

# 基于双目 CCD 测距的目标图像匹配算法研究

张丽娟<sup>1,2</sup> 杨进华<sup>1</sup> 姜雨彤<sup>1,3</sup> 李东明<sup>1,4</sup> 谭芳<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

<sup>2</sup>长春工业大学计算机科学与工程学院, 吉林 长春 130012

<sup>3</sup>北京理工大学机电学院, 北京 100081

<sup>4</sup>吉林农业大学信息技术学院, 吉林 长春 130118

**摘要** 为了实现高精度的远距离双目 CCD 被动测距, 提出改进的互相关匹配算法与三次曲面拟合算法, 对双目 CCD 拍摄的两幅图像进行亚像素级匹配。介绍了双目测距系统的测距原理; 进行测距图像的匹配操作, 提出基于模板的灰度互相关算法, 根据互相关运算的结果, 提出亚像素级匹配算法, 即采用三次曲面拟合方法, 拟合出相关峰的亚像素级坐标; 对测距实验结果进行误差分析, 并修正系统误差的计算公式。实验表明, 3 km 以内的目标实际测量精度优于 0.5%, 满足高精度双目测距的精度要求。

**关键词** 测量; 图像匹配; 双目测距; 曲面拟合; 亚像素级匹配

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.091002

## Research on Target Image Matching Algorithm for Binocular CCD Ranging

Zhang Lijuan<sup>1,2</sup> Yang Jinhua<sup>1</sup> Jiang Yutong<sup>1,3</sup> Li Dongming<sup>1,4</sup> Tan Fang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Photoelectrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

<sup>2</sup>College of Computer Science and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun, Jilin 130012, China

<sup>3</sup>Mechanical and Electrical College, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

<sup>4</sup>School of Information Technology, Jilin Agriculture University, Changchun, Jilin 130118, China

**Abstract** To achieve high-precision passive ranging of binocular CCD over a long distance, two algorithms of cross-correlation matching algorithm and cubic surface fitting algorithm are put forward, to match two pictures by binocular CCD in a sub-pixel level. The ranging principle of the binocular ranging system is introduced, and the ranging images are matched and a grayscale cross-correlation algorithm is proposed based on template. According to the results of cross-correlation, the sub-pixel level matching algorithm that uses the cubic surface fitting method to fit the sub-pixel coordinates of correlation peaks is proposed. The errors of the experimental results are analyzed and the formula of calculating system errors are corrected. Experimental results show that the actual measurement accuracy of a target within 3 km is better than 0.5%, which meets the accuracy requirements of the high-precision binocular ranging.

**Key words** measurement; image matching; binocular ranging; surface fitting; sub-pixel matching

**OCIS codes** 100.3008; 110.2970

## 1 引言

双目 CCD 测距技术是一种仿照人类利用双眼得到目标物体的图像来感知距离的光学测距方法。双目

收稿日期: 2013-12-01; 收到修改稿日期: 2014-01-10; 网络出版日期: 2014-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(51202017)、吉林省教育厅“十二五”科学技术研究项目(2013145, 201363)

作者简介: 张丽娟(1978—), 女, 副教授, 博士研究生, 主要从事计算机视觉检测技术及图像处理理论及应用等方面的研究。E-mail: ldm0214@163.com

导师简介: 杨进华(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电测试、计算机视觉及图像处理理论及应用等方面的研究。E-mail: Yangjh@cust.edu.cn

CCD测距为被动测距,在测量中不必对被测目标发射任何信号,只需在自然条件下即可实现高精度远距离测距,具有隐蔽性的特点,特别适用于军用设备测距、航空目标测距和工业应用中需要保密和受环境限制的场合。

