

文章编号 1004-924X(2013)05-1326-07

基于智能三坐标测量机的零件位姿单目立体视觉识别

黄风山*, 刘恩福, 方忆湘, 韩 宁

(河北科技大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050018)

摘要:为了使三坐标测量机快速准确地识别出被测零件的位姿,提出了一种基于三坐标测量机平动的单目立体视觉识别方法,并对该方法的原理、位姿参数的求解和识别过程进行了研究。根据双目立体视觉原理,以三坐标测量机带动摄像机沿 X 轴或 Y 轴平移,在两个不同位置分别拍摄被测零件的一幅图像;利用本文提出的基于边缘图像质心偏移的同名像点匹配方法,实现单摄像机立体视觉测量,得到被测零件上各特征点在摄像机坐标系中的三维坐标;由摄像机标定参数,进一步计算出各特征点在机器坐标系中的三维坐标;再结合各特征点在零件 CAD 坐标系中的对应坐标,求解出被测零件的位姿参数。组建了识别系统,进行了识别实验,结果显示,识别出的实验件位姿的平移量分别为: $tx_1=32.65\text{ mm}$, $ty_1=-90.23\text{ mm}$, $tz_1=13.27\text{ mm}$, 旋转角分别为 $A_x=38^\circ$, $A_y=4^\circ$, $A_z=-5^\circ$, 整个识别过程用时 1.818 s 。得到的实验数据表明该识别方法是可行的,可满足实时测量要求。

关键词:智能三坐标测量机;零件;位姿识别;单目立体视觉;图像匹配

中图分类号:TP242.62;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132105.1326

Single camera stereo vision recognition for Parts'pose based on intelligent three coordinate measuring machine

HUANG Feng-shan*, LIU En-fu, FANG Yi-xiang, HAN Ning

(Mechanical Engineering College, Hebei University of Science & Technology,
Shijiazhuang 050018, China)

* Corresponding author, E-mail:hfs_high@126.com

Abstract: To recognize the poses of parts to be measured by a Coordinate Measuring Machine (CMM) correctly and rapidly, a single-camera stereo vision recognition method based on the translation of CMM was proposed, and its principle, pose parameter solution and recognition procedure were studied. According to the double-camera stereo vision principle, an image of the measured part was captured with a CCD camera driven by the CMM along its X axis or Y axis on two different positions correspondingly. Thus, the single-camera stereo vision measurement for the part was realized with the proposed matching method on two images with the same feature point, and the 3D coordinates of each feature point in the camera coordinate system were obtained. Then, by using the camera calibration parameters, 3D coordinates of each feature point in the machine coordinate system were calculated. Finally, combining with the 3D coordinates of each feature point in the CAD coordinate system for the

收稿日期:2013-01-15;修订日期:2013-02-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075119);河北省自然科学基金资助项目(No. E2010000868)

part, the pose parameters of the part were solved. The recognition system was set up, and an experiment was conducted. The results show that the recognized translation pose parameters of the experiment part t_{x_1} t_{y_1} and t_{z_1} are 32.65 mm, -90.23 mm, and 13.27 mm, respectively; and the rotation angle pose parameter A_X , A_Y and A_Z are 38° , 4° and 5° , respectively. Moreover, the recognition time is 1.818 s. Experiment result shows that the recognition method discussed above is correct and practical, and meets the measuring requirement in real time.

Key words: intelligent Coordinate Measuring Machine(CMM); part; pose recognition; single camera-a stereo vision; image matching

1 引言

三坐标测量机是制造业中的标准三维精密测量设备,其本身的自动化、智能化程度随着现代工业的发展在不断提高,目前智能三坐标测量机已成为国内外测量领域的一大研究热点^[1]。零件的位姿是指被测零件在三坐标测量机工作台上的放置位置和方向,其自动识别功能是三坐标测量机智能化的一个重要标志。快速获取被测零件位姿信息,制导测量机测头自动找到被测零件,为建立准确的零件坐标系提供参照基准,是智能三坐标机测量过程的第一步。

对智能三坐标测量机零件位姿自动识别的研究方面,国内外具有代表性的工作是天津大学的王建利、马新辉和赵金才针对零件的可能放置方式,利用单摄像机拍摄的零件实际图像与虚拟图像相匹配,确定零件在工作台上的位置和方向^[2],由于是基于单目平面视觉测量原理,必须严格地建立虚拟零件坐标系,使得过程比较繁琐复杂,而且识别准确率不是很高。厦门大学的秦玉红利用多传感器集成获取零件三维信息^[3],从而确定零件位姿,系统比较复杂。

