

三维形貌测量机器人的轨迹规划技术

刘丽, 马国庆, 高艺*, 范师杰

长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 针对带有深孔特征的异型曲面三维形貌的测量需求, 提出基于 CAD(Computer Aided Design)数模提取信息进行自适应布点的方法和基于法向精度控制的轨迹规划测量方法。通过对机器人的位移-时间、速度-时间与加速度-时间曲线的仿真分析, 验证了运用高阶多项式插值法可得到平滑的轨迹曲线。通过基于法向精度控制的形貌测量实验分析形貌测量过程中 TCP(Tool Centror Point)的位置偏差与角度偏差, 发现位置偏差小于 0.092 mm, 角度偏差在 0.19°内, 证明了所提方法的可行性。

关键词 测量; 形貌测量; 机器人; 轨迹规划

中图分类号 P243.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0204005

Trajectory Planning Technology of Three-Dimensional Shape Measurement Robots

Liu Li, Ma Guoqing, Gao Yi*, Fan Shijie

College of Mechanical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Aiming at the requirements of three-dimensional shape measurement of profiled surfaces with the deep hole feature, a method based on CAD (Computer Aided Design) digital model extraction information for self-adaptability measurement and a trajectory planning measurement method based on normal precision control are proposed. The simulation analysis of the displacement-time, speed-time and acceleration-time curves of a robot verifies the smoothness of the trajectory curve obtained by the high-order polynomial interpolation method. The positional deviation and angular deviation of TCP (Tool Centror Point) in the process of shape measurement are verified by the shape measurement experiment based on the normal precision control. The position deviation is within 0.092 mm and the angular deviation is within 0.19°, which proves the feasibility of the proposed method.

Key words measurement; morphology measurement; robot; trajectory planning

OCIS codes 120.4640; 120.4880; 120.5800

1 引言

三维形貌测量往往要求测量系统具有较好的柔性、较高的测量精度和自动化程度。工业机器人是典型的柔性平台, 具有较高的运动灵活性, 光学非接触式扫描仪具有分辨率高、测量速度快等优点, 两者相结合搭建的三维形貌柔性测量系统可以兼具两者的优点。奥地利 JOANEUM 公司设计了一套能在恶劣环境中作业的机器人柔性测量系统, 在机器人

的末端安装三维扫描仪, 初始测量时, 首先基于被测工件的大小测量 10~20 个特征点, 利用这些特征点确定工件相对于机器人的位置和姿态, 将测量数据转化到机器人坐标系下, 然后把叠合的区域用作修正整体测量结果来提高测量精度, 最后把获得的测量结果和 CAD (Computer Aided Design) 模型进行比对, 以实现质量控制^[1]。美国 FARO 公司推出的 Cobalt Array Imager 形貌扫描仪是一款计量级的非接触式三维扫描仪, 可在数

收稿日期: 2018-09-10; **修回日期:** 2018-10-02; **录用日期:** 2018-10-24

基金项目: 吉林省科技发展计划(20160204016GX, 20180623031TC)、吉林省省级产业创新专项资金资助项目(2016C088, 2017C045-2)、长春理工大学青年科学基金(XQNJJ-2016-04, XQNJJ-2017-11)、吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20170626KJ)

* **E-mail:** magq@cust.edu.cn

秒内捕捉数百万个高分辨率的三维坐标测量数据,允许多成像仪阵列配置是其最大的特点,可以根据测量需求灵活配置扫描仪的个数,组成测量阵列,使其具有更大的扫描范围,能够进行快速、自动和全面的检测,极大地缩短了测量时间^[2]。三维形貌测量技术的研究主要集中在柔性测量、测量路径规划与机器人离线编程、测量数据处理等方面^[3-4]。以上研究均是针对外表面形貌的测量,并没有针对有深孔的工件的形貌测量,因为深孔对光的反射有一定的影响,容易造成点云数据缺失。本文针对带有深孔的表面形貌测量需求,提出了基于法向精度控制的形貌测量轨迹规划技术,并通过实验验证所提方法的可行性。

2 曲面测量规划

2.1 形貌测量要求

本测量系统针对的曲面零件拥有复杂的表面形貌,曲率变化不规律且往往带有深孔,扫描角度选取不当时可能造成测量数据的缺失,因此根据三维扫描仪的约束条件和深孔测量的要求,在进行扫描工作时,扫描仪的扫描约束条件如图 1 所示,其中 P 为被测表面上的点, A 为该点的单位法向量,

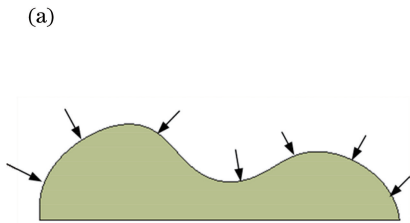


图 2 测量路径规划示意图。(a)路径法向指向;(b)规划的路径

Fig. 2 Schematic of planned measurement path. (a) Normal pointing of path; (b) planned path