图像匹配是进行双目测距的最核心最关键的技术,一直是专家学者研究的热点和难点。世界上许多国家已经采用图像匹配制导技术的武器,最早的是巡航导弹,具有很高的隐蔽性。图像匹配技术的主要目的是提高远距离战术、战略导弹和巡航导弹的制导精度,使制导精度不受射程的限制。由于目标匹配需要经过大范围图像搜索才能完成,且飞行器惯导系统存在不稳定性误差,使得匹配速度与可靠性成为匹配定位技术的关键。因此研究合适的图像匹配算法成为取得良好导向性能的关键。图像匹配是美国在20世纪70年代从事武器投射系统的末制导、飞行器辅助导航系统等应用研究时提出来的,后来慢慢获得了美国军方的大力支持与赞助。随着科学技术的迅猛发展,图像匹配技术的应用已逐步从原来单纯的军事用途扩大到了包括医学图像分析、遥感图像处理、机器视觉、工业控制等领域。所以,图像匹配技术的研究具有极其重要的理论价值和广阔的应用前景。

所谓图像匹配就是在图像的变换空间中寻找一种或多种映射变换,对在时间段、传感器和视角有差异的条件下的同一目标场景的两幅或多幅图像在空间上进行配准,或者根据已知的目标模式在另一幅目标图像中识别到彼此相应的模式。本文首先通过设计的双目CCD测距系统进行目标图像获取,然后进行目标特征提取,根据特征区域大小选取较合适的区域进行匹配,最后采用改进互相关算法及三次曲面拟合算法进行目标图像的亚像素级匹配。在双目CCD测距系统中,图像的立体匹配是其关键环节,决定着整个系统测量的主要精度。

## 2 双目CCD测距原理

图1为双目CCD测距原理图。两摄像机的投影中心连线的距离为基线距表示为 $B^{[1-2]}$ 。目标点 $A$ 经过由两光轴平行的左右摄像机组成的双目测距系统时,分别成像于左CCD像面上的 $A_1$ 点及右CCD像面上的 $A_2$ 点,其在左右像面上的位置分别为 $x_{Left}$ 和 $x_{Right}$ 。已知两摄像机焦距均为 $f$ ,根据三角形相似原理可推导出被测距离 $l^{[3]}$

$$l = \frac{Bf}{x}, \quad x = x_{Left} + x_{Right}, \quad (1)$$

式中 $x$ 为 $A$ 点通过双目摄像机分别成像在左右CCD像面上成像点的位置差,又被称为双目视差。可见在双目摄像机光轴严格平行,并且同时获取目标物体的图像的理想状态下,可通过图像匹配算法确定同一目标在左右CCD图像中的相应位置,计算出双目视差 $x$ ,又已知焦距和基线大小,即可根据(1)式得到目标距离 $l$ 。

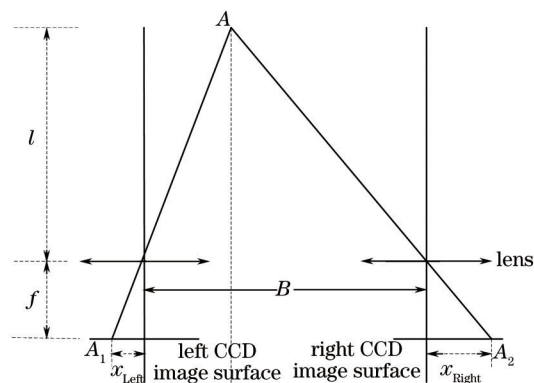


图1 双目CCD测距原理图

Fig.1 Schematic of binocular CCD ranging

双目测距系统是利用双目立体视觉原理,通过同一目标经过不同位置的左右摄像机成像在左右不同位置上,进行目标图像的匹配,实质上是确定同一目标点成像在左右图像上各自对应的像素坐标位置,求出它们位置的像素差即双目视差,从而根据双目测距模型获得目标距离。图像匹配的结果直接影响到双目测距系统的距离测量结果,所以保证图像匹配的准确度是高精度双目测距的关键。

### 3 高精度图像匹配

#### 3.1 像素级快速匹配

采用的左右 CCD 摄像机型号、参数可以保持一致,基本保持光轴平行、双目摄像机坐标系共面且各坐标轴平行放置,由此同步采集的左右 CCD 图像大小、比例一致,图像的灰度信息受噪声干扰较小。因此,采用最适合双目测距系统的基于模板匹配的灰度互相关的图像匹配算法,其原理如图 2 所示。

