

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2019.06.016

大型双面薄壁雕塑的机器人加工与实验研究*

郭桂彬, 谢剑阳, 梁志鹏, 冯亮友, 席文明*

(厦门大学 航空航天学院 福建 厦门 361102)

摘要: 针对现有机器人无法加工大型双面薄壁雕塑的问题, 对 CAM 软件空间与加工空间的配准模型及双面薄壁雕塑组件双侧加工中的错位误差进行了研究。对 CAM 产生的轨迹进行了归纳, 采用一种最大轮廓轨迹优化的方法, 使得机器人只对雕塑组件最大轮廓内的毛坯进行加工; 建立了被加工雕塑组件的支撑, 避免了轨迹未优化时粗加工形成的悬臂结构, 实现了对雕塑组件的精加工。实验及研究结果表明: 在 CAM 空间与加工空间配准后, 其双面薄壁雕塑组件的不同加工侧错位误差不超过 0.7 mm; 采用轨迹优化方法后, 其未加工出的毛坯能够对粗加工后的双面薄壁组件形成有效支撑, 保证了双面薄壁组件能够被完整地加工出来。

关键词: 机器人加工; 双面薄壁雕塑; 配准; 最大轮廓法; 双侧加工

中图分类号: TH164; TP242.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2019)06-0637-05

Robot processing experiment of large double-sided thin-wall sculpture

GUO Gui-bin, XIE Jian-yang, LIANG Zhi-peng, FENG Liang-you, XI Wen-ming

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361002, China)

Abstract: Aiming at the problem that existing robots could not process large-scale double-sided thin-walled sculptures, the registration model of CAM software space and processing space and the dislocation error of double-sided thin-walled sculpture components were studied. The trajectories generated by CAM were summarized, and a maximum contour method for trajectory optimization was designed, which enabled the robot to process only the blanks in the maximum contour of the sculpture component. The support of the sculpture component processed was established to avoid the cantilever structure of the sculpture component formed by roughing when the trajectory was not optimized, and the sculptural components were finished. The results indicate that after the registration of CAM space and processing space, the dislocation errors of different processing sides of the two-sided thin-walled sculpture components are less than 0.7 mm. By using the trajectory optimization method, the unprocessed blank can form an effective support for the rough-processed double-sided thin-walled component, so the double-sided thin-walled component can be completely processed.

Key words: robot processing; double-sided thin-walled sculpture; registration; maximum contour method; double-sided processing

0 引言

目前, 机器人已被广泛应用于复杂零件磨削、压铸件去毛刺以及铸造件后处理领域^[1-4]。随着机器人技术的发展, 一些研究者尝试将机器人应用于雕塑品的加工中。

文献[5-6]研究了机器人加工复杂曲面的轨迹生成方法, 并将生成的轨迹应用到雕塑品的加工中, 但实验中只对简单的雕塑模型进行了加工, 用于验证轨迹生成方法的有效性; 文献[7]首先利用扫描仪对创作的雕塑小样进行了扫描, 建立了雕塑的 CAD 模型, 然后对 CAD 模型进行了放样, 最后借助采购的意大利机器人加工设备, 利用转台的旋转并配合机器人的运

收稿日期: 2018-12-05

基金项目: 福建省科技重大专项资助项目(2016HZ0001-6)

作者简介: 郭桂彬(1994-), 男, 回族, 福建泉州人, 硕士研究生, 主要从事机器人加工方面的研究。E-mail: 506805310@qq.com

通信联系人: 席文明, 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: 506805310@qq.com

动完成了 CAD 模型的加工,加工的模型将用于翻制玻璃钢模具,用于雕塑品的翻制;文献 [8] 利用现有的通用 CAM 软件产生了刀轨迹,然后再将刀轨迹转换成机器人加工轨迹,作为验证,文中对一简化模型进行了单面加工;文献 [9] 利用 CAD 模型的面片信息产生机器人的加工轨迹,并对加工过程进行了模拟仿真,在实验中采用旋转加工法,完成了复杂雕塑的加工。

上述文献中,对于长宽比大的雕塑,只是采用了单面加工,没有完整地加工出雕塑品。对于长宽比接近的雕塑,采用了转台回转加工或者单面回转加工;对于单面回转加工,只是加工了雕塑品的一部分。前期,本研究组也开展了机器人加工轨迹生成方法的研究,以及对雕塑模型进行了实验加工^[10-12]。

