

文章编号: 0258-7025(2010)11-2937-08

# 激光再制造机器人待加工零件形貌三维重建

张海明 杨洗陈 高 贵

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

**摘要** 采用双目摄像机结合结构光组成主动视觉测量系统,并与机器人耦合,构建了一种具有视觉功能的智能激光加工机器人,能够感知各种复杂曲面轮廓,重建三维形貌。系统由六自由度机器人、双目摄像机和结构光发射器组成。机器人带动双目摄像机和结构光发射器运动,既实现多视角测量,消除测量中的“死角”,重建工件的完整三维形貌,又将测量到的点云数据转换到机器人坐标系。阐述了测量原理和数学模型,进行了单摄像机内外参数的标定,双目摄像机相对关系的标定,双目摄像机与机器人之间的手眼关系标定,得到摄像机内参数矩阵,手眼关系矩阵,机器人与世界坐标系关系矩阵。对双目图像进行大步距图像分割,提取目标区域,平滑降低图像噪声,重心法提取亚像素级结构光条纹中心,根据极线约束进行左右条纹配准,三维算法得到空间点坐标,可方便地转换到世界坐标系,实现全局坐标的统一。

**关键词** 激光技术;再制造;机器视觉;激光扫描;工业机器人;机器人标定;图像处理;三维重建

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103711.2937

## 3D Reconstruction of Parts to be Processed by Laser Remanufacturing Robot

Zhang Haiming Yang Xichen Gao Gui

(Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

**Abstract** An intelligent laser processing robot with active vision composed of binocular stereo camera and structure light is developed in this paper. It can measure a variety of complex surface and reconstruct its 3D shape. The system consists of a robot with six degrees of freedom, binocular cameras and structure light. Cameras and structure light emitter are fixed on the robot and follow the robot movement, which accomplishes multi-angle measurement to eliminate “dead space”, as well as transforms point cloud data to the robot coordinate. In this paper, measurement principle and mathematical model are described. Inside and outside parameters of single-camera calibration, the relative relationship between binocular camera calibration, binocular camera and robot hand-eye relationship calibration are carried out to obtain the parameters of camera matrix, hand-eye matrix, robot-world matrix. The target is extract by big step segmentation, and the image is smoothed to reduce noise. Sub-pixel center of structure light is extracted by gravity algorithm, and the left and right image is registrated according to the epipolar constraint. Point coordinate calculated by 3D algorithm, can be easily converted to the world coordinate to achieve the unity of the global coordinates.

**Key words** laser technique; remanufacturing; machine vision; laser scanning; industrial robots; robot calibration; image processing; 3D reconstruction

## 1 引 言

激光再制造机器人是面向 21 世纪的先进修复手段,应用前景十分广阔<sup>[1]</sup>。随着再制造行业不断

发展,待修复的零部件结构复杂程度和加工精度越来越高,修复难度越来越大。但是,目前的激光加工机器人普遍缺乏机器视觉功能和离线编程能力。为

收稿日期: 2010-03-11; 收到修改稿日期: 2010-06-29

基金项目: 天津市科技支撑计划重点项目(08ZCKFGX02300)资助课题。

作者简介: 张海明(1985—),男,硕士研究生,主要从事机器视觉方面的研究。E-mail: favor188@gmail.com

导师简介: 杨洗陈(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事激光材料相互作用和激光加工理论及应用等方面的研究。

E-mail: yangxich@126.com

了实现修复自动化,要求激光再制造机器人具有视觉功能,能够感知各种复杂曲面轮廓,重建待修复零件的三维形貌<sup>[2]</sup>,同时具有智能性,对缺损部位、损坏程度做出准确判断,给出修复路径,对加工位置进行导引<sup>[3,4]</sup>。因此,开展激光再制造机器人视觉技术研究具有重要的理论意义和实用价值。

目前常用的零件三维测量工具有:三坐标激光扫描仪<sup>[5]</sup>、关节臂激光扫描头和手持式三维激光扫描仪等。这些工具体积庞大,扫描出的数据隶属于独立的坐标系,较难与机器人坐标系统一,不方便机器人加工。另外,这些工具不开放,无法与激光再制造机器人耦合,且价格昂贵。

本文提出了一种基于双目电荷耦合元件(CCD)/互补金属氧化物(CMOS)的非接触式立体视觉系统,它可以给出物体的三维几何信息,重建物体三维形貌,具有精度高、测量速度快等优点。它方便与机器人耦合,机器人带动机器视觉系统运动,可以实现多视角测量,消除“死角”,将采集到的数据直接转换到机器人坐标系,实现全局坐标的统一,用于机器人对零件进行激光修复再制造。