2.2 测量路径布点策略

曲面测量方法主要有等步长测量法、自适应测量法、等弧长测量法、点光源激光测头速度仿真型测量法和圆弧插值测量法等^[6],其中应用最为广泛的是等步长测量法和自适应测量法^[7]。

等步长测量法是指在测量过程中对路径 L 进行等间隔采点,采样间隔 Δu 由起始点、终点和采样点数 N 来确定,即 $\Delta u = L / (N - 1)$ 。这种方法在曲面参数分布不均时容易出现曲率变化大的地方布点稀疏,而曲率变化小的地方布点却过于密集的问题。自适应测量法能够按照曲率变化大小进行布点,有利于提高数据处理效率和精度。本研究采用

scanner 表示扫描仪, B 为扫描仪射出的两条激光扫描边界线的平分线^[5],三维扫描仪发射光束的方向和被测点处曲面法向共线是光三角测量的重要假设,然而它们之间非特殊情况并不是共线,而是有一个夹角 θ 的存在。为获取深孔内表面的完整信息,在进行测量时要求确保机器人工具端的三维扫描仪沿着被测曲面零件表面的切向进行测量,即与被测曲面零件表面的法向保持一致,在进行法向精确控制的基础上完成测量路径规划及离线编程。测量系统的路径规划如图 2 所示,其中黑色箭头表示形貌传感器测量轴线方向,测量系统采用弓形测量方案。

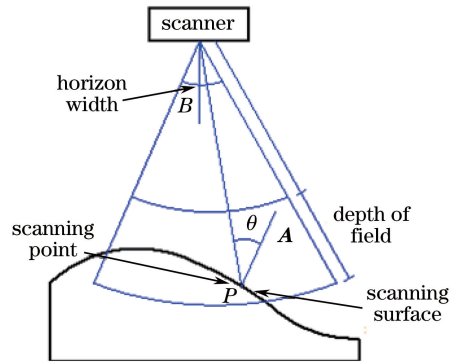
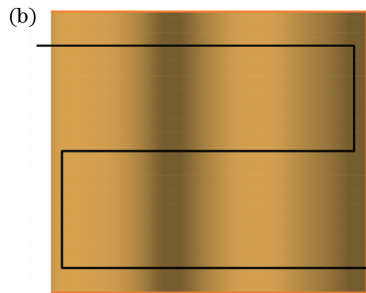


图 1 扫描仪的扫描约束示意图

Fig. 1 Schematic of scanning constraints for scanner



的控制弦高法便是自适应测量法的一种,其测量原理如图 3 所示。

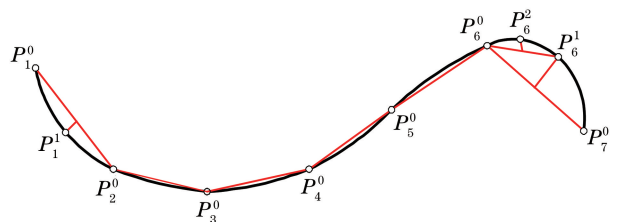


图 3 控制弦高法的测量过程

Fig. 3 Measuring process of controlling string height method

首先,为了确保测量路径上曲率变化较小的地方也能分布足够多的采样点,对曲线进行等步长测

量法布点;其次计算出区间内每一段曲线上的点到相应弦的最大距离 $L_i (i=1,2,\dots,n)$, i 为区间变量, $n=N-1$ 为区间的个数;最后,设定一个精度阈值 δ ,将最大距离 L_i 与精度阈值 δ 进行比较。若 $L_i > \delta$,说明在第 i 个区间上仅分布两个采样点是不合理的,应添加新的采样点,找到最大距离 L_i 在对应的曲线区间上的点后,以此点作为新弦线的一个端点,缩短采样区间继续进行迭代对比,直至缩短后的曲线在区间内的点到弦的最大距离小于精度阈值 δ 为止。若 $L_i < \delta$,说明在第 i 个采样区内不再需要迭代取点,若 $i+1$ 区间的 L_{i+1} 也小于 δ ,将 i 与 $i+1$ 区间进行合并,舍去共用点,将合并区间段曲线上的点到相应弦的最大距离 L'_i 与 δ 进行对比,若 L'_i 仍小于 δ ,则继续进行区间合并,直到合并区间的 L'_i 大于 δ 时终止,以上一个合并区间的末端点继续进行迭代删点;若 $i+1$ 区间的 L_{i+1} 大于 δ ,则说明在第 i 个区间仅在两端取采样点是合理的。最终生成的测点分布需要根据景宽条件进一步约束。

下面对控制弦高法的有效性进行验证。首先,在曲面上构造一条方程式为 $y = -x^2/8 + \cos x + x/10$ 的曲线,其中自变量 x 为区间 $[-10,10]$ 上的测量点, y 为由测量点构造的二次曲线的拟合值;其次,按照等步长测量法将区间 20 等分,共取 21 个初始测点;最后设置精度阈值 $\delta=0.05$,根据控制弦高算法在 MATLAB 软件中进行程序的编制并生成图像,如图 4 所示。根据图像显示,在曲线曲率变化较大的区间上新增加了 8 个测量点,在曲率变化较小的区间删除了 4 个测量点,从而实现了曲线自适应布点。作为对比,将相同的曲线在区间 $[-10,10]$ 内按照等步长测量法进行 24 等分布点,采样点数与控制弦高法最终得到的测点数相同。分别将控制弦高法与等步长测量法生成的布点与原始曲线方程进行