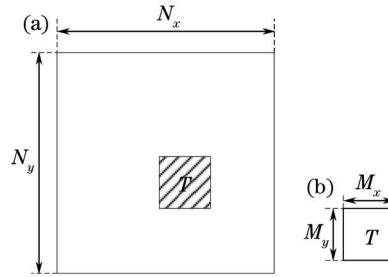


图 2 (a)搜索图像  $S$  与 (b)模板图像  $T$

Fig.2 (a) Search image  $S$  and (b) template image  $T$

如图 2 所示,探索图像  $S$  为  $N_x \times N_y$ ,模板图像  $T$  为  $M_x \times M_y$ ,匹配时模板图像在参考图上遍历每个像素进行搜索,与模板图具有同样尺寸的搜索子图  $S^{i,j}$ ,  $S^{i,j}$  的左上角坐标为  $(i,j)$ ,  $i$  和  $j$  的取值范围为  $0 \leq i, j \leq N-M$ 。比较  $T$  和  $S^{i,j}$  上所有像素点灰度值的相似程度,如果  $S^{i,j}$  和  $T$  一致,说明它们相匹配。

这里用归一化互相关匹配算法来比较  $S^{i,j}$  和  $T$  相似度。互相关函数的表达式为

$$N(i,j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T(m,n) - \overline{T(m,n)}] [S^{i,j}(m,n) - \overline{S^{i,j}(m,n)}]}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T(m,n) - \overline{T(m,n)}]^2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S^{i,j}(m,n) - \overline{S^{i,j}(m,n)}]^2}}, \quad (2)$$

$$\overline{T(m,n)} = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N T(m,n), \quad (3)$$

$$\overline{S^{i,j}(m,n)} = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S^{i,j}(m,n), \quad (4)$$

式中模板图像为  $T(m,n)$ ,模板图像大小为  $M \times N$ ,  $\overline{T(m,n)}$  为  $T(m,n)$  上所有像素灰度的平均值;在参考图像上以  $(i,j)$  为左上角像素点的搜索图像区域为  $S^{i,j}(m,n)$ ,  $\overline{S^{i,j}(m,n)}$  为搜索图像上所有像素灰度的平均值。图像匹配是匹配目标图像区域即模板的左上角像素点。互相关函数值  $N(i,j)$  的取值范围是  $0 \leq N(i,j) \leq 1$ ,它的值的大小取决于参考图像上以  $(i,j)$  为左上角像素点的搜索图像区域与模板图像的匹配程度。因为图像拍摄的差异性,常常无法得到互相关函数值为 1 的像素点,但某像素点对应的互相关函数值越大,说明该像素点匹配程度越高,选取互相关函数值最大的像素点,即为最匹配像素点<sup>[3]</sup>。

为了实现图像的快速匹配,提高算法处理速度,采用文献[4]中所述的快速图像匹配方法。先对图像进行降采样,在图像尺寸缩小的情况下对目标图像区域进行大致匹配,利用互相关函数找到大致匹配点之后,再把该匹配点还原到原始图像中的相应位置,以该点的还原像素位置作为寻找精确像素级匹配点的中心,在其周围一定像素范围内继续进行互相关运算,找到精确匹配点。从而,大大降低了互相关运算的数据量,节省了匹配时间,又实现了精确的像素级图像匹配。

#### 3.2 快速匹配算法描述

改进后的快速匹配算法的步骤为

1) 对匹配图像的目标图像区域进行提取。利用双目测距系统的双目 CCD 摄像机对目标图像进行拍摄,左右图像上均出现了待匹配的完整目标图像区域“前”,对左 CCD 图像上的目标图像“前”进行目标图像区域的提取,该区域作为模板,为其在右 CCD 图像上寻找出相应的目标图像“前”的匹配区域做好准备工作。所拍摄的左右图像实际大小均为 800 pixel×600 pixel,为了获取到完整的目标图像,待匹配的目标图像模板大小为 200 pixel×200 pixel。

