经 3.1.1 步骤处理后轮廓点按照 y 坐标从小到大的顺序排列分别为 P_{i1} 、 P_{i2} 、 P_{i3} 、 P_{i4} 、 P_{i5} 、 P_{i6} 、 P_{i7} 、 P_{i8} 、 P_{i9} , 其 flag1 分别为 010101010。分别对 4 条轮廓线 contour1、contour2、contour3、contour4 进行判断,其对应的下轮廓点分别为 P_{i2} 、 P_{i4} 、 P_{i5} 、 P_{i8} , 此 4 点的 flag1 分别为 1101, 则 contour1、contour2、contour4 为内轮廓, contour3 为外轮廓。

3.2 刀具半径补偿和加工余量预留

Z 方向上,每层切片之间的距离 CT 机扫描时的纵向步进距离。XY 平面内,设 CT 扫描的视场直径为 R ,重建后图像的分辨率为 $x_{dpi} \times y_{dpi}$, 则 x 方向上每个像素点代表的实际尺寸为 $\frac{R}{x_{dpi}}$, y 方向上每个像素点代表的实际尺寸为 $\frac{R}{y_{dpi}}$ 。由此可以进行图像尺寸和实际尺寸的转换。

粗加工步骤应用的是平头铣刀,首先应用轮廓偏置算法^[16]对各个轮廓进行偏移,而偏移量为刀具半径和加工余量之和对应的像素数;然后对更新了轮廓点划分加工区域。

如图 6 所示,实线表示偏移前的轮廓,虚线表示偏移后的轮廓。若轮廓为内轮廓,则需向内偏移;反之若轮廓为外轮廓,则需向外偏移。

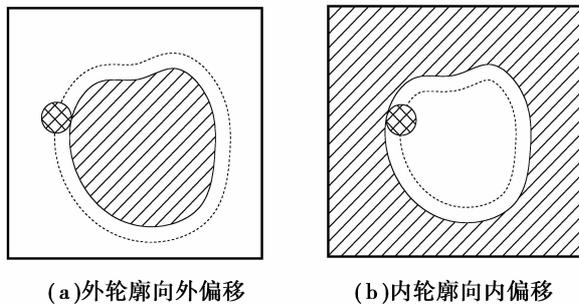


图 6 轮廓偏移

4 数控代码生成

采用逐层铣削的加工方式时,在轮廓确定之后,粗加工刀具路径的规划有 3 种形式:单向、双向、螺旋形。单向和双向刀具路径拥有容易计算和计算过程所需内存少的优点,但抬刀次数过多,并且容易由于过多的冲击力引起机床的蹿动。而螺旋形刀具路径需要生成连续的偏移并且清除自交环,计算繁琐^[3]。采用 2.5 轴立式铣削的加工方式,按照双向铣削的方式规划粗加工刀具路径。

将每层偏移后的轮廓点数据划分加工区域,生

成各层的刀具路径,然后将其有序连接起来,最后生成粗加工 NC 代码。具体步骤如下:

步骤 1 输入工艺参数,包括刀具参数、切削参数、机床类型等参数的设置;

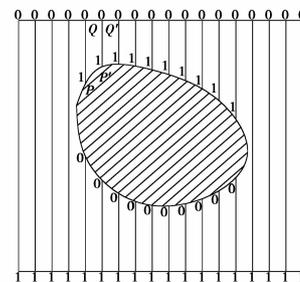
步骤 2 单层切片图像数据生成刀具路径;

步骤 3 将每层连接起来,得到所有切片的走刀路径;

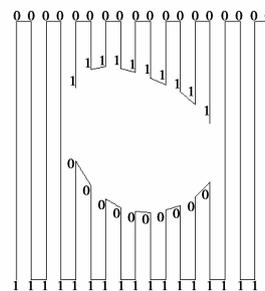
步骤 4 应用数控编程技术,将刀具路径转换成 NC 代码,并以 NC 格式文件输出。

下面介绍单层切片图像数据生成刀具路径的方法,其算法如下。

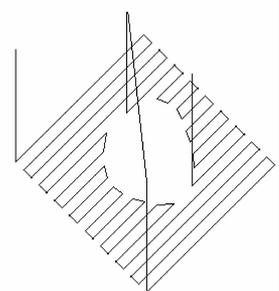
1)按照 3.1.1 节的方法对偏移后的切片轮廓点设置标志位,其中要考虑到偏移量对 3.1.1 节步骤三的影响,结果如图 7(a)所示。