## 2 三维扫描和重建系统

### 2.1 三维扫描装置

图1为三维扫描装置结构示意图。它由两台CMOS工业相机(图1中1和3)和一台激光二极管(LD)(图1中2)组成。CMOS相机主要技术参数:分辨率1280 pixel×1024 pixel,帧频45 frame/s。LD主要技术参数:输出波长532 nm,输出功率100 mW,光斑模式:TEM<sub>00</sub>。

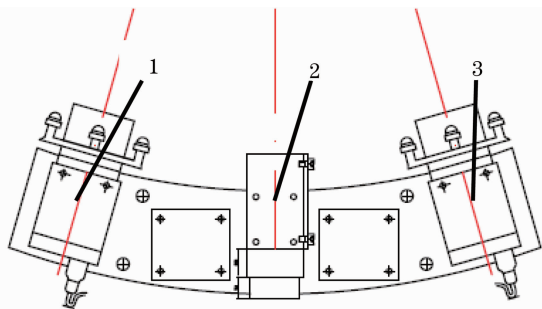


图1 三维扫描装置结构

Fig.1 System hardware architecture

两相机被固定在同一底板上。图1中虚线2为结构光光轴,虚线1,3为摄像机光轴。为使两相机的公共视场更大,两相机光轴夹角选为30°。激光器向被测物体投射结构光,用于被测物体特征点提取和匹配,只要结构光在两摄像机公共视场内,

就能够完成特征点的提取与匹配。对结构光光源的摆放没有严格要求,结构光光轴与摄像机光轴不要求统一,这样既降低了制作与安装的难度,又避免了制作与安装的误差,有利于提高测试精度。

### 2.2 扫描装置与激光机器人加工头耦合结构

图2为扫描装置与机器人加工头耦合结构示意图。图2左侧为结构主视图,右侧为右视图。激光加工头通过专用夹具与机器人手臂末端成135°相连。三维扫描装置固定在激光加工头上,CMOS相机光轴与图2中2激光加工头光轴成45°。CMOS相机与激光加工头焦点的距离以300~400 mm为好,这里选为350 mm。

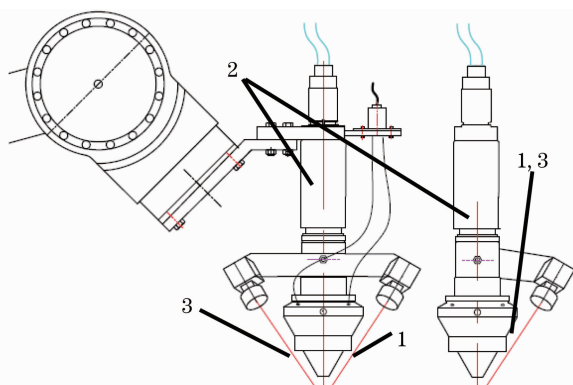


图2 扫描装置与机器人耦合结构

Fig.2 Structure of scanning device coupled with robot

## 3 系统标定

本部分包括单摄像机的标定,求取摄像机内外参数矩阵 $M_l, M_r$ <sup>[4]</sup>;双目摄像机相对位置标定,按变换矩阵 $M_{l-r} = [R_{l-r} \quad T_{l-r}]$ 求取;双目摄像机与机器人末端的手眼关系标定,按变换矩阵 $M_{h-e} = [R_{h-e} \quad T_{h-e}]$ 求取<sup>[6]</sup>。其中l表示左相机,r表示右相机,l-r表示由左相机到右相机;h表示机器人手部坐标系,e表示眼部即摄像机;h-e表示由手部到眼部。

### 3.1 单摄像机标定

采用2D棋盘式黑白相间平面靶标,8行12列,方格大小20 mm×20 mm。标定出摄像机内部参数和相对于某一幅图像的外部矩阵 $M_l, M_r$ 及相对于同一幅靶标图像的外部参数 $R_l, T_l, R_r, T_r$ 。

### 3.2 双目摄像机相对关系的标定

双目立体视觉中左右摄像机的外部参数分别为 $R_l, T_l$ 与 $R_r, T_r$ 。 $R_l, T_l$ 表示左摄像机与世界坐标系的相对位置, $R_r, T_r$ 表示右摄像机与世界坐标系的相对位置,两个摄像机之间的关系 $R_{l-r}, T_{l-r}$ 为

$$R_{l-r} = R_l R_r^{-2},$$

$$T_{l-r} = T_r - R_r R_l^{-1} T_l \quad (1)$$

实验中,使用双摄像机对同一标定模板同时标定,得到  $R_l, T_l$  与  $R_r, T_r$ 。双摄像机的相对关系矩阵  $R_{l-r}, T_{l-r}$  根据(1)式计算。