本文提出了基于三坐标测量机平动的零件位姿单目立体视觉识别方法,该方法首先充分利用三坐标测量机高精度平移的特点,实现单摄像机双目立体视觉测量,进而快速准确地得到零件的位姿参数。

2 零件位姿单目立体视觉识别原理

2.1 零件位姿单目立体视觉识别原理

智能三坐标测量机确定被测零件的位姿,就

是要确定三坐标测量机机器坐标系 $O_w-x_w y_w z_w$ 与 CAD 零件坐标系 $O_1-x_1 y_1 z_1$ 之间的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T ,进而计算出被测零件的位姿参数,其数学模型如式(1)所示^[4],视觉识别系统坐标系如图 1 所示^[5]。

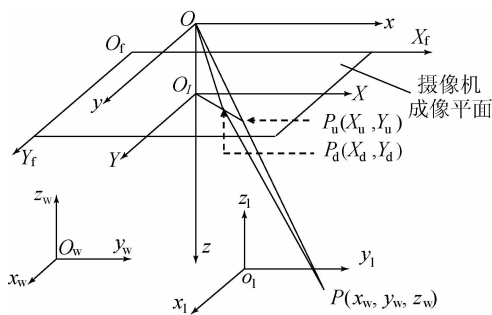


图 1 摄像机标定坐标系

Fig. 1 Coordinate system of camera calibration



图 2 零件位姿视觉识别系统组成

Fig. 2 Composing of parts pose recognition system

以摄像机坐标系 $O-xyz$ 为桥梁,利用三坐标测量机可高精度平移的特点,将 CCD 摄像机固定安装在三坐标测量机测座上,如图 2 所示。三坐标测量机带动摄像机沿 X 轴或 Y 轴平移,在 2 个不同位置分别拍摄被测零件的一幅图像,实现单摄像机立体视觉测量,零件上各特征点在 CAD

零件坐标系中的坐标可从零件 CAD 三维模型直接读出^[3], 这样利用立体视觉测量模型^[4], 可计算出各特征点在摄像机坐标系中的三维坐标; 机器坐标系和摄像机坐标系之间的旋转矩阵 \mathbf{R}' 和平移矩阵 \mathbf{T}' 可通过摄像机标定得到^[5], 利用式(2)可计算出各特征点在机器坐标系下的三维坐标; 最后将零件上各特征点在 CAD 零件坐标系和机器坐标系下对应的坐标, 带入式(1)可计算出机器坐标系与零件 CAD 坐标系之间的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} ^[6], 进而可得到被测零件在三坐标测量机工作台上的位姿参数。由于 1 个特征点的坐标参数带入式(1)可产生 3 个方程, 而式(1)中有 9 个旋转参数和 3 个平移参数, 共 12 个未知量, 所以在零件上要选取 4 个以上特征点。

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_3 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} tx_1 \\ ty_1 \\ tz_1 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1' & r_2' & r_3' \\ r_4' & r_5' & r_6' \\ r_7' & r_8' & r_9' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} tx \\ ty \\ tz \end{bmatrix} = \mathbf{R}' \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \mathbf{T}'. \quad (2)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos A_Y \cos A_Z & \cos A_Y \sin A_Z & -\sin A_Y \\ \sin A_X \sin A_Y \cos A_Z - \cos A_X \sin A_Z & \sin A_X \sin A_Y \sin A_Z + \cos A_X \cos A_Z & \sin A_X \cos A_Y \\ \cos A_X \sin A_Y \cos A_Z + \sin A_X \sin A_Z & \cos A_X \sin A_Y \sin A_Z - \sin A_X \cos A_Z & \cos A_X \cos A_Y \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$A_X = \arctan\left(\frac{r_6}{r_9}\right), A_Y = -\arcsin(r_3), A_Z = \arctan\left(\frac{r_2}{r_1}\right). \quad (4)$$

3 零件位姿单目立体视觉识别方法

由上述识别原理可知, 智能三坐标测量机零件位姿单目立体视觉识别主要包括两个方面的内容, 一是根据单目立体视觉测量原理, 测得零件各特征点在摄像机坐标系 $O-xyz$ 中的三维坐标; 二是机器坐标系 $O_w-x_w y_w z_w$ 和摄像机坐标系 $O-xyz$ 之间的旋转矩阵 \mathbf{R}' 和平移矩阵 \mathbf{T}' 的标定。后者是比较成熟的方法^[6], 不再重述; 前者是本文提出的一种基于三坐标测量机平动的特征点三维坐标单目立体视觉测量新方法, 主要包括特征点(被测点)成