(a)设置标识位flag1



(b)双向铣削刀具路径



(c)刀具路径示意图

图 7 单层切片的刀具路径生成

2)根据标志位划分加工区域,并把属于同一加工区域的点按照双向铣削的顺序存储,生成如图 7(b)所示的刀具路径,具体步骤如下:

步骤 1 通过逐列查找是否还有尚未划分加工区域的轮廓点,来寻找新的加工区域。

对各个轮廓点设置标识位 flag2,其中若 flag2 为 1 表示该点已被划分到某个加工区域,flag2 的初始值为 0。

从第一列开始查找,若存在两相邻点 P 、 Q ,满足 P 的 flag1 为 1, Q 的 flag1 为 0,且 P 、 Q 的 flag2 都为 0,则表示发现了新的加工区域,将 P 、 Q 的 flag2

置 1, 并存入该加工区域对应的刀具路径数据结构, 执行第二步; 否则表示本层的点都已划分到各个加工区域, 判断结束。

步骤 2 通过查找下一列是否存在属于同一加工区域的点, 来判断此加工区域是否结束。

查找 P 、 Q 的下一列, 若发现两相邻点 P' 、 Q' , 其 flag1 分别为 10、 flag2 都为 0, 且 y 坐标满足 $y_P < y_{Q'}$ 且 $y_{P'} < y_Q$, 则表示 P' 、 Q' 与 P 、 Q 属于同一加工区域, 将 P' 、 Q' 的 flag2 置 1, 并按照步骤 3 的方法进行存储。若没有发现满足条件的 P' 、 Q' , 则表示此加工区域已结束, 转向步骤 1, 继续寻找新的加工区域。

步骤 3 将步骤 2 找到属于此加工区域的点按照双向铣削的顺序存储, 并继续执行步骤 2 直到此加工区域结束为止。

若本加工区域对应的刀具路径数据结构当前最后一点的 flag1 为 1, 则先存储 flag1 同样为 1 的 P' , 后存储 Q' ; 反之则先存储 Q' , 后存储 P' 。

3) 连接本层的每块加工区域。

将刀具定位在退刀高度, 然后在退刀高度水平移动刀具, 将刀具定位在一个加工区域初始位置的上方, 走完本加工区域后抬刀到退刀高度; 接下来将刀具定位在下一个加工区域初始位置的上方, 开始一个新加工区域的刀具路径规划, 直到本层的所有加工区域都已被加工。如图 7(c) 所示。

生成单层切片的刀具路径后, 每加工完一层后将刀具定位到下一层起始点的上方即可将各层连接起来。

5 系统实现

根据所提出的方法, 在 Visual C++ 6.0 环境下, 开发了由工业 CT 切片图像直接生成粗加工 NC 代码的软件。该软件主要包括图像处理与粗加工 NC 文件生成两部分。图像处理部分主要包括阈值分割、边缘提取、轮廓跟踪、轮廓偏移四个功能; 粗加工 NC 文件生成部分包括加工工艺参数设置与粗加工 NC 文件生成 2 个功能, 最终生成 NC 格式的数控代码文件。

某茶壶状工件经工业 CT 扫描后得到 178 层 256×256 的切片图像, 层间距为 1 mm。使用本文开发的软件系统读入切片图像, 生成粗加工 NC 代码。

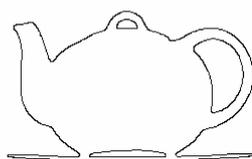
1) 首先对切片图像进行图像处理。图 8(a) 所示为第 89 层切片; 图 8(b) 为其阈值分割后的图像; 图 8(c) 为边缘提取和轮廓跟踪后的结果。



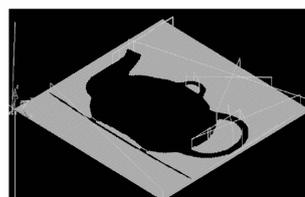
(a) 第 89 层切片图



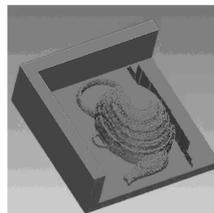
(b) 第 89 层阈值分割



(c) 第 89 层边缘轮廓图



(d) 切片第 89 层刀具路径图



(e) 工件在 Vericut 7.0 中的仿真结果

图 8 某工件的粗加工仿真

2) 对切片图像进行区域划分生成每一层的刀具路径, 逐层将生成的刀具路径连接起来, 最后生成粗加工 NC 代码。图 8(d) 所示为所生成的第 89 层图像的刀具路径在软件 CAXA 编程助手中的仿真结果, 其中 xoy 平面内的线表示的是切削加工的刀具路径, 垂直于 xoy 平面的线代表的是从退刀高度进刀到加工区域起始点的过程、加工完一块区域抬刀到退刀高度的过程或者是从一个加工区域的终点上定位到下个加工区域上方的过程, 可看出刀具路径是按照双向铣削的方式进行规划的。图 8(e) 所示为第 0 到第 89 张切片即半个茶壶的切片数据生成的 NC 代码, 在 CGTech 公司的 Vericut 7.0 数控仿真软件中的仿真结果。