标定完毕后以左摄像机坐标系原点(摄像机光心)为世界坐标系绘制的与左、右摄像机及标定靶标之间的关系。图3为双目相机外结构参数的三维示意图。

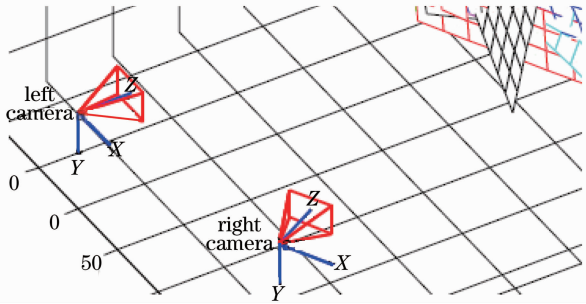


图3 双目摄像机标定结果

Fig. 3 Relative relationship between binocular camera

### 3.3 双目摄像机与机器人手眼标定

三维扫描装置检测出的数据位于 CMOS 相机坐标系。经坐标变换,由相机坐标系(eye)变换到机器人末端坐标系(hand)。由于机器人末端(hand)与加工头末端(tool)通过专门设计的夹具连接,必须根据夹具几何尺寸将测量到的模型数据由机器人末端坐标系(hand)变换到加工头坐标系(tool),以此来实现全局坐标系的统一。再配合不同的工艺参数,如离焦量、搭接率等来实现对加工过程的引导<sup>[7]</sup>。

摄像机固定在机器人末端,靶标位置固定,控制机器人末端从位置1移动到位置2和3,在三个位置上分别做摄像机标定,如图4所示,求出其外参数。由机器人示教盒读出末端平台运动参数,计算得出  $R_{h-e}, T_{h-e}$ 。



图4 机器人手眼标定

Fig. 4 Hand-eye calibration

## 4 三维重建实验

零件三维重建处理流程步骤包括:零件表面激光扫描、扫描图像采集、目标提取、图像处理、零件3D重建,如图5所示。

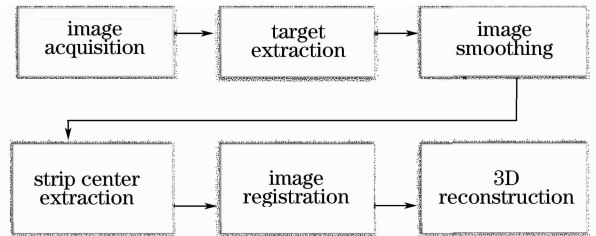


图5 系统流程图

Fig. 5 System flow

### 4.1 零件表面激光扫描

在 FANUC R2000iB 工业机器人上,用本系统对零件表面进行三维扫描,如图6(a)所示。系统具有两种扫描模式:低速高精度扫描(小于5 mm/s)和高速普通扫描模式(小于100 mm/s)。本实验中采用高精度扫描模式。扫描时,用示教盒控制机器人沿被测量工件从不同角度缓慢运动,完成对工件扫描。扫描实验工件选取3件:钢筋矫直辊、角板和缸筒,如图6(b),(c),(d)所示。

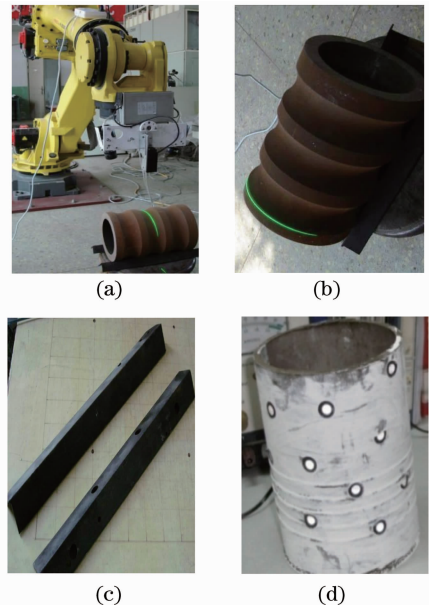


图6 (a) 试验现场,(b)钢筋矫直辊,(c)角板,(d)缸筒

Fig. 6 (a) Scanning system, (b) reinforced straightening roller, (c) angle plate, (d) cylinder