2.2 零件位姿参数的求解

利用式(2)和式(1)计算出的机器坐标系与零

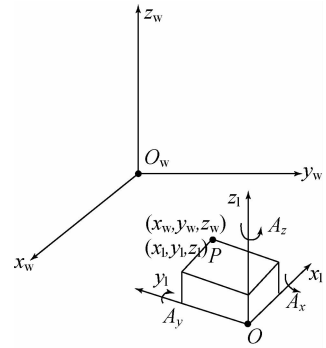


图 3 零件位姿参数

Fig. 3 Parts pose parameters

件 CAD 坐标系之间的 3 个平移参数 (tx_1, ty_1, tz_1) 是相互独立的(如图 3 所示), 而 9 个旋转参数 $r_1 \sim r_9$ 是相互关联的, 分别是零件 CAD 坐标系相对于机器坐标系 3 个坐标轴旋转角 (A_X, A_Y, A_Z) 的三角函数组合, 如式(3)所示^[6], 并结合 $r_1 \sim r_9$ 之间的约束关系可计算出 A_X, A_Y, A_Z , 如式(4)所示^[6], 至此, 表示零件位姿的旋转角 (A_X, A_Y, A_Z) 和平移量 (tx_1, ty_1, tz_1) 6 个独立参数全部求出。

像、特征点像点提取和特征点在两幅图像中同名像点的匹配三部分。

3.1 特征点三维坐标单目立体视觉测量原理

立体视觉测量可直接获得零件特征点三维坐标信息, 包括双目立体视觉测量和单目立体视觉测量^[7], 前者使用 2 个摄像机同时在 2 个不同位置分别拍摄被测对象的一幅照片; 后者使用一个摄像机在 2 个不同位置分别拍摄被测对象的一幅照片, 图 4 是平行光轴单目立体视觉测量原理图, 摄像机沿 x 轴方向从位置 A 移动到位置 B, 虽然两者的测量过程有所不同, 但都是基于双目立体视觉测量原理。

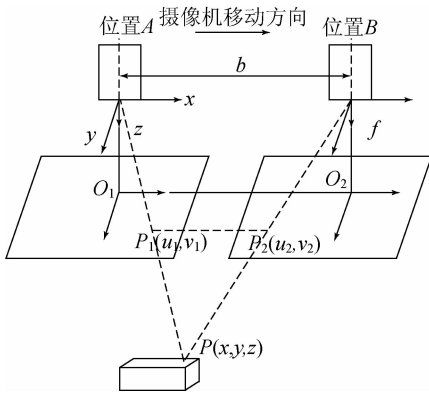


图4 单目立体测量

Fig. 4 Single camera stereo measurement

图4所示的平行光轴单目立体视系统中两摄像机的光轴相互平行,是一种最简单的单目立体视觉系统。在位置A、B时,摄像机的投影中心连线距离为基线距 b ,设空间任一点 $P(x, y, z)$,其在A、B两个位置的摄像机像平面上所成像点及其像面坐标分别为 $P_1(u_1, v_1)$ 和 $P_2(u_2, v_2)$,因摄像机是沿 x 轴平移,所以 $v_1 = v_2$,则 P 点对应视差为 $D = u_1 - u_2$ 。由此可计算出特征点 P 在A、B两个位置摄像机坐标系下的三维坐标,以A位置摄像机坐标系为例,为:

$$x = B \cdot u_1 / D, y = B \cdot v_1 / D, z = B \cdot f / D. \tag{5}$$

因此,在准确标定左右两摄像机之间的相对位置,即基线距 B 后,对于空间任意一点,只要能确定该点在两幅图像中的匹配同名像点,就可以确定视差 D ,通过式(5)可计算出该点在A、B 2个位置摄像机坐标系中的三维坐标^[8]。