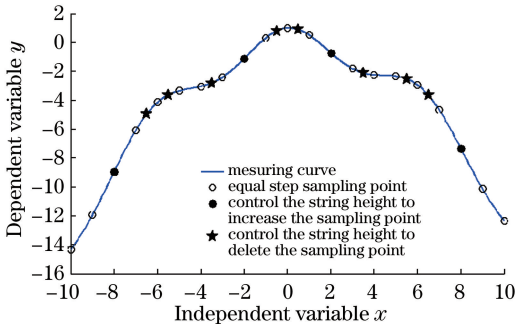


图 4 控制弦高法的测点分布

Fig. 4 Distribution of measurement points in controlling string height method

样条拟合,求出偏差 d_x 的曲线如图 5 所示。可以看出,控制弦高法求出的偏差曲线比等步长测量法求出的偏差曲线更加平缓,且在曲率变化大的区间偏差更小,这就验证了控制弦高法的有效性。

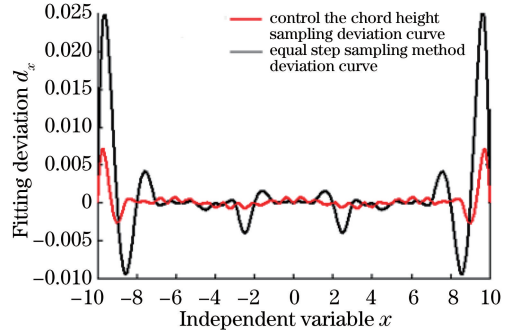


图 5 控制弦高法与等步长采样法的拟合偏差比较

Fig. 5 Fitting deviation comparison between controlling string height method and equal step sampling method

2.3 NURBS 曲面法线方向的计算

NURBS(Non-Uniform Rational B-Splines) 曲面的参数方程包括 u 和 v 两个变量,曲面的法线方向可以由 u 方向一阶偏导矢和 v 方向的一阶偏导矢叉乘得到的矢量方向来表示, u/v 方向的偏导矢用 Jacobi(雅可比)迭代法计算得到^[8]。

NURBS 曲面的双变量有理矢值函数 $S(u, v)$ 可用齐次坐标表示为

$$S^w(u, v) = \sum_{j=0}^k \sum_{l=0}^m N_{j,p}(u) N_{l,q}(v) P_{j,l}^w, \quad (1)$$

式中: $P_{j,l}^w = (\omega_{j,l} x_{j,l}, \omega_{j,l} y_{j,l}, \omega_{j,l} z_{j,l}, \omega_{j,l}) (j=0, 1, \dots, k; l=0, 1, 2, \dots, m)$ 为 $S^w(u, v)$ 的控制网格,其中 k 和 m 分别为 u 方向和 v 方向的控制顶点个数, $\omega_{j,l}$ 为对应于控制顶点的权因子; $N_{j,p}(u) (j=1, 2, \dots, k)$ 为 u 方向的 p 次基函数; $N_{l,q}(v) (l=1, 2, \dots, m)$ 为 v 方向的 q 次基函数; $S^w(u, v)$ 为张量积分段多项式曲面。

对(1)式进行求导可得:

$$N'_{j,p} = \frac{P_{j,l}^w}{u_{j+p} - u_i} N_{j,p-1}(u) + \frac{P_{j,l}^w}{u_{j+p+1} - u_{j+1}} N_{j+1,p-1}(u). \quad (2)$$

计算曲面 $S^w(u, v)$ 的 0 到 d 阶偏导矢:

$$\frac{\partial^{g+h}}{\partial u^g \partial v^h} S^w(u, v) = \sum_{j=0}^k \sum_{l=0}^m N_{j,p}^{(g)}(u) N_{l,q}^{(h)}(v) P_{j,l}^{(g,h)}, \quad (3)$$

式中: $P_{j,l}^{(g,h)} = (q-h+1) \frac{P_{j,l+1}^{(g,h-1)} - P_{j,l}^{(g,h-1)}}{v_{l+q+1} - v_{l+1}} (g+h)$,

g 和 h 为偏导数的阶数, $g+h=1, 2, \dots, d$ 。

由 $S^w(u, v)$ 的偏导矢可以计算出双变量有理

矢值函数 $S(u, v)$ 的偏导矢, 令

$$S(u, v) = \frac{\omega(u, v)S(u, v)}{\omega(u, v)} = \frac{A(u, v)}{\omega(u, v)}, \quad (4)$$

$$A(u, v) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^m N_{j,p}(u) N_{l,q}(v) \omega_{j,l} P_{j,l}^{\omega}, \quad (5)$$