### 4.2 图像处理

#### 4.2.1 目标区域提取

采集到的图像分辨率较大,对整幅图像进行处

理运算量太大,无法满足实时测量的要求。本节利用大步距快速搜索方法提取目标区域。首先计算图像背景灰度,分别在图像水平行和垂直行以一定间隔画线,沿这些线对各个像素点的灰度累加,取均值作为图像的背景灰度,表示为

$$B = \frac{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^{N_1} I(i, 10j) + \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^H I(i0, 1j)}{N_2 W + N_2 H}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} X_{\max} &= \max\{i : [I(i, 10j1) - B > T_1] \vee [I(10i1, j) - B > T_1]\}, \\ X_{\min} &= \min\{i : [I(i, 10j1) - B > T_1] \vee [I(10i1, j) - B > T_1]\}, \\ Y_{\max} &= \max\{j : [I(i, 10j1) - B > T_1] \vee [I(10i1, j) - B > T_1]\}, \\ Y_{\min} &= \min\{j : [I(i, 10j1) - B > T_1] \vee [I(10i1, j) - B > T_1]\}, \\ 1 \leq i \leq W, 1 \leq j \leq H, i1 &= \text{Int}(i/10), j1 = \text{Int}(j/10). \end{aligned} \quad (3)$$

结果如图 7 所示。

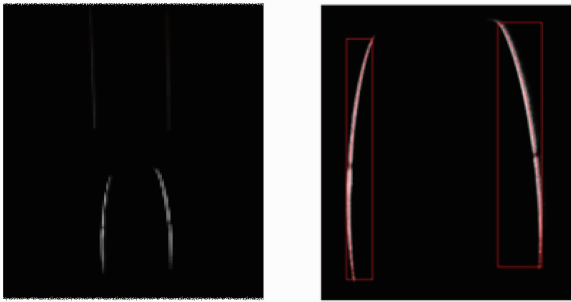


图 7 目标区域提取

Fig. 7 Extraction of target area

#### 4.2.2 图像平滑

图像在生成和传输过程中常受到各种噪声源的干扰和影响。噪声恶化了图像质量,使图像模糊,甚至淹没特征。消除图像噪声的工作被称之为图像平滑或滤波,平滑的目的就在于消除混杂在图像中的干扰,改善图像质量,强化图像表现特征,提高后续工作(如边缘提取)的精度<sup>[8]</sup>。

从频谱上看,噪声特别是随机噪声是一种具有较高频谱分量的信号。平滑是通过一定的手段滤去这类信号,使图像经过一个二维的低通数字滤波器,让高频信息得到较大的衰减。在空间域上进行的这种滤波实际上就是对图像和滤波器的冲击响应函数进行卷积。设图像为  $f(x, y)$ , 滤波器的冲击响应函数为  $H(x, y)$ , 则卷积表达式为

$$g(u, v) = \sum_x \sum_y f(x, y) H(u - x + 1, v - y + 1). \quad (4)$$

式中  $W$  为图像宽度;  $H$  为图像高度;  $N_1 = \text{Int}(H/10)$ ,  $N_2 = \text{Int}(W/10)$ ,  $\text{Int}$  表示取整;  $I(x, y)$  为像素点  $(x, y)$  的灰度。

激光束的灰度值大于背景灰度。沿上述直线搜索,记录灰度大于  $B + T_1$  的像素点坐标,从中找出水平和垂直方向的最大、最小坐标,确定目标所在的区域,搜寻方法表示为

文中采用的冲击响应函数为

$$H = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

图 8 为对结构光平滑降噪的局部放大图。

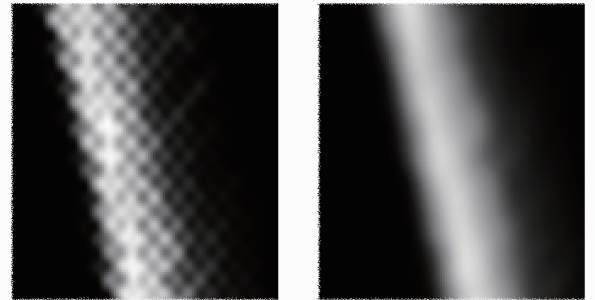


图 8 图像平滑降低噪声

Fig. 8 Smooth image to reduce noise

#### 4.2.3 结构光条纹中心提取

线结构光是由激光器产生的点光源经圆柱透镜调制后形成的单色线激光。理想情况下,激光条纹光强符合高斯分布,其数学表达式为

$$G(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (6)$$

式中  $A$  为幅值,表示曲线高度,  $\sigma$  为标准差,代表曲线跨度,  $a$  为均值,即条纹中心<sup>[9]</sup>。

截面方向上的光强分布如图 9 所示。

传统的提取中心算法可分为两类:1)提取光条的几何中心法,如阈值法、中心法等;2)提取光条的能量中心法,如极值法、重心法和拟合法等。提取几何中心算法简单,运行速度快,但精度低,受阈值与