根据平行光轴单目立体视觉系统测量原理,结合三坐标测量机可高精度平移的特点,本文采用基于三坐标测量机平动的单目立体视觉系统,如图2所示。摄像机可以随着三坐标机 X 轴或 Y 轴精确平移,在2个位置获取零件的两幅图像,计算出零件上特征点在摄像机坐标系中的三维坐标信息。基线距 $B(b)$ 可直接由三坐标测量机测得,这样既省去了基线距 B 的标定过程,又简化了系统结构,提高了测量精度。另外,在测量过程中可根据实际情况,精确地调整基线距 B ,使系统具有很大的灵活性。

3.2 特征点像点提取

三坐标测量机带动摄像机,在2个光轴相互平行的A、B位置分别对被测零件拍摄一幅图像,拍摄到的实验件原始图像如图5、图6所示;接着需要对原始图像进行图像处理,得到零件图像的边缘^[9],如图7所示;进而提取图像边缘上像素点的像面坐标,如果对所有像素点都进行相关计算,其计算量会非常大,也没有必要。为了提高计算的准确度和图像处理速度,只选择零件上一些特殊点作为特征点,如角点、中心点和质心点等,对这些特征点在左右两幅中的对应像点进行提取,得其像面坐标,为每个目标特征点在两幅图像中同名像点的匹配做好准备。

针对本文采用的实验件特点,选用角点作为特征点,采用全局和局部曲率特性来定义和提取角点^[10],提取结果如图8所示,打“*”的点即为提取出的角点。

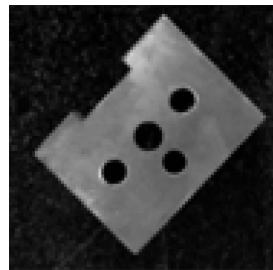


图5 A位置图像

Fig. 5 A position image

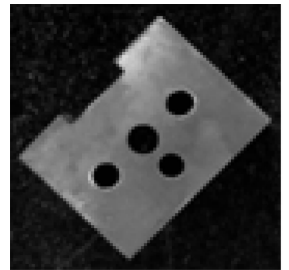


图6 B位置图像

Fig. 6 B position image

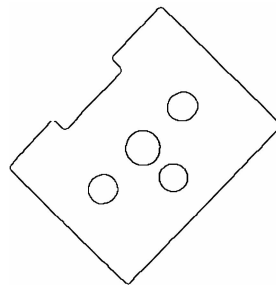


图7 图像边缘

Fig. 7 Image edge

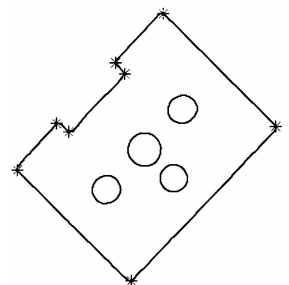


图8 角点提取

Fig. 8 Corner extraction

3.3 基于边缘图像质心偏移的同名像点匹配

由式(5)可知,要得到特征点在摄像机坐标系中的三维坐标,需要计算出每一特征点对应的时差 D ,必须从左右两幅图像中提出的特征点像点中,

找出与零件上每一特征点对应的左右两个像点,即同一个特征点的 2 个同名像点,这一过程就是特征点同名像点的立体匹配^[11]。立体匹配是立体视觉测量中最重要、最困难的问题,本文利用三坐标测量机带动摄像机精确平移并形成平行光轴立体视觉的特点,提出了基于边缘图像质心偏移的同名像点立体匹配方法。

基于边缘图像质心偏移的同名像点匹配的原理如图 9 所示。由于摄像机在零件的正上方采集图像,摄像机只在 X 或 Y 轴方向移动,没有 Z 轴方向的上下移动或旋转,所以在 2 个位置采集到的左右两幅图像既没有尺度大小变化,也没有旋转的变化,右图相对于左图来说只是相当于把零件图像区域(图 9 中的实线)在像面上平移了一段 d_x 或 d_y 距离,即左图像上所有的像点都沿 X 轴或 Y 轴平移了一段 d_x 或 d_y 距离。根据图像这一特点,找到零件图像上的一个基准点,即无论图像经怎样变换(尺度、旋转、平移),此点对应的像点相对于零件整个图像的位置关系都不会变,如零件图像的质心,所以提取出左右图像各自的质心 O 、 O_1 的像面坐标,计算出 OO_1 的 X 轴或 Y 轴距离 d_x 或 d_y (本文以 d_x 为例),则左图中的任一角点的像点 P 与其右图中的对应点 P_1 的距离也为 d_x 。因此,立体匹配就转化为寻找左右两图像中满足像面距离为 d_x 这一约束的每一个特征点的左右 2 个像点。