式中: $\omega(u, v)$ 为调整权因子; $A(u, v)$ 为带调整权因子的双变量有理矢值函数。

对(4)式求导, S_{uu} 和 S_{vv} 分别为 $S(u, v)$ 在 u 方向和 v 方向的偏导, A_{uu} 和 A_{vv} 分别为 $A(u, v)$ 在 u 方向和 v 方向的偏导, $\omega_u, \omega_{uu}, \omega_v, \omega_{vv}$ 为调整权因子 $\omega(u, v)$ 求导所得参数, 可得

$$S_{uu} = \frac{A_{uu} - 2\omega_u S(u, v) - \omega_{uu} S(u, v)}{\omega(u, v)}, \quad (6)$$

$$S_{vv} = \frac{A_{vv} - 2\omega_v S(u, v) - \omega_{vv} S(u, v)}{\omega(u, v)}. \quad (7)$$

若表面上的点在参数空间的坐标为 (u, v) , 那么该点的曲面法矢量的表达式为

$$F = S_{uu} \times S_{vv}. \quad (8)$$

3 机器人的轨迹规划研究与仿真

从复杂曲面工件的 CAD 数模中提取出的路径曲线没有明确的函数表达式, 仅可测得路径曲线上各点的坐标信息。因此, 可以根据这些点的坐标信息, 用插值法构造一个函数近似代替未知路径的曲线函数。插值法是数学计算中一种常用的方法, 本研究选择三次样条插值函数对提取的测量路径进行函数逼近^[9]。

3.1 三次多项式插值

可用一个关于起点与终点关节角度值的平滑插值函数 $\theta(t)$ 来描述工业机器人末端执行器的运行轨迹。为保证各关节运动平稳, 插值函数 $\theta(t)$ 的初始点和终止点应满足关节角度与关节速度的 4 个约束条件:

$$\begin{cases} \theta(0) = \theta_0 \\ \theta(t_f) = \theta_f \\ \omega(0) = 0 \\ \omega(t_f) = 0 \end{cases}. \quad (9)$$

(9)式中, 起始点 $t=0$ 时的关节角 θ_0 为已知, 起始点 $t=0$ 时的关节速度 $\omega(0)$ 为 0, 终止点在 $t=t_f$ 时的关节角 θ_f 可通过运动学求出, 终止点 $t=t_f$ 时的关节速度 $\omega(t_f)$ 为 0, 选择如下三次多项式:

$$\theta(t) = A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + A_3 t^3, \quad (10)$$

式中: A_0, A_1, A_2, A_3 为三次多项式的参数。

由(9)式的约束条件可确定位移 $\theta(t)$ 、速度

$\omega(t)$ 和加速度 $a(t)$ 关于时间的函数:

$$\begin{cases} \theta(t) = A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + A_3 t^3 \\ \omega(t) = A_1 + 2A_2 t + 3A_3 t^2 \\ a(t) = 2A_2 + 6A_3 t \end{cases}, \quad (11)$$

将(9)式代入(11)式, 可得线性方程的 4 个参数:

$$\begin{cases} A_0 = \theta_0 \\ A_1 = 0 \\ A_2 = \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0) \\ A_3 = -\frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0) \end{cases}. \quad (12)$$

3.2 基于关节空间的轨迹规划仿真

为了更好地模拟三维扫描仪测量时的状态, 对机器人的运动轨迹进行仿真以完成各个关节角度、速度和加速度变化仿真分析。设起始点为 $[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, 终止点为 $[\pi/2 \ -\pi/2 \ -\pi/3 \ \pi/3 \ -\pi/6 \ \pi/5]$, 将机器人运动的起始点与终止点的速度均设为 0, 仿真时间的范围为 $0 \sim 15$ s, 步长为 0.1 s, 可得到机器人各关节随时间变化的运动曲线, 如图 6 所示, 机器人各关节的速度、加速度随时间变化曲线如图 7 和图 8 所示。由图 6~8 可以看到, 6 个关节的位置、速度以及加速度曲线呈现很光滑的趋势, 没有出现不连续及突变现象。

4 形貌测量实验及离线编程验证

实验所搭建的三维形貌柔性机器人测量系统主要由工业机器人、三维扫描仪、机器人控制柜以及离线编程软件构成。

4.1 基于 CAD 数模的形貌测量布点

1) 形貌测量路径规划

在复杂曲面形貌测量时, 被测工件的 CAD 数模已知, 需要对数模进行信息提取与处理, 以完成形貌测量布点, 对数模进行上表面提取, 并进行弓形测量路径规划, 结果如图 9 所示。