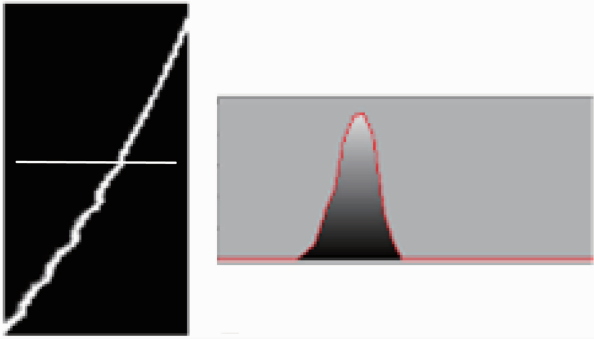


图 9 结构光条纹截面光强分布

Fig. 9 Structured light intensity distribution

噪声影响较大。极值法原理是获取光强曲线的最大灰度值。重心法是计算光强的重心,其精度相对极值法有较大提高。这里采用重心法提取条纹中心,提取算法为

$$(x_n, y_n) = \frac{\sum_{l=0}^{l=\lambda} f(l, y_n) l}{\sum_{l=0}^{l=\lambda} f(l, y_n)} \quad (7)$$

图 10 为条纹提取界面的局部放大。

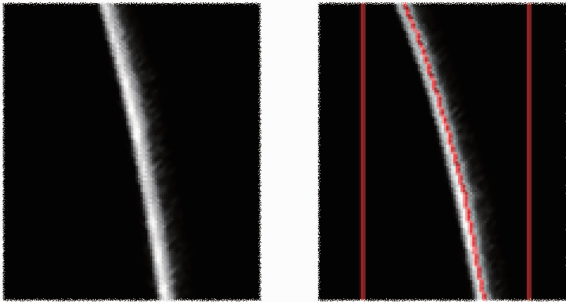


图 10 条纹中心提取

Fig. 10 Strip center extraction

提取出来的点序列如图 11 所示,其中左侧是最大分辨率提取出的条纹中心,右侧是 10%分辨率提取出的条纹中心。

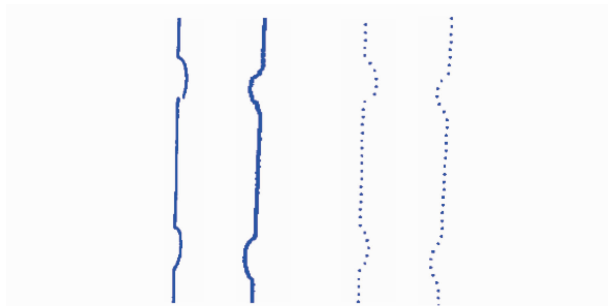


图 11 提取的结果

Fig. 11 Results of extraction

#### 4.2.4 双目图像的配准

已知两空间点在左右摄像机中的图像坐标,就可

得到该点的三维空间坐标。极限几何讨论的是两个摄像机图像平面的关系,在双目立体视觉测量中两幅图像对应点匹配有着重要作用。文献[10]提出了一种快速双目立体视觉匹配算法,运算速度较快,但该算法只适用于平行双目立体视觉系统。这里提出了一种适用于两个任意放置的相机构成的立体视觉系统。

如图 12 所示,左摄像机平面  $I$ ,光心  $C$ ,右摄像机平面  $I'$ ,光心  $C'$ 。 $M$  点在左摄像机平面投影  $m$ ,在右摄像机投影  $m'$ 。 $CC'$ 与左右摄像机平面的交点分别为  $e, e'$ ,则  $me$  和  $m'e'$  同为外极线。

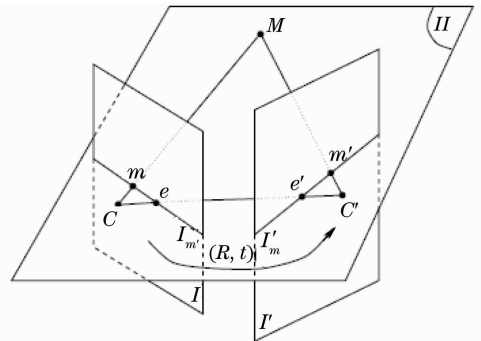


图 12 极线几何约束关系

Fig. 12 Epipolar geometry constraint relations

两个摄像机的投影方程消去  $X$  得到

$$s_r p_r - s_l M_{r1} M_{l1}^{-1} p_l = m_r - M_{r1} M_{l1}^{-1} m_l \quad (8)$$