本文针对大型双面薄壁雕塑加工的方法进行研究,采用双侧加工方法完成雕塑品的加工。

1 CAM 软件空间与机器人加工空间的配准

由于机器人加工装备的制造和安装误差,实际机器人加工装备与 CAM 软件中机器人加工装备模型无法实现配准。当采用双侧加工时,由于存在 CAM 软件中的轨迹点映射到加工空间的误差,导致不同加工侧的错位。前期实验机器人双侧加工的误差如图 1 所示(粗加工后前后和左右侧向形成错位,导致无法完成雕塑品的精加工)。



图 1 机器人双侧加工中的误差

建立 CAM 软件空间与机器人加工空间的配准,实际上就是求取机器人加工装备中各个单元的转换矩阵,然后利用求取的各个单元的转换矩阵,来调整 CAM 软件中的对应单元,使得 CAM 软件中的各个单元的转换矩阵与机器人加工空间中对应的单元间的转换矩阵相等。CAM 软件空间与机器人加工空间配准如图 2 所示。

CAM 软件空间中的机器人模型、工作台模型(也可以看成毛坯模型,毛坯模型固定在工作台上,为方便分析,只画出了工作台模型)和刀具模型的坐标系分

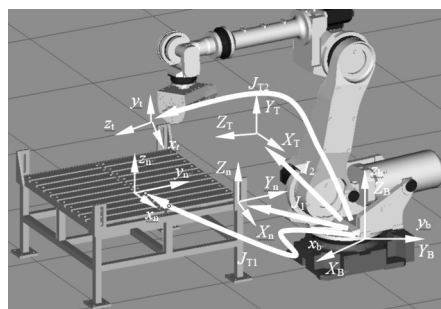


图 2 CAM 软件空间与机器人加工空间配准

别为 $\sum x_b y_b z_b$ 、 $\sum x_n y_n z_n$ 和 $\sum x_r y_r z_r$ 。机器人加工空间中的机器人、工作台和刀具的坐标系分别为 $\sum X_b Y_b Z_b$ 、 $\sum X_n Y_n Z_n$ 和 $\sum X_r Y_r Z_r$ (图 2 中只标注出了坐标系,没有画出加工空间中的机器人、工作台和刀具)。

要建立 CAM 软件空间与机器人加工空间的配准,需要建立以下的方程:

$$\begin{cases} J_{T1} = J_1 \\ J_{T2} = J_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: J_1 —CAM 机器人与工作台之间的转换矩阵; J_2 —机器人与刀具之间的转换矩阵; J_{T1} —机器人模型与工作台模型之间的转换矩阵; J_{T2} —机器人模型与刀具模型之间的转换矩阵; $J_1 J_2 J_{T1} J_{T2}$ — 4×4 的齐次坐标转换矩阵。

假设开始标定前, CAM 软件空间中,工作台模型坐标系与机器人模型坐标系重合,机器人加工空间中,工作台坐标系与机器人坐标系重合,则:

$$J_{T0} = J_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: J_{T0} —CAM 软件空间中机器人与工作台之间的转换矩阵; J_0 —机器人加工空间中机器人与工作台之间的转换矩阵。

然而工作台实际安装时,并不与机器人坐标系重合,即 J_0 和 J_1 不相等,假设 J_1 是由 J_0 旋转 $Rot(Z, \gamma)$ 、 $Rot(Y, \beta)$ 、 $Rot(X, \alpha)$, 平移 $Tran(X, p_x)$ 、 $Tran(Y, p_y)$ 、 $Tran(Z, p_z)$ 而形成,则:

$$J_1 = J_0 Rot(Z, \gamma) Rot(Y, \beta) Rot(X, \alpha) Tran(X, p_x) Tran(Y, p_y) Tran(Z, p_z) \quad (3)$$

式中: $Rot(Z, \gamma)$ —加工空间中绕相对坐标系的 Z 轴旋转 γ 角; $Rot(Y, \beta)$ —加工空间中绕相对坐标系的 Y 轴旋转 β 角; $Rot(X, \alpha)$ —加工空间中绕相对坐标系的 X 轴旋转 α 角; $Tran(X, p_x)$ —加工空间中沿相对坐标系

的 X 轴平移 p_x 距离; $Tran(Y p_y)$ — 加工空间中沿相对坐标系的 Y 轴平移 p_y 距离; $Tran(Z p_z)$ — 加工空间中沿相对坐标系的 Z 轴平移 p_z 距离。