2) 三次样条插值

为完成形貌测量自适应布点, 需要对测量路径曲线进行点位坐标信息提取, 并用三次样条插值解得插值曲线方程。

第一步, 在路径曲线平面内建立坐标系, 为了得到更精准的插值曲线, 对路径曲线进行 100 等分布点, 并提取每一点相对于建立的坐标系的位置信息。

第二步, 根据提取的路径点坐标信息, 运用 2.1 节中介绍的三次样条插值, 以图 9(d) 中第一条路径曲线为例, 该路径曲线的插值图像如图 10 所示。

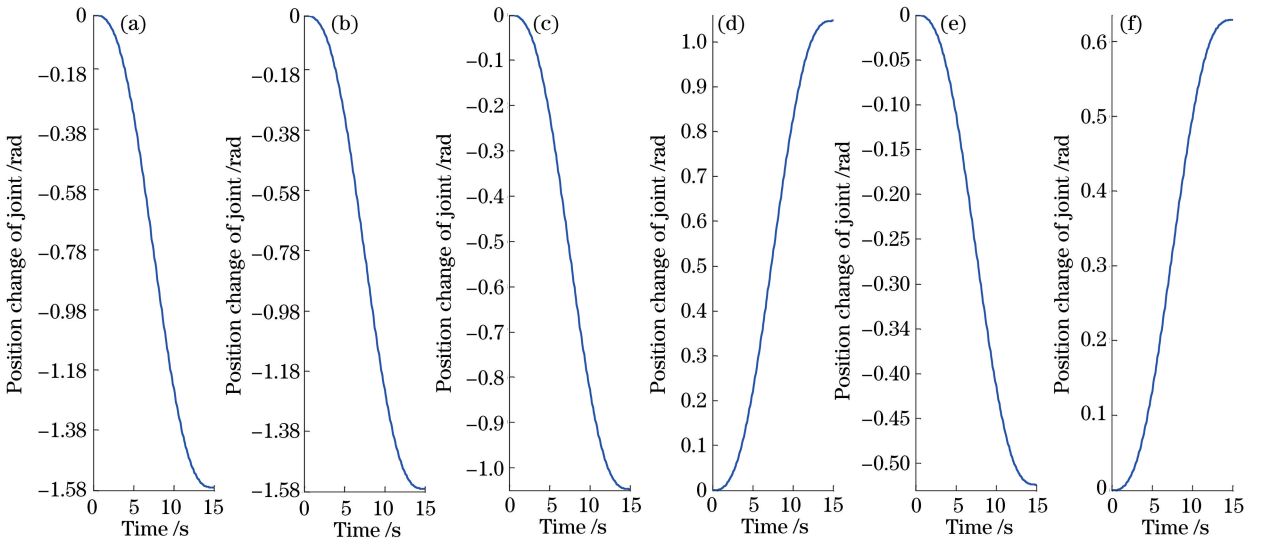


图 6 不同关节的位置变化曲线。(a)关节 1;(b)关节 2;(c)关节 3;(d)关节 4;(e)关节 5;(f)关节 6

Fig. 6 Position change of different joints. (a) Joint 1; (b) joint 2; (c) joint 3; (d) joint 4; (e) joint 5; (f) joint 6

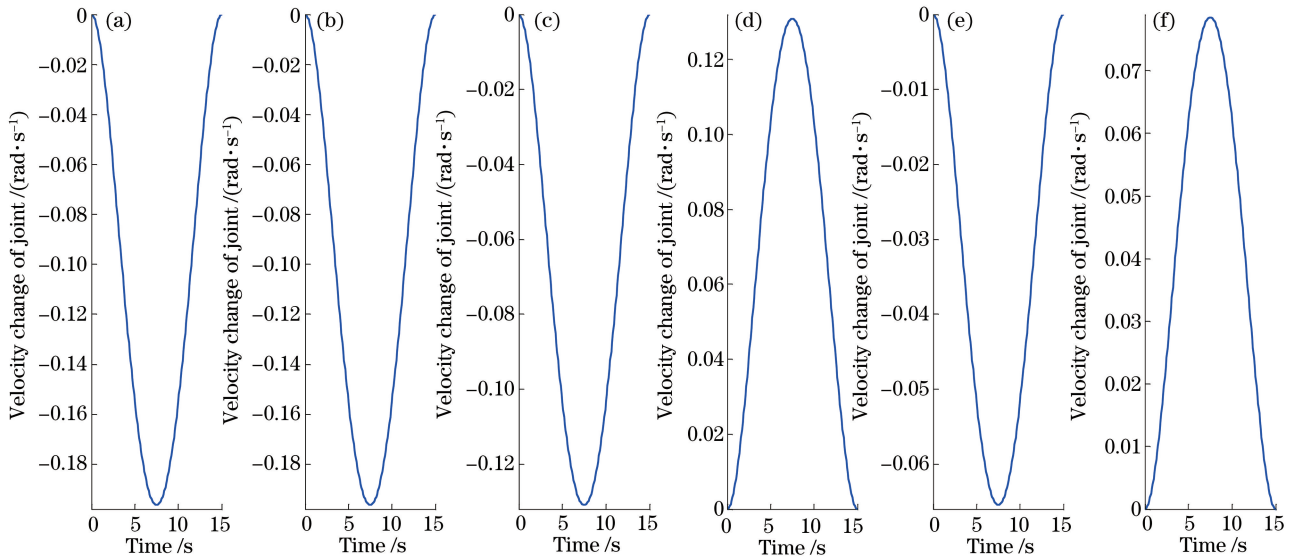


图 7 不同关节的速度变化曲线。(a)关节 1;(b)关节 2;(c)关节 3;(d)关节 4;(e)关节 5;(f)关节 6

Fig. 7 Velocity change of different joints. (a) Joint 1; (b) joint 2; (c) joint 3; (d) joint 4; (e) joint 5; (f) joint 6