如果  $t = (t_x, t_y, t_z)^T$ ,称  $[t]_x$  为由  $t$  定义的反对称矩阵

$$[t]_x = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix}$$

令  $m = m_r - M_{r1} M_{l1}^{-1} m_l$ ,

$$[m]_x (s_r p_r - s_l M_{r1} M_{l1}^{-1} p_l) = [m]_x m = 0, \quad (9)$$

$$p_r^T [m]_x M_{r1} M_{l1}^{-1} p_l = 0. \quad (10)$$

令  $F = [m]_x M_{r1} M_{l1}^{-1}$ ,则(10)式可写成

$$p_r^T F p_l = 0, \quad (11)$$

式中  $F$  称为基本矩阵。基本矩阵实际上包括双目立体视觉测量系统的所有参数,即两个摄像机的内部参数  $A_l, A_r$  和视觉系统的结构参数  $R, T$ 。它只与测量系统的参数有关,与外部场景无关,是双目立体视觉内在的一种约束关系。它给出了  $p_l$  与  $p_r$  必须满足的关系。在给定  $p_l$  的情况下,(11)式是一个关于  $p_r$  的线性方程,即  $I_r$  图像上的极线方程。 $F$  通过标定已得到。已知左图像上一点,便能得到右图像上一条极线方程,在这条极线上搜寻与之对应的特征点,完成匹配。

提取出来的点定义为

$$P_{left} = \{F_i \mid F_i = (x_i, y_i, 1) \in R^3, i = 1, 2, \dots, k\},$$

$\mathbf{P}_{\text{right}} = \{F_r \mid F_r = (x_i, y_i, 1) \in R^3, i = 1, 2, \dots, m\}$ , 式中  $\mathbf{P}_{\text{left}}$  和  $\mathbf{P}_{\text{right}}$  分别为  $k \times 3$  和  $m \times 3$  矩阵。配准问题转化为  $\mathbf{P}_{\text{left}}$  和  $\mathbf{P}_{\text{right}}$  中元素的匹配, 减少了配准的运算量, 提高配准速度, 使配准问题大大简化。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m & y_m & 1 \end{bmatrix} \mathbf{F} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_k \\ y_1 & y_2 & \dots & y_k \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mk} \end{bmatrix} \quad (12)$$

经过(12)式得到矩阵  $\mathbf{A}$ , 在  $\mathbf{A}$  的每一列中搜寻绝对值最小的数值, 假设它在矩阵中的索引为  $\text{index\_line}$ ,  $\text{index\_row}$ , 则配准后的图像坐标为

$$\mathbf{Q}_{\text{left}} = \{F_l \mid F_l = (x_{\text{index\_row}}, y_{\text{index\_row}}, 1) \in R^3\},$$

$$\mathbf{Q}_{\text{right}} = \{F_r \mid F_r = (x_{\text{index\_line}}, y_{\text{index\_line}}, 1) \in R^3\}.$$

图 13 为左右摄像机提取出的点的配准结果。

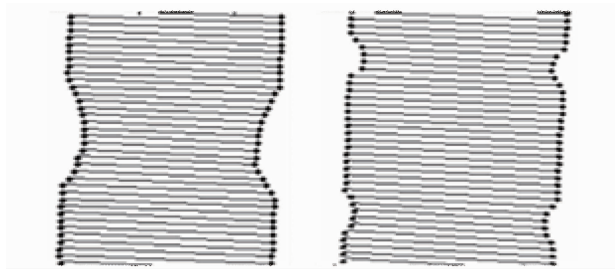


图 13 点的配准结果

Fig. 13 Left and right points registration results

### 4.3 空间点的三维重建

双目立体视觉测量基于视差原理, 由三角法进行三维信息计算。已知两摄像机之间的位置关系,

便可以获取两摄像机公共视场内物体特征点的三维坐标。双目立体视觉测量系统一般由两个摄像机组成。两摄像机平行放置时配准算法和三维重建算法简单, 运算速度快, 但公共视场小, 且由于设备加工及安装误差, 很难实现平行放置。一般情况下, 对两摄像机摆放位置不作特别要求, 如图 14 所示。

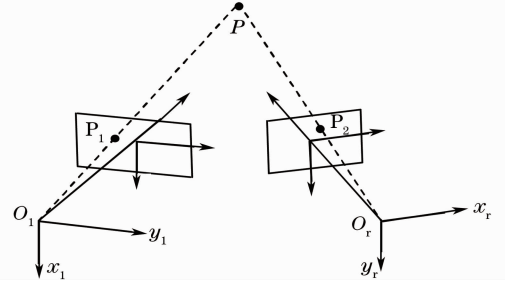


图 14 双目立体视觉测量中空间点的三维重建

Fig. 14 Binocular stereo vision measurement of 3D reconstruction of space points

设左摄像机  $O_1-x_1y_1$  位于世界坐标系原点处且无旋转, 图像坐标系为  $O_1-x_1y_1$ , 有效焦距  $f_1$ ; 右摄像机坐标系  $O_r-x_r y_r$ , 图像坐标系为  $O_r-x_r y_r$ , 有效焦距  $f_r$ 。对于  $O-xyz$  坐标系中的空间点, 两摄像机像面点之间的对应关系为

$$\rho_r \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_r & 0 & 0 \\ 0 & f_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} zX_1/f_1 \\ zY_1/f_1 \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{M}_{\text{tr}} = [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}], \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}, \mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}. \quad (14)$$