欲使 CAM 软件空间中工作台模型的位姿与机器人加工空间中的工作台位姿一致, 需要对工作台模型的初始坐标系进行旋转和平移。将式(1 2) 代入式(3) 得:

$$J_{T1} = J_{T0} Rot(z \gamma) Rot(y \beta) Rot(x \alpha) Tran(x p_x) Tran(y p_y) Tran(z p_z) \quad (4)$$

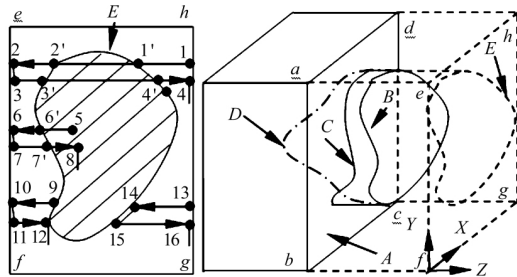
式中: $Rot(z \gamma)$ — CAM 空间中绕相对坐标系的 z 轴旋转 γ 角; $Rot(y \beta)$ — CAM 空间中绕相对坐标系的 y 轴旋转 β 角; $Rot(x \alpha)$ — CAM 空间中绕相对坐标系的 x 轴旋转 α 角; $Tran(x p_x)$ — CAM 空间中沿相对坐标系的 x 轴平移 p_x 距离; $Tran(y p_y)$ — CAM 空间中沿相对坐标系的 y 轴平移 p_y 距离; $Tran(z p_z)$ — CAM 空间中沿相对坐标系的 z 轴平移 p_z 距离。

式(4) 表明: 只要在 CAM 软件空间中实现与机器人加工空间中的相同变换, 就可以建立工作台在两个空间中的配准。采用同样的方法, 可以建立 CAM 软件空间中任一单元模型和机器人加工空间中对应单元的配准。

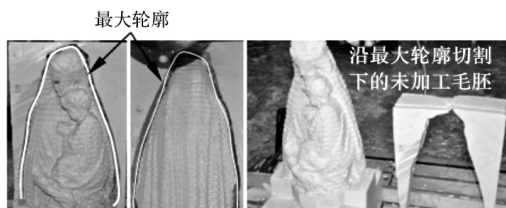
2 最大轮廓法加工轨迹优化

图 1 粗加工后的雕塑, 由 ArtCAM 软件(英国 Delcam 公司) 产生刀轨迹加工。粗加工完成后只有雕塑的底部与毛坯相连, 其余三侧的毛坯被完全切除, 导致粗加工后的雕塑为悬臂结构。双侧加工时, 如果每侧加工只在最大轮廓内进行并且只加工到最大轮廓线, 则粗加工后, 由于切削余量的存在, 雕塑组件四周将与毛坯相连。

其轨迹优化原理如图 3 所示。



(a) 粗加工结果示意图



(b) 最大轮廓加工模型

图 3 最大轮廓轨迹优化原理

图 3(a) 右图中显示的是一侧(右侧) 加工示意图 A (平面 $ABCD$) 为产生轨迹点的基面, 基面左边长方形为未被加工的毛坯(由左侧完成加工), 基面右边虚线表示的长方体 $abcdefgh$ 是右侧加工的毛坯。 B 为被加工雕塑组件的最大轮廓, C 为雕塑组件最大轮廓 B 在基面 A 上的投影, D 处于基面 A 的左侧, 为雕塑组件左侧未被加工的部分, 其包容在未被加工的毛坯中。 D 由左侧加工完成, 其加工过程与右侧加工方法相同, 需要再次设置基面并产生加工轨迹。通过左右侧加工, 将完整加工出雕塑组件。 E 为最大轮廓 B 在毛坯右端面(平面 $efgh$) 上的投影。 ArtCAM 软件采用层切法进行粗加工, 即以一定的切深, 逐层将多余毛坯全部切削掉。采用 ArtCAM 软件产生的粗加工轨迹完成右侧加工后, 其基面 A 右侧除雕塑组件外的毛坯被完全切除, 基面 A 右侧的实线部分是 ArtCAM 右侧粗加工完成后的形状。实际上, 要完整地加工出雕塑组件的右侧部分, 只需要对 B 和 E 之间柱体中除雕塑组件外的右侧部分毛坯进行加工, 即对剖面线部分进行加工, 直至加工出右侧毛坯内的雕塑组件。由于雕塑组件左右侧具有相同的最大轮廓 B , 最大轮廓在毛坯左右端面投影形状相同, 所以可以对左侧进行相同的加工。