3) 控制弦高法自适应布点

为了提高采样效率,根据 1.2 节中介绍的控制弦高法来完成自适应布点,以插值得出的三次样条函数为基础,根据扫描条件,将函数定义域 20 等分,设定精度阈值 $\delta=1$ 。第一条路径曲线按照控制弦高法新增加 8 个点,删除 1 个点,如图 10 所示;第二条路径曲线按照控制弦高法新增加 7 个点,删除 1 个点,如图 11 所示。这两条路径曲线均满足景宽约束条件。

4.2 基于法向精度控制的形貌测量实验

被测对象为双拱形带有深孔的异形曲面,要对其形貌和深孔位置信息进行测量,首先对德国

GOM 公司生产的 ATOS 三维扫描仪进行标定,并对机器人和三维扫描仪进行手眼标定。然后根据上述完成的形貌测量自适应布点,结合 2.3 节 NURBUS 曲面法线求取方法,将形貌测量离线仿真的 tag 点建立在每一个测量布点上,并且使 tag 点坐标轴的 Z 轴与每一点的法线方向重合,根据三维扫描仪的最佳测量距离,实验中将 TCP (Tool Centror Point) 设定在垂直镜头中心 550 mm 处,使三维扫描仪在测量点处工具中心点的 Z 轴与 tag 点的 Z 轴重合,控制其法向测量精度。

为了使机器人不出现奇异位姿,且要使各个关节的位置、速度以及加速度变化连续无突变,对其进

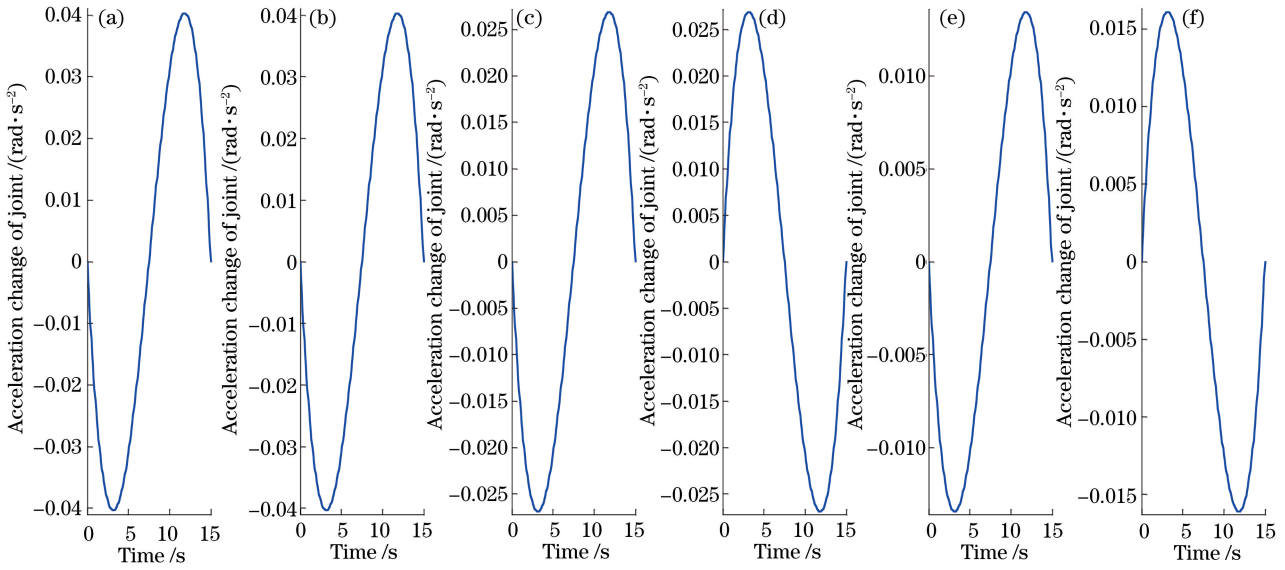


图 8 不同关节的加速度变化曲线。(a)关节 1;(b)关节 2;(c)关节 3;(d)关节 4;(e)关节 5;(f)关节 6

Fig. 8 Acceleration change of different joints. (a) Joint 1; (b) joint 2; (c) joint 3; (d) joint 4; (e) joint 5; (f) joint 6