空间点三维坐标可以表示为

$$\begin{cases} x_c = zX_1/f_1 \\ y_c = zY_1/f_1 \\ z_c = \frac{f_1(f_r t_x - X_r t_z)}{X_r(r_7 X_1 + r_8 Y_1 + f_1 r_9) - f_r(r_1 X_1 + r_2 Y_1 + f_1 r_3)} \end{cases}. \quad (15)$$

因此, 已知  $f_1, f_r, \mathbf{M}_{\text{tr}} = [\mathbf{R}_{\text{tr}} \quad \mathbf{T}_{\text{tr}}]$  和空间点在左右摄像机中的图像坐标, 便可得到该点的三维空间坐标(以左摄像机坐标系为原点且无旋转)。 $f_1, f_r, \mathbf{M}_{\text{tr}} = [\mathbf{R}_{\text{tr}} \quad \mathbf{T}_{\text{tr}}]$  通过摄像机标定得到。

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_h & \mathbf{T}_h \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{\text{h-re}} & \mathbf{T}_{\text{h-re}} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中将测量到的点的坐标由摄像机坐标系转换到机器人坐标系, 实现坐标系的统一。其中  $[\mathbf{R}_{\text{h-re}} \quad \mathbf{T}_{\text{h-re}}]$  由机器人和摄像机手眼关系标定得到,  $\mathbf{R}_h, \mathbf{T}_h$  为机器人末端相对于原点的关系矩阵。

## 5 实验结果与讨论

### 5.1 重建结果及误差分析

图 15(a), (b)和(c)分别为图 6(b), (c)和(d)三

个零件重建的三维模型。实验结果显示,该系统能够实现被加工零件的精确重建,效果较好。且重建出的零件位于机器人坐标系,无需校准对齐,数据可直接用于加工。

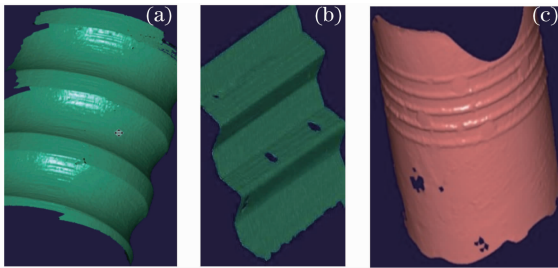


图 15 三维形貌重建结果。(a)钢筋矫直辊, (b)角板,(c)缸筒

Fig. 15 3D reconstruction results. (a) reinforced straightening roller, (b) angle plate, (c) cylinder

表 1 测量数据及误差

Table 1 Measurement data and error

Workpiece	By calipers	By vision scanning		Error	
		Test 1	Test 2	Test 1	Test 2
b	161.92	161.956	161.890	0.036	0.030
d	87.50	87.428	87.529	-0.072	0.029
f	106.50	106.453	106.544	-0.047	0.044

从测量结果看,高精度扫描模式下误差在 $\pm 0.1$  mm之间。该系统的误差主要包括标定误差、机器人定位误差及程序延时造成的数据不同步误差,通过多次标定和优化程序可以减小这两项误差,获得更好的精度。

## 5.2 动态一致性讨论

由于运算量大,在动态环境下,系统存在较大延时,比如相机曝光时间、模数(AD)转换、数据传输、图像处理、读取机器人末端位姿延迟等,摄像机采集到的图像数据与采集到的机器人位姿数据会出现不同步现象,导致重建出的模型有误差。这些误差可以通过优化程序进行解决。为便于对各部分的性能和延时进行分析,图 17 给出了优化后的系统时序图。

首先,计算机给相机发出脉冲触发信号(图 17 中 2),相机启动快门曝光(图 17 中 3),曝光完毕后,相机进行 AD 转换和传输(图 17 中 3),该程序不占用 CPU 资源,所以在曝光完毕时刻采集机器人末端当前位姿(图 17 中 1)。传输到计算机的图像数据逐渐填满内存中的图像缓存(图 17 中 5),然后进行图像处理(图 17 中 6)提取结构光及匹配,三维重建,再进行坐标变换,将重建出的点输出出来(图 17 中 7)。从时序图可看出,优化后的程序中获取机器

