

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0364-04

# 激光加工中可调性一体化工作台系统的设计与 算法研究

王建伦, 虞 钢

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 分析了加工件位姿与测量及加工的关系,提出了可调性一体化工作台的概念,给出了通过调整工作台位姿(也就是相应加工件位姿)来改善测量及加工的方法。即在建立测量及加工最佳位姿标准及坐标转换体系的基础上,通过调整加工件位姿,使加工件位姿达到或接近最佳状态,从而提高测量及加工的灵活性,改善测量及加工的效果。这对提高激光加工的效率 and 实现柔性加工都具有重要意义。

**关键词** 激光技术; 柔性加工; 工作台; 最佳位姿; 可调性; 一体化

**中图分类号** TN249; TG665 **文献标识码** A

## Design and Algorithm Study for Adjustable and Integrative Working Table in Laser Manufacture

WANG Jian-lun, YU Gang

(Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** The relation between posture of workpiece and measurement, processing was discussed. A conception of adjustable and integrative working table was put forward. Based on determining the best posture and the algorithm of transformation between different coordinates, some parts of workpieces difficult to process now could be dealt with and the effect of processing was improved as a whole. It's important and valuable for advancing the efficiency and flexibility of laser manufacturing.

**Key words** laser technique; flexible manufacture; working table; optimum posture; adjustability; integrity

### 1 引 言

集成化、智能化、柔性化既是一般数控加工的发展趋势<sup>[1,2]</sup>,也成为未来激光加工系统的发展方向<sup>[3]</sup>。具有框架式机器人结构的集成化激光智能加工系统<sup>[4]</sup>,采取接触式测量,测杆一般竖直向下,加工时一般要求激光束的方向垂直于加工表面(沿法线方向)。而在实际测量和加工中,加工件一般是固定放置的,受光路设计和环境干涉等影响,机器人的实际运动范围小于其理论值,这就导致测量和加工往往缺乏必要的灵活性,甚至会出现测量和加工的盲点。因此,要设计可调性一体化工作台,通过它来调整加工件位姿。这就给测量和加工都带来了很大

的灵活性,使得可以在最适合的工作台位姿(加工件位姿)下进行测量或加工,有可能消除部分测量或加工的盲点,改善加工的效果。不同加工区最佳测量及加工位姿的确定,不同位姿下测量或加工数据的相互转换,如何重构测量及加工的整体流程等等,这些都是需要解决的问题。这一方案实际构成集硬件与算法(软件)一体的加工系统。

### 2 测量及加工的加工区最佳位姿

对于加工件表面的不同加工区,其测量及加工的最佳位姿可能是不同的。首先给出最佳位姿的定义或标准。对接触式测量而言,无论从误差补偿还是测

**基金项目:** 中国科学院“知识创新工程”重大项目(KGCX1-11)资助课题。

**作者简介:** 王建伦(1975—),男,山东人,博士研究生,主要从事激光加工中的 CAD/CAM 技术研究。

E-mail: nopolin@sina.com

**导师简介:** 虞 钢(1958—),男,浙江人,研究员,博士生导师,主要从事激光与材料的相互作用,激光加工的集成化与智能化及其应用等方面的研究。E-mail: gyu@imech.ac.cn

量准确性的角度出发,都要求测杆应尽可能垂直于测量面,这与加工时对激光束的要求类似。故对于测量和加工,加工面的最佳位姿可以认为是一致的。

首先给出加工面任一点的最佳位姿。从测量和加工的角度而言,某一点的最佳位姿主要并不取决于其在空间的位置,而是其所在曲面在该点处的法向。当该点法向竖直向上时(即沿五轴框架式机器人的 Z 轴正向),该点的测量和加工都达到最适宜,从而此时该点的位姿即为最佳位姿。

在此最佳位姿的基础上可进一步给出加工区的最佳位姿。当加工区内所有点的平均法向最接近竖直方向时,则此时的加工区位姿即为最佳位姿。对加工区而言,实际加工时是有一定轨迹方向的,一般沿 X 或 Y 轴方向,或按照一定的特征线方向。实际上由轨迹方向及轨迹点的法向即基本决定了加工时加工头,特别是 A, C 轴的运动规律。对于五轴框架式机器人系统而言,其初始关节位姿  $(X, Y, Z, A, C) = (0, 0, 0, 0, 0)$ , A 轴的零度是沿 Y 轴的负方向。因为只有五个自由度,所以对具有一定轨迹方向及轨迹点法向的加工区,往往需要 A 轴转过比较大的角度才能加工。又因为不同加工点的位姿也有所不同, A 轴经常还需再调整若干角度,这就容易导致 A 轴出现超限(转过限定的角度)。为避免这种情况的发生,可以把加工面的轨迹方向及轨迹点法向分布规律也考虑进其最佳位姿的定义中,即在最佳位姿的基础上,进一步要求加工面的位姿应当使得机器人的 A 轴尽可能转动较小的角度。