如图 3 所示,图 3(a)为左 CCD 相机图像,图 3(b)为从左图中提取出的目标区域作为在右图像上进行匹配

的模板。目的是为了在右 CCD 图像上找寻到从左 CCD 图像中提取的匹配模板区域“前”的左上角匹配点。

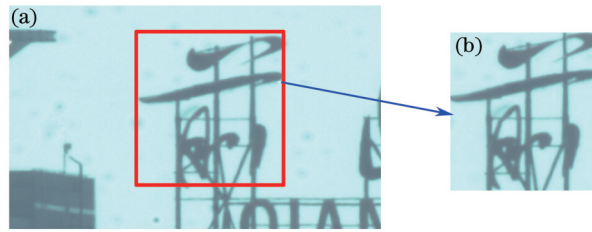


图3 待匹配目标图像的提取。(a) 左 CCD 图像上进行目标图像提取;(b) 待匹配的目标图像区域

Fig.3 Extraction of the target image to be matched. (a) Extraction of target image on the left CCD image;  
(b) area of target image to be matched

2) 对待匹配的右 CCD 图像和从左 CCD 图像中提取的目标区域模板图像进行降采样处理。根据双线性插值原理<sup>[5-7]</sup>,对模板图像和右图像同时进行 4 倍降采样处理。在图 4 中,图 4(a1)为从左 CCD 相机图像(称“左图”)中提取的大小为 200 pixel×200 pixel 的目标模板图像,图 4(b1)为右 CCD 相机采集的大小为 800 pixel×600 pixel 的图像,图 4(a2)为 4 倍降采样后的目标模板图像缩小成 50 pixel×50 pixel,图 4(b2)为 4 倍降采样后的右图像缩小成 200 pixel×150 pixel。

3) 对降采样后的右 CCD 图像(简称“右图”)和模板图像进行大致匹配运算。如图 4 所示,目标图像模板的互相关匹配运算在降采样之后的目标模板图像(a2)和右图像(b2)之间展开。以(a2)为模板在(b2)上进行模板搜索,进行每一像素点的互相关运算,找到互相关函数值的相关峰坐标 $(m_0, n_0)$ 即目标模板图像的左上角坐标的大致匹配点。

4) 在原图上还原大致匹配点,选择适当区域进行像素级匹配点的搜索。根据第 3)步在降采样后的右图上找寻到的大致匹配点坐标为 $(m_0, n_0)$ ,那么还原到原尺寸图像当中,右图上的匹配点应在像素坐标为 $(4m_0, 4n_0)$ 的附近区域,以 $(4m_0, 4n_0)$ 为中心点截取原始尺寸的右 CCD 图像上 160 pixel×80 pixel 的适当区域进行精确匹配点的搜索。这个区域的选取根据实际情况来定,既不能太小容易把精确匹配点排除在外,也不能太大增加计算数据量。

5) 利用从左 CCD 图像上提取的原始目标模板图像在根据第 3)步所述的右图上截取的 160 pixel×80 pixel 区域进行互相关匹配运算,确定其相关峰坐标,从而找寻到左图中提取的目标模板图像在右图中的精确匹配点坐标。

通过上述的快速图像匹配方法,不但减少了计算数据量,避免了在大尺寸图像上的全部像素的模板匹配运算,还利用先进行大致匹配再精确定位的方法找寻互相关函数分布的相关峰值坐标,完成图像的像素级匹配。

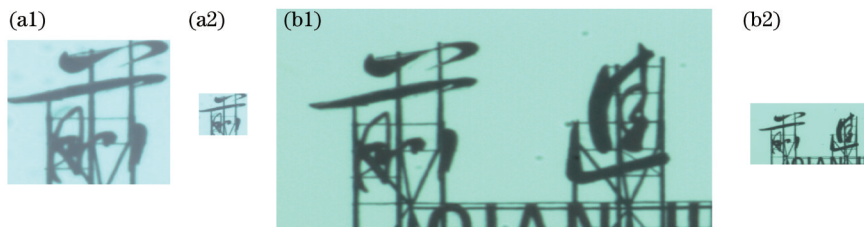


图4 左图的原始图像和目标模板图像的降采样。(a1) 左图的目标模板图像;(a2) 对图(a1)的 4 倍采样;(b1)右 CCD 图像;  
(b2)对图(b1)的 4 倍采样