为了比较重建模型与实体零件尺寸的误差,选取图 16 中亮色部分为测量区域,在造型软件中采用拟合的方法求出该区域的曲率半径,与卡尺测量该部分的结果比较,如表 1 所示。表 1 还给出了图 15 中其他工件的扫描测量结果与卡尺测量结果比较及误差。

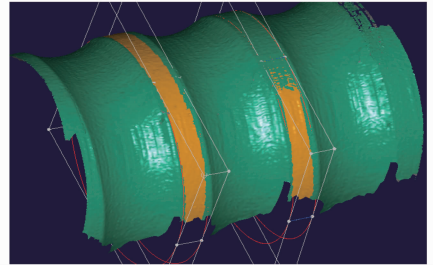


图 16 三维模型直径测量部位

Fig. 16 Measurement of 3D model

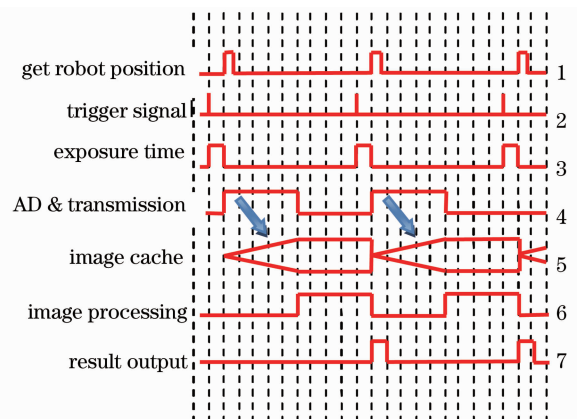


图 17 系统时序图

Fig. 17 System timing diagram

人位姿数据时刻(图 17 中 1)与曝光时刻(图 17 中 3)几乎重合,相对于整个系统精度要求,该误差可忽略。

## 6 结 论

提出了一种三维表面检测系统,体积小,便于与激光加工机器人耦合。该系统单次扫描宽度最大 200 mm,且能实现多角度数据自动拼接;具有低速高精度扫描(小于 5 mm/s)和高速普通扫描(小于 100 mm/s)两种模式,高精度扫描重建误差在

±0.1 mm之间,高速扫描误差在±1 mm之间。经大量实验验证,该系统能够重建工件的三维形貌,精度较高,对实现机器人加工的智能化和自动化具有一定的意义。

### 参 考 文 献

- 1 Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial applications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2780~2798  
杨洗陈. 激光加工机器人技术及工业应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2780~2798
- 2 Yang Xichen, Wang Yunshan, Lei Jianbo *et al.*. New progress in laser processing robot in the world [C]. The Proceedings of Chinese Advanced Manufacturing Equipment and Robot Technical Forum, Wulumuqi, 2006  
杨洗陈, 王云山, 雷剑波 等. 国外激光加工机器人新进展[C]. 2006 全国先进制造装备与机器人技术高峰论坛论文集, 乌鲁木齐, 2006
- 3 Yang Xichen. Momentum and mass transferences of coaxial powder stream in laser manufacturing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1664~1679  
杨洗陈. 激光制造中同轴粉末流动量和质量传输[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1664~1679
- 4 Yang Xichen, Li Huishan, Wang Yunshan *et al.*. Laser refabricating technology for repairing expensive and important equipments [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(10): 53~57  
杨洗陈, 李会山, 王云山 等. 用于重大装备修复的激光再制造技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(10): 53~57
- 5 Zhang Aiwu, Hu Shaoxing, Feng Xuyong *et al.*. 3D coordinate laser non-contact measuring system and error control methods [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 129~133  
张爱武, 胡少兴, 冯绪勇 等. 三坐标激光非接触外形尺寸快速测量系统与误差控制方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2): 129~133
- 6 Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008. 134  
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 134
- 7 Zhang Guangjun. Machine Vision [M]. Beijing: Science Press, 2005. 69~90  
张广军. 机器视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 2005. 69~90
- 8 Xu De, Tan Min, Li Yuan. Visual Measurment and Control for Robots [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 56  
徐 德, 谭 民, 李 原. 机器人视觉测量与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 56
- 9 Xiong Huiyuan, Zong Zhijian, Chen Chenghe. Accurately extracting full resolution centers of structured light stripe[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(5): 1057~1062  
熊会元, 宗志坚, 陈承鹤. 线结构光条纹中心的全分辨率精确提取[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(5): 1057~1062
- 10 Di Hongwei, Chai Ying, Li Kui. A fast binocular vision stereo matching algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2180~2184  
狄红卫, 柴 颖, 李 逵. 一种快速双目视觉立体匹配算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2180~2184