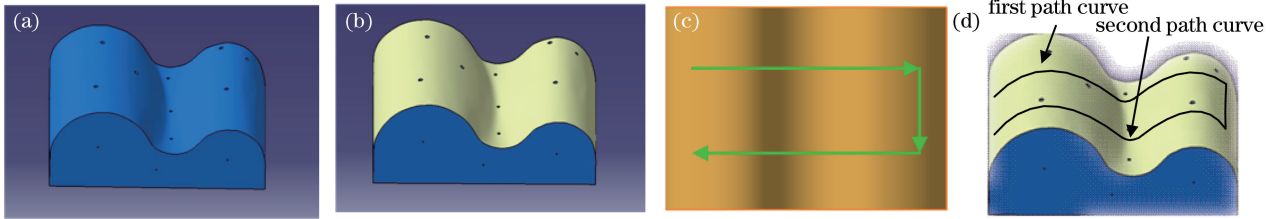


图 9 弓形测量路径的规划。(a) CAD 数模;(b)表面提取;(c)路径规划;(d)路径曲线提取

Fig. 9 Bow measurement path planning. (a) CAD digital model; (b) surface extraction; (c) path planning; (d) path curve extraction

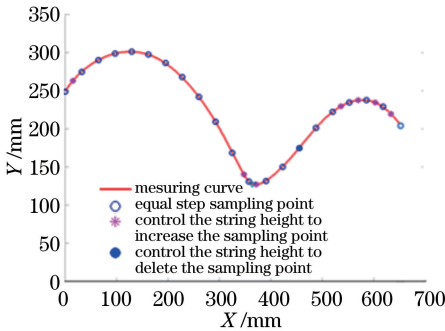


图 10 基于图 9(d)中第一条路径曲线的控制弦高法布点

Fig. 10 Controlling string height point based on first path in Fig. 9(d)

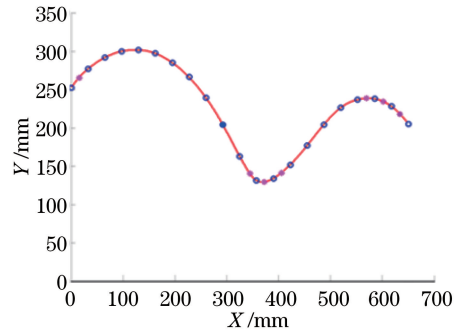


图 11 基于图 9(d)中第二条路径曲线的控制弦高法布点

Fig. 11 Controlling string height point based on second path in Fig. 9(d)

行控制弦高法自适应布点,在关节空间进行轨迹规划仿真。完成仿真后,利用仿真软件的后处理功能生成修正后的机器人程序,并将其下载到真实的机器人中完成曲面测量。在测量过程中对真实机器人 TCP 的位姿进行记录并与仿真值进行对比,仿真值和真实值的坐标信息如表 1 所示(篇幅所限,随机选取 10 组 tag 点,表中 tag 点后数字为标号),其中 M 为仿真环境下 TCP 点的位姿信息[包括位置分量和

姿态分量,其中位置分量 x, y, z 的单位为 mm,姿态分量 R_x, R_y, R_z 的单位为($^\circ$)], M' 为真实测量环境下 TCP 点的位姿信息[包括位置分量和姿态分量,其中位置分量 x, y, z 的单位为 mm,姿态分量 R_x, R_y, R_z 的单位为($^\circ$)]。

通过对表 1 的数据进行对比分析,真实 TCP 点位姿信息与仿真 TCP 点位姿信息间的最大位置偏差为 0.092 mm,最大角度偏差为 0.19 $^\circ$,证明在实际

三维形貌测量作业时,三维扫描仪的扫描方向与被测工件表面法向保持一致;在对大型复杂曲面进行

形貌测量时,测量结果不会受到深孔对光反射的影响,可以获得完整的测量信息。

表 1 仿真 TCP 位姿和真实 TCP 位姿的对比

Table 1 Comparison between simulated and real TCP poses

Tag point	$M(x, y, z, R_x, R_y, R_z)$	$M'(x, y, z, R_x, R_y, R_z)$
Tag 3	1043.951,1101.326,340.007,-121.939,-1.219,2.234	1044.028,1101.403,340.084,-121.862,-1.142,2.311
Tag 5	1061.366,1010.961,439.843,-114.731,-1.063,1.485	1061.446,1011.04,439.923,-114.651,-0.983,1.564
Tag 8	1146.358,85.120,836.302,-70.562,1.499,-0.085	1146.377,85.139,836.321,-70.543,1.517,-0.066
Tag 13	1160.174,-392.915,751.004,-49.187,2.020,0.763	1160.223,-392.866,751.096,-49.138,2.068,0.812
Tag 19	1117.789,-423.538,748.039,-47.154,0.300,0.214	1117.834,-423.493,748.083,-47.109,0.344,0.258
Tag 32	1092.222,-597.589,663.185,-38.048,-0.604,-0.285	1092.286,-597.524,663.249,-37.983,-0.539,-0.22
Tag 38	1087.016,-746.143,554.545,-28.952,-0.612,-0.547	1087.087,-746.072,554.616,-28.881,-0.541,-0.476
Tag 43	112.633,276.764,951.199,-469.631,0.152,-0.01	112.7085,276.839,951.274,-469.556,0.227,0.065
Tag 48	1119.686,1016.925,728.744,-100.374,0.664,-0.211	1119.714,1016.953,728.772,-100.346,0.692,-0.183
Tag 62	1395.585,1032.653,708.014,-100.854,0.648,0.028	1395.653,1032.721,708.082,-100.786,0.715,0.095