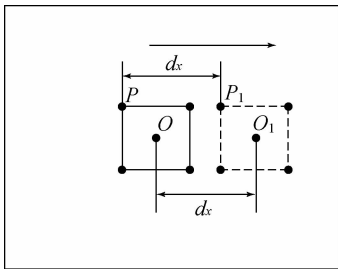


图 9 匹配原理

Fig. 9 Matching principle

具体方法是先计算两图像区域质心点的像面坐标,得到两质心点偏移的距离 d_x ; 然后对应于左图像中每一特征点(本文以角点为例)的像点,在右图像中按从上往下,从左向右的顺序遍历寻找与其距离为 d_x 的像点,若符合此约束条件,则两像点即

为同名匹配像点。图 10 为此匹配方法的实验匹配结果,其中“*”点为左右图像区域的质心点,直线连接点为左右图像中的同名匹配像点,匹配精度可达到 1 个像素,能满足识别精度要求。

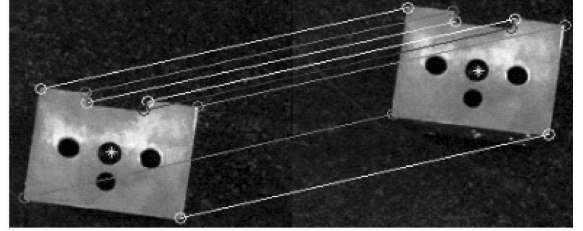


图 10 匹配结果

Fig. 10 Matching result

4 实验

为了验证本文提出的智能三坐标测量机零件位姿单目立体视觉识别方法的可行性,采用图 2 所示的实验系统,CCD 摄像机的焦距为 12 mm,将其安装在三坐标测量机测座上,沿 X 轴平移采集两幅图像。被测零件的 CAD 三维模型如图 11 所示。零件上各特征点在 CAD 零件坐标系下的坐标值、各特征点在左右图像中的同名匹配像点的像面坐标值、各特征点在机器坐标系下的三维坐标值如表 1 所示。

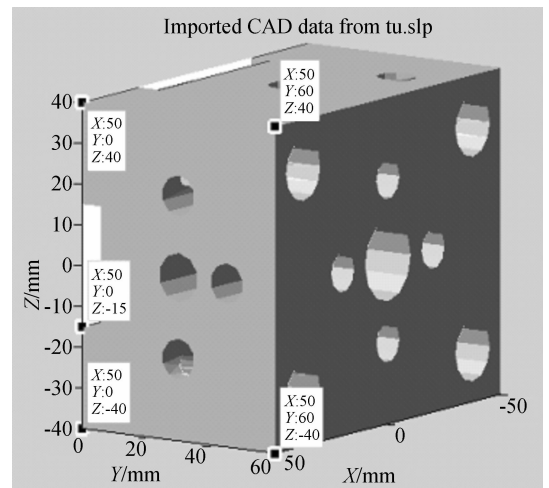


图 11 实验零件 CAD 模型

Fig. 11 CAD model of experiment part

表1 实验数据

Tab.1 Experiment data

| 特征点在 CAD 坐标系中的坐标值/mm | 特征点匹配像点在左图像中的像面坐标值/pixel | 特征点匹配像点在右图像中的像面坐标值/pixel | 特征点在机器坐标系中的坐标值/mm |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| (50,0,-40) | (75,393) | (211,392) | (61.91,-128.52,75.02) |
| (50,60,-40) | (254,417) | (394,418) | (69.02,-68.64,92.75) |
| (50,60,40) | (286,174) | (427,174) | (-8.44,-57.92,96.29) |
| (50,0,40) | (105,149) | (241,147) | (-18.67,-118.26,76.08) |
| (50,0,15) | (94,227) | (231,225) | (7.16,-121.35,79.25) |
| (50,6,15) | (109,232) | (247,231) | (9.11,-115.85,83.00) |
| (50,6,-15) | (98,320) | (233,321) | (38.27,-121.41,72.54) |
| (50,0,-15) | (82,323) | (217,322) | (38.92,-126.79,71.73) |

由表1中的第1列和第4列,可计算出表征零件位姿的6个独立参数分别为: $T=(tx_1=32.65\text{ mm}, ty_1=-90.23\text{ mm}, tz_1=13.27\text{ mm}), A_x=38^\circ, A_y=4^\circ, A_z=-5^\circ$,整个位姿识别过程用时1.818 s,满足实时测量要求。