图 3(b) 中白线显示出最大轮廓的位置, 其前后最大轮廓线形状相同。对于双面薄壁雕塑组件的精加工, 未加工毛坯可以对雕塑组件形成支撑, 实现双面薄壁雕塑组件的加工。

最大轮廓法以最大轮廓线 B 为基准, 对 ArtCAM 软件产生的加工轨迹进行优化。实现最大轮廓法优化的关键是求取雕塑组件的最大轮廓线 B 。根据 ArtCAM 软件产生粗加工轨迹的特点, 当加工轨迹点的 Z 坐标小于对应最大轮廓线 B 上的轨迹点 Z 坐标时(参见图 3(a) 右图的坐标系 ΣXYZ), 加工轨迹点只加工毛坯边界到最大轮廓投影之间的毛坯, 参见图 3(a) 左侧图, 其加工区域为剖面线外部的毛坯部分。根据这一特性, 取轨迹点最后一层即 A 面上的轨迹点(包括毛坯边界上的点、最大轮廓投影 C 上的点), 其中, 最大轮廓投影 C 上的点的相邻点为边界点, 利用这一特性, 易于分离出最大轮廓投影 C 上的点。获得最大轮廓投影 C 上的点后, 将所有粗加工轨迹点与最大轮廓投影 C 上的点比较, 在 X 、 Y 坐标相同的条件下, 取 Z 值最大的轨迹点即为最大轮廓 B 上的点。

最大轮廓法轨迹优化的实现见图 3(a) 左侧图所示, 图中方框上的点为毛坯边界上的点, 方框内的曲线

为雕塑组件的最大轮廓。粗加工轨迹点分为 4 种情况,即轨迹点在雕塑上方(1~4 点)、轨迹点切削到雕塑体(5~8 点)、轨迹点切削到最大轮廓(9~12 点)以及轨迹点切削到最大轮廓下方(13~16 点)。对于前 3 种情况,需将边界上的点平移至与最大轮廓投影线对齐(如 1 点平移至 1'点),使其不加工最大轮廓外侧的毛坯;对于第 4 种情况,需要将轨迹点删除,最大轮廓线下方将由另一侧轨迹点加工。

对于雕塑的精加工,参照图 3(a) 右侧图,ArtCAM 产生的轨迹将加工基面 A、C 与 B 之间部分以及最大轮廓线 B 的右侧部分。由于采用双侧加工,对于右侧部分加工,只需以最大轮廓线 B 为界,删除最大轮廓线 B 左侧的轨迹点,保留最大轮廓线 B 右侧的轨迹点即可。

3 雕塑模型分割以及组件加工策略

实验加工大型雕塑模型及组件分割如图 4 所示。

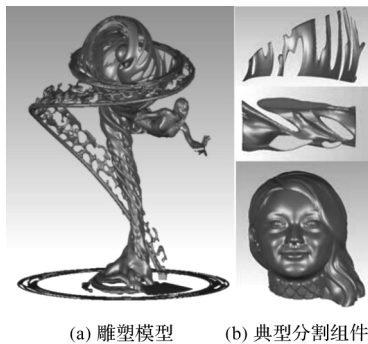


图 4 雕塑模型及典型组件模型

该雕塑主要由 3 部分组成。本文采用机器人加工装备,对 EPS 泡沫直接进行加工,获得制作玻璃钢模具的原型,然后采用在 EPS 泡沫原型表面直接糊制玻璃钢的方法得到制作雕塑的模具。

由于雕塑体积大,本研究先对 3 个主体部分进行分割形成雕塑组件,分别进行加工,加工完成后再合成雕塑,整个雕塑被分割成 183 个组件。分割雕塑组件需要遵循以下准则:(1) 不能够超出机器人的加工范围;(2) 大小要考虑充分利用 EPS 毛坯,并尽量减少组件数目;(3) 以双侧加工为条件;(4) 需要考虑最大轮廓法优化轨迹加工时能够获得足够多的支撑点。