Fig.4 Down-sampling of the target template image and the original left image. (a1) Target template image of the left one;  
(a2) 4 times sampling of Fig (a1); (b1) right CCD image; (b2) 4 times sampling of Fig (b1)

### 3.3 测距图像的亚像素级匹配

要实现双目测距系统的高精度距离测量,图像匹配的精度是关键<sup>[8]</sup>。由于图像的像素级匹配的精度不能达到双目测距系统的要求,这里需要实现目标图像的亚像素级匹配。

采用三次曲面拟合方法<sup>[9]</sup>拟合出相关峰的亚像素级坐标。选取互相关函数分布的相关峰像素级坐标作为中心点,选取其周围 20 pixel×20 pixel 区域内的像素点进行三次曲面拟合点,带入到用二元三次多项式表



示的互相关函数中,得到

$$N(i,j) = \sum_{k=0}^3 \sum_{n=0}^k a_{kj} x^j y^{k-j} \quad (5)$$

相关峰及其周围共  $21 \times 21 = 441$  pixel 的横纵坐标带入到这个二元三次的多项式表达式中,利用最小二乘法<sup>[10]</sup>求得表达式系数  $a_{kj}$ ,获得完整的二元三次拟合函数表达式,图5为三次曲面拟合图。通过二元三次多项式的表达式可求出三次曲面拟合函数的最大值即拟合出的亚像素级匹配坐标,完成了目标图像的亚像素级匹配。

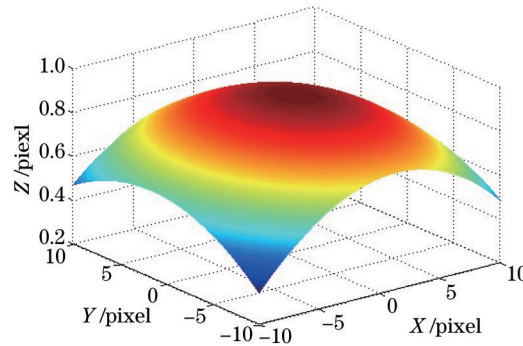


图5 三次曲面拟合

Fig.5 Three surface fitting

## 4 图像匹配实验及结果分析

### 4.1 双目测距实验结果

实验采用分辨率为  $1300 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ ,两像素大小为  $4.65 \mu\text{m}$  的 OK-AC1300 型号的 CCD 相机,工作输出 8 bit RGB 图像,选用焦距  $f=500 \text{ mm}$  的德国威摄 Walimex 500 mmF8-32 长焦定焦镜头。本实验过程中对 3 km 左右的距离不同的多个目标进行测量,测距图目标选择的是“吉林省能源局”,实验中拍摄的图像及选取的目标如图6所示。

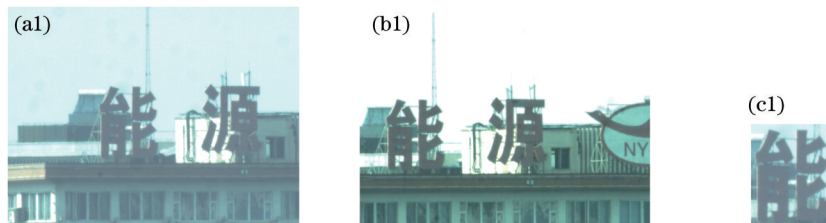


图6 “吉林省能源局”测距图组。(a1) 左目标图像;(b1) 右目标图像;(c1) 目标

Fig.6 Ranging image groups for “Energy bureau of Jilin Province”. (a1) Left target image; (b1) right target image; (c1) target

图6是测距中的一组目标图像。实验首先使用GPS导航定位测得拍摄地点和目标地点的经纬度,距离为  $2.2631 \text{ km}$ 。为了检测测距系统及算法运行的稳定性,实验