在加工面的轨迹确定的情况下,如何设置加工面位姿才能使 A 轴转动的角度尽可能小,我们对这一问题进一步分析。激光加工过程中,加工件往往是分区加工的,分区的依据即各分区是相对光滑的曲面,从而使同一分区每一轨迹具有相似性。而轨迹规划也贯彻了应使轨迹尽可能光滑的原则,即同一轨迹上各点的法向一般是连贯的,具有某种整体的规律性。根据这种规律性可将轨迹分为三类,从而将加工区分为三类。

轨迹上面任一点的法向与过该点的竖直方向都可确定一个平面;而过该点的竖直方向与该点的轨迹线切矢也可确定一平面。考察两平面的夹角,如果两平面接近垂直(即夹角接近  $90^\circ$ ),则归为第一类,反之如果两平面接近重合(即夹角接近  $0^\circ$ ),则归为第二类,其他情形都归为第三类。

对于第一类轨迹,应通过调整加工区位姿,使轨迹方向尽可能接近 Y 轴方向;对第二类轨迹,则应

通过调整加工区位姿,使轨迹方向尽可能垂直于 Y 轴方向。对第三类轨迹,则一般不对轨迹方向做进一步调整。实际应用上述规律时,可只对一些特定类型的曲面加以应用。如一般的棱脊可归入第一类,如图 1 所示,某些特殊的环状面(加工面朝向上方)可归入第二类,如图 2 所示。

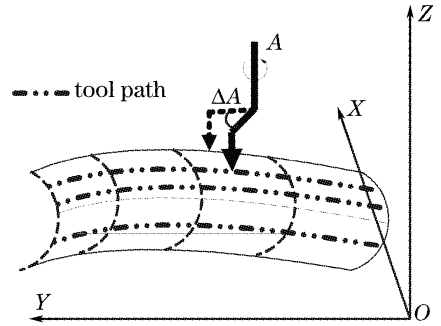


图 1 第一类轨迹示例

Fig. 1 Demonstration of the first kind of path

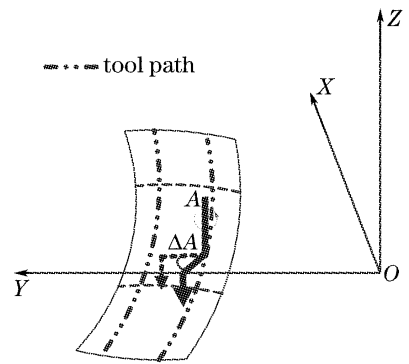


图 2 第二类轨迹示例

Fig. 2 Demonstration of the second kind of path

### 3 基本结构及算法设计

由可调性工作台来实现加工区的位姿调整,达到最佳的测量或加工位姿。可调性工作台的基本结构示意图如图 3 所示。它由一个承载圆盘及三个转轴组成,可以沿中心轴  $O'Z'$  旋转,以  $O'X$  或  $O'Y'$  为中心轴进行翻转,从而实现其所承载加工件的位姿调整。对于测量时的位姿调整,因为测量前没有相

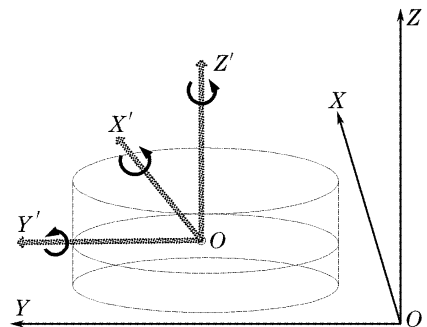


图 3 可调性工作台结构示意图

Fig. 3 Structure schematic of adjustable working table

关的分析数据,所以一般只能依据主观判断进行调整。而对加工时的位姿调整,可以根据测量数据或加工数据分析判断出其最佳位姿,进而调整工作台,使加工区达到或接近最佳位姿,可以制定多种关于最佳位姿或近似最佳位姿的求解方案。

在得到加工区的最佳位姿后,进而可以得到为达到最佳位姿工作台所需做的调整,即确定三个角度:沿中心轴  $O'X'$  旋转的角度  $\alpha$  (由  $O'X'$  轴正向观察,逆时针旋转  $\alpha$  为正,反之为负,以下旋转的情形与之类似),以  $O'Y'$  为中心轴翻转的角度  $\beta$ ,以  $O'Z'$  为中心轴翻转的角度  $\gamma$ 。我们推导相应的坐标转换公式,即由原加工区点的坐标,经坐标转换得到调整后的坐标。

将工作台坐标系  $O'X'Y'Z'$  作为工件坐标系,工作台中心点  $O'$  在整体坐标系下的坐标为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ 。因工件与工作台的相对位姿关系不发生变化,所以在工作台位姿调整后,工件上点在工件坐标系下的坐标不变。假定工作台位姿的调整按先绕  $X$  轴旋转,然后绕  $Y, Z$  轴旋转的顺序进行。当初始的工作台位姿为  $(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ ,设此时工件上的某一点  $P$  的整体坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ ,可推导当工作台位姿变为  $(\alpha, \beta, \gamma)$  时点  $P$  的坐标变化。