对测量得到的三维点云数据进行预处理和封装,结果表明测量系统可以完整地还原被测工件的形貌,并有效保留被测工件的孔的特征,具有对于大尺寸的高曲率连续曲面进行测量的能力。将测量的点云预处理之后进行拼接处理,将测量点云拼接成三角网格形式,再与工件的 CAD 理论数模进行最佳拟合对齐,并进行 3D 偏差分析,其偏差分析结果如图 12 所示。结果显示,点云的拼接精度在 0.1 mm 以内,偏差分布较为均匀,测量精度较高。

进行研究,为法向布点提供数学理论基础,通过对机器人的位移-时间、速度-时间与加速度-时间曲线进行分析,发现高阶多项式插值法可得到平滑的轨迹曲线。基于法向精度控制的形貌测量实验,验证了形貌测量过程中 TCP 的位置偏差与角度偏差,位置偏差在 0.092 mm 以内,角度偏差在 0.19° 内,证明了所提出的基于法向精度控制的轨迹测量方法具有可行性。

参 考 文 献

[1] Xie Z X, Chen W Z, Chi S K, *et al.* Industrial robot positioning system based on the guidance of the structured-light vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1015001.
解则晓, 陈文柱, 迟书凯, 等. 基于结构光视觉引导的工业机器人定位系统[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1015001.

[2] Heller J, Henrion D, Pajdla T. Hand-eye and robot-world calibration by global polynomial optimization [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2014: 3157-3164.

[3] Ma G Q, Liu L, Zhang R Y, *et al.* Kinematics analysis and measurement path planning research of complex curved surface measurement robot [J]. *Manufacturing Automation*, 2017, 39(1): 80-84.
马国庆, 刘丽, 张若妍, 等. 复杂曲面测量机器人运动学分析及测量路径规划研究[J]. *制造业自动化*, 2017, 39(1): 80-84.

[4] Xie X H, Sun L N, Cheng Y. Off-line program based robotic compliant grinding method and experiment [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2016, 40(5): 619-625.
谢小辉, 孙立宁, 程源. 基于离线编程的机器人柔顺打磨方法及实验[J]. *南京理工大学学报(自然科学*

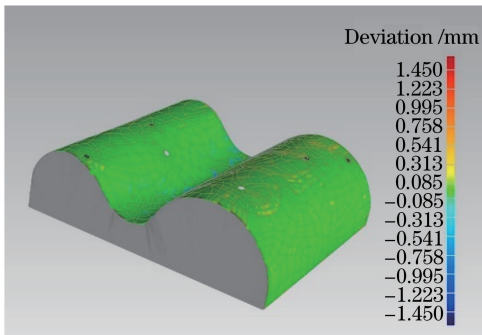


图 12 被测工件的测量数据的偏差分析结果

Fig. 12 Deviation analysis result of measurement data of measured workpiece

5 结 论

提出了一种根据 CAD 数模提取信息进行自适应布点的方法和基于法向精度控制的轨迹规划测量方法,通过对曲面测量的要求进行分析,用三次样条插值对扫描路径进行函数逼近,用控制弦高法自适应布点以提高测量布点的精准性和测量效率,并与传统的等布局测量方法进行偏差对比,证明控制弦高法在曲率变化较大处的偏差更小,且具有更好的整体平缓性。同时对 NURBS 曲面法线的计算方法

- 版), 2016, 40(5): 619-625.
- [5] Wang P, Shi R Z, Zhong X F, *et al.* 3D scanning measurement system based on double-line projection and the line-plane constraint[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 140-146.
王鹏, 史瑞泽, 钟小峰, 等. 基于双线投影与线面约束的3D扫描测量系统研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 140-146.
- [6] Xie Z X, Chi S K, Wang X M, *et al.* Calibration method for structure-light auto-scanning measurement system based on coplanarity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0308003.
解则晓, 迟书凯, 王晓敏, 等. 基于共面法的结构光自扫描测量系统参数标定方法[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0308003.
- [7] Xu Y Y, Shi K, Wang Y W, *et al.* Research progresses of phase-shifting interferometry technology and phase shift extraction method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020004.
徐媛媛, 时刻, 王亚伟, 等. 相移干涉技术及相移获取方法研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 020004.
- [8] Xiao Y F, Xiao J, Wang Y. The parallel methods of simultaneous equations in discontinuous deformation analysis [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 35(1): 118-125.
肖云帆, 肖俊, 王颖. 非连续变形分析中方程组的并行化求解方法[J]. *中国科学院大学学报*, 2018, 35(1): 118-125.
- [9] Qiang N, Gao J, Kang F J. Multi-robots global path planning based on PSO algorithm and cubic spline [J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(7): 1397-1404.
强宁, 高洁, 康凤举. 基于 PSO 和三次样条插值的多机器人全局路径规划[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(7): 1397-1404.