6 结论

针对工业 CT 切片图像的特点, 提出了一种由工业 CT 切片图像直接生成粗加工 NC 代码的方法, 并通过仿真实验验证了文中提出方法的正确性。对于 Z 轴可见的复杂曲面, 该算法结构简单、效率较高、效果良好。还提出了新的内外轮廓判定方法, 该方法思路简单、准确率高。论文的工作为下阶段的精加工阶段 NC 代码的生成以至实现产品的快速仿制打下了基础。

参考文献:

- [1] 邓志华,王霄,刘会霞. 基于测量数据直接生成 NC 加工轨迹的方法研究[J]. 机床与液压,2006(9):72-74.
DENG Zhihua, WANG Xiao, LIU Huixia. Research on the method to generate NC tool path directly from measure data [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006(9):72-74.
- [2] Kalogerakis E, Nowrouzezahrai D, Simari P, et al. Extracting lines of curvature from noisy point clouds[J]. Computer-Aided Design, 2009, 41 (4): 282-292.
- [3] Lin A C, Liu H T. Automatic generation of NC cutter path from massive data points [J]. Computer-Aided Design, 1998, 30(1): 77-90.
- [4] Wu P, Suzuki H, Kase K. Three-axis NC cutter path generation for subdivision surface with Z-map [J]. JSME International Journal Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 2005, 48(4):757-762.
- [5] 张嘉易,包丽雅,马明旭,等. 圆刃铣刀螺旋铣削的 Z-map 高精度数值仿真[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(10):1420-1426,1432.
ZHANG Jiayi, BAO Liya, MA Mingxu, et al. Numerical z-map simulation with high-accuracy for helical milling with round blade cutter[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(10):1420-1426,1432.
- [6] Park S C, Chung Y C. Tool-path generation from measured data [J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(5):467-475.
- [7] Park S C, Choi B K. Boundary extraction algorithm for cutting area detection [J]. Computer-Aided Design, 2001, 33(8):571-579.
- [8] Feng H Y, Teng Z J. Iso-planar piecewise linear NC tool path generation from discrete measured data points [J]. Computer-Aided Design, 2005, 37 (1): 55-64.
- [9] 曹玉宝,何雪明,李成刚,等. 从测量的散乱数据点云直接生成数控刀具路径的研究[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(5):638-642
CAO Yubao, HE Xueming, LI Chenggang, et al. Study of NC tool path generation from measured discrete data point cloud[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2007, 26(5):638-642.
- [10] 吴凤和,施法中. 基于图像数据的数控自动编程系统研究与开发 [J]. 中国机械工程, 2005, 16 (17): 1541-1545.
WU Fenghe, SHI Fazhong. Research and development of automatic NC programming system based on image data[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(17): 1541-1545.
- [11] 张海云,赵玉刚. 基于图像的数控雕刻自动编程仿真系统开发[J]. 制造业自动化, 2010, 32(5):108-111.
ZHANG Haiyun, ZHAO Yugang. The development of automatic programming simulating system of the NC carve machining based on the image[J]. Manufacturing Automation, 2010, 32(5):108-111.
- [12] Qiu R S, Gao Y Q. A windows bitmap-based numerically controlled sculpture method and its application[J]. Journal of Shanghai University: English Edition, 2008, 12(1):71-75.
- [13] 段黎明,罗胜. 基于工业 CT 图像的数控代码直接生成方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14 (7): 1392-1398.
DUAN Liming, LUO Sheng. Method of generating numerical control codes directly based on industrial computed tomography image[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(7):1392-1398.
- [14] Chung G, Vese L A. Image segmentation using a multilayer level-set approach [J]. Computing and Visualization in Science, 2009, 12(6):267-285.
- [15] 段黎明,邱猛,吴朝明. 面向逆向工程的工业 CT 图像预处理系统开发[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(4): 666-670.
DUAN Liming, QIU Meng, WU Zhaoming. Development of industrial CT image pre-processing system for reverse engineering[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(4):666-670.
- [16] Molina-Carmona R, Jimeno A, Rizo-Aldeguer R. Morphological offset computing for contour pocketing[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(2):400-406.

(编辑 张小强)