设工作台位姿为  $(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$  时点  $P$  对应的工件坐标为  $(x_t, y_t, z_t)$ ,则由齐次坐标变换公式<sup>[5]</sup>,其平移变换矩阵为:

$$T_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -X_0 & -Y_0 & -Z_0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

绕  $X$  轴旋转变换矩阵为:

$$R_{0x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_0 & \sin \alpha_0 & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

绕  $Y$  轴旋转变换矩阵为:

$$R_{0y} = \begin{bmatrix} \cos \beta_0 & 0 & -\sin \beta_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta_0 & 0 & \cos \beta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

绕  $Z$  轴旋转变换矩阵为

$$R_{0z} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_0 & \sin \gamma_0 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma_0 & \cos \gamma_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

设  $M_0 = T_0 \cdot R_{0x} \cdot R_{0y} \cdot R_{0z}$ , 则:

$$(x_t, y_t, z_t, 1) = (x_0, y_0, z_0, 1)M_0, \quad (5)$$

因不同工作台位姿下点  $P$  有相同的工件坐标,设工作台位姿为  $(\alpha, \beta, \gamma)$  时对应的点  $P$  整体坐标为  $(x, y, z)$ ,由整体坐标转换为工件坐标所需的平移及旋转变换矩阵分别为  $T, R_x, R_y, R_z$ , 并设  $M = TR_xR_yR_z$ , 则:

$$(x_t, y_t, z_t, 1) = (x, y, z, 1)M, \quad (6)$$

所以

$$(x, y, z, 1) = (x_t, y_t, z_t, 1)M^{-1} = (x_0, y_0, z_0, 1)M_0M^{-1}, \quad (7)$$

这样就实现了不同工作台位姿下某一点  $P$  的坐标变换。

综上所述,在对加工区的位姿进行调整之后,经一系列坐标变化,可以得到调整后对应点的坐标。至于加工点对应法向,可在点坐标变换的基础上求得。从而使加工区位姿调整后,相应的加工点数据可以完整地转换为新位姿下的坐标数据。

#### 4 加工件位姿可调情形下的测量及加工

无论对于测量还是加工,在点位最佳位姿的基础上可以进一步定义某一型面或某一分区的最佳位姿。位姿的可调性会对整个测量加工过程产生重要影响。不同位姿下加工件表面点的空间坐标可以相互转换,这使得不同位姿下的测量和加工成为可能。流程图 4 反映了这种情形下的测量和加工过程。

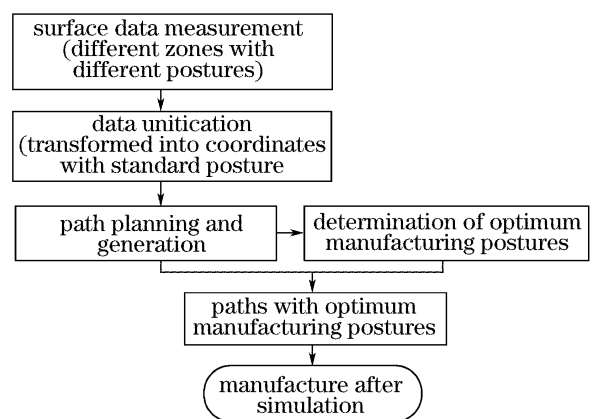


图 4 位姿可调情形下的测量及加工流程

Fig. 4 Measurement and path planning with adjustable posture

#### 5 结 论

对可调性一体化工作台的基本结构和算法设计作了初步讨论,给出了通过调整工作台位姿(也就是相应加工件位姿)来改善测量及加工的方法。可调

性一体化工作台的设计一方面通过工作台位姿的调整弥补机器人系统的不足,另一方面,通过不同位姿下点坐标的变换以及对最佳测量及加工位姿的探讨,使得整个系统在测量及加工规划时,可以从一种整体的、优化的角度来考虑问题,从而有助于实现高效、柔性、复杂的激光加工。但在软硬件的实现方面仍有很多工作要做,如测量及加工的最佳位姿的求解算法,对整体的加工数据如何从最佳位姿的角度进行自动分区等,都需要进一步深入研究。

### 参 考 文 献

- 1 Lou Rui. Key Technologies in Application of NC [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005  
娄 锐. 数控应用关键技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005
- 2 Wang Guicheng, Wang Shulin, Dong Guangqiang. Tooling System for High Speed Machining [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005  
王贵成,王树林,董广强. 高速加工工具系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005
- 3 Yu Gang, Yu Huoji. Integrated Laser Intelligent Manufacturing [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2001  
虞 钢,虞和济. 集成化激光智能加工工程 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001
- 4 Yu Gang, Wang Hongcai, Zhang Fenglin *et al.*. A Laser Machining Device with Flexible Delivery and Multi-axis Motion [P]. Chinese Patent, ZL98101217.5, 1998  
虞 钢,王红才,张凤林等. 一种具有柔性传输和多轴联动的激光加工装置[P], 中国专利, ZL98101217.5, 1998
- 5 Sun Jiaguang, Yang Changgui. Computer Graphics (new edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998  
孙家广,杨长贵. 计算机图形学(新版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998