4 实验结果分析与雕塑组件拼装

实验方法是在长方体石膏上加工一组开口通

槽,开口通槽采用双侧加工,通过测量不同加工侧开口通槽的侧面偏移距离,检测两个空间的配准精度。其不同加工侧的开口通槽侧面偏移距离不超过 0.7 mm。

CAM 软件空间与机器人加工空间配准实验如图 5 所示。

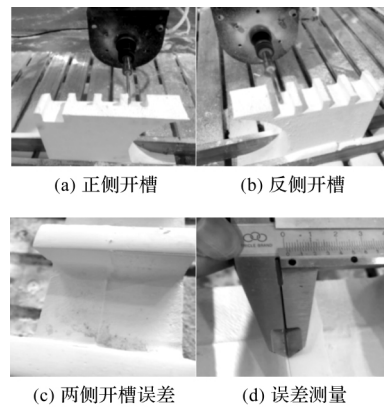


图 5 CAM 空间与加工空间配准实验

加工完成的雕塑组件如图 6 所示。



图 6 加工完成的雕塑组件分析及组件拼装

图 6 中,其未加工毛坯对加工的雕塑组件形成了支撑,使得双面薄壁组件得以顺利加工。

雕塑组件加工完成后,将其拼合成 3 个部分。3 个部分糊制玻璃钢后,就可以组装成制作雕塑的玻璃钢模具,以此玻璃钢模具为标准,就可以完成不锈钢雕塑的锻造和焊接组装。

5 结束语

本文对大型双面薄壁雕塑的机器人加工方法进行了研究和实验,建立了CAM空间与加工空间的配准模型,从而避免了双面薄壁雕塑组件双侧加工后的错位,实现了双面薄壁雕塑组件的完整加工;开展了最大轮廓法轨迹优化研究,采用最大轮廓法优化轨迹粗加工后,其加工的薄壁组件与毛坯四周形成了连接支撑,使得精加工时具有足够的支撑刚度,能够精确地加工出双面薄壁雕塑组件。

参考文献(References):

- [1] CORDES M, HINTZE W. Offline simulation of path deviation due to joint compliance and hysteresis for robot machining[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 2017, 90(1-4): 1075-1083.
- [2] ZIVANOVIC S, SLAVKOVIC N, MILUTINOVIC D. An approach for applying STEP-NC in robot machining [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 49(2): 361-373.
- [3] KHARIDEGE A, DU Ting-ting, ZHANG Ya-un. A practical approach for automated polishing system of free-form surface path generation based on industrial arm robot [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 2017, 93(1): 3921-3934.
- [4] 康治政. 超大直径薄壁塔设备的整体制造技术 [J]. *压力容器* 2017, 34(7): 66-72.
- [5] 刘蒙, 刘廷林. 机器人用于艺术雕刻的研究 [J]. *机床与液压* 2003(5): 110-112.
- [6] ZHU Jiang, RYO S, TOMOHISA T. Automatic tool path generation for robot integrated surface sculpturing system [J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, System, and Manufacturing*, 2008, 2(4): 812-823.
- [7] 胡春良, 李斌. CNC 机器人七轴加工石膏模型放大雕塑 [J]. *中国铸造装备与技术* 2016(6): 65-67.
- [8] 肖文磊, 郇极. 切削加工机器人与 CAD/CAM 系统集成化 [J]. *机械工程学报* 2011, 47(15): 52-60.
- [9] 何雪军, 王进, 陈国栋, 等. 基于三角网切片及碰撞检测的工业机器人三维头像雕刻 [J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2017, 51(6): 1104-1110.
- [10] 冯亮友, 梁志鹏, 席文明. 机器人加工的映射一致性建模及加工实验研究 [J]. *厦门大学学报: 自然科学版* 2018, 57(5): 722-728.
- [11] 冯亮友, 梁志鹏, 席文明. 机器人加工在数字化制造中的应用 [J]. *制造技术与机床* 2018(6): 40-49.
- [12] 梁志鹏, 冯亮友, 徐开怀, 等. 机器人雕塑加工中的轨迹生成与优化研究 [J]. *机电技术* 2018(4): 2-6.

[编辑: 李辉]

本文引用格式:

郭桂彬, 谢剑阳, 梁志鹏, 等. 大型双面薄壁雕塑的机器人加工与实验研究 [J]. *机电工程* 2019, 36(6): 637-641.

GUO Gui-bin, XIE Jian-yang, LIANG Zhi-peng, et al. Robot processing experiment of large double-sided thin-wall sculpture [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(6): 637-641.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>