5 结 论

针对智能三坐标测量机被测零件位姿的快速准确识别问题,提出了一种基于三坐标测量

机平动的单目立体视觉识别方法。根据双目立体视觉原理,实现了单摄像机立体视觉测量,提出了基于边缘图像质心偏移的特征点两个同名像点的匹配方法;结合各特征点在机器坐标系和零件CAD坐标系中的对应坐标,求解出被测零件的位姿参数。进行了识别实验,识别出实验件的6个位姿参数分别为: $tx_1=32.65\text{ mm}, ty_1=-90.23\text{ mm}, tz_1=13.27\text{ mm}, A_x=38^\circ, A_y=4^\circ, A_z=-5^\circ$,整个识别过程用时1.818 s,满足实时测量的要求。

参考文献:

- [1] 张国雄. 三坐标测量机的发展趋势[J]. 中国机械工程, 2000, 11(1-2): 222-226.
ZHANG G X. The developing trend of three coordinate measuring machine[J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, 11(1-2): 222-226. (in Chinese)
- [2] 赵金才. 坐标测量系统零件信息提取与位姿自动识别的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
ZHAO J C. *Study on the parts' information extraction and pose automatic recognition in the coordinate measuring system* [D]. Tianjin: Tianjin university, 2005. (in Chinese)
- [3] 秦玉红. 三坐标机柔性化测量系统关键技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
QIN Y H. *A study on flexible measuring system based on CMM* [D]. Xiamen: Xiamen University, 2009. (in Chinese)

- [4] 吴国栋. 离轴三反光学镜头像面畸变的标定方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2127-2131.
WU G D. Calibration of distortion for three-mirror off-axis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2127-2131. (in Chinese)
- [5] 黄风山, 钱惠芬. 三坐标测量机驱动的摄像机标定技术[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 952-957.
HUANG F S, QIAN H F. Camera calibration technology driven by the three coordinate measuring machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 952-957. (in Chinese)
- [6] 陈刚, 陈华, 车仁生. 空间点的立体视觉传感器标定方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1439-1444.
CHENG G, CHENG H, CHE R SH. Calibration method for stereo vision sensor based on spatial points[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1439-1444. (in Chinese)

- [7] 姜宏志, 赵慧洁, 梁宵月, 等. 基于极线校正的快速相位立体匹配 [J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(10): 2520-2525.
JIANG ZH H, ZHAO H J, LIANG X Y, *et al.*. Phase-based stereo matching using epipolar line rectification [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2520-2525. (in Chinese)
- [8] 张广军. 视觉测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 196-203.
ZHANG G J. *Vision Measurement* [M]. Beijing: Science Publishing House, 2008: 196-203. (in Chinese)
- [9] 黄凤山, 王春梅. 光笔式视觉坐标测量中控制点光斑图像的识别 [J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(4): 587-591.
HUANG F S, WANG CH M. Control points' light

spot image recognition in light-pen vision coordinate measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 587-591. (in chinese)

- [10] HE X C, YUNG N H C. Curvature scale space corner detector with adaptive threshold and dynamic region of support [C]. *Proceedings of the 17th ICPR'04, Beijing, P. R. China: ICPR*, 2004: 791-794.
- [11] 叶海加, 陈昱, 邢渊. 双目 CCD 结构光三维测量系统中的立体匹配 [J]. *光学 精密工程*, 2004, 12(1): 71-75.
YE H J, CHEN G, XING Y. Stereo matching in the structure light double CCD cameras 3D measuring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 71-75. (in Chinese)

作者简介:



黄凤山(1970—)男, 河北石家庄人, 博士, 教授, 1996 年于北京工业大学获得硕士学位, 2006 年于天津大学获得博士学位, 主要从事现精密测试技术与仪器方面的研究。E-mail: hfs_high@126.com



方忆湘(1963—), 男, 湖南岳阳人, 教授, 1984 年于南京航空学院获得工学学士学位, 主要从事机械产品数字化设计与制造方面的研究。E-mail: fang_yixiang@163.com



刘恩福(1960—), 男, 河北唐山人, 教授, 主要从事 CIMS、制造业信息化和 CAD/CAPP/CAM 技术方面的研究。E-mail: liuef_60@yahoo.com.cn



韩宁(1987—), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事机电智能仪器与设备方面的研究。E-mail: han0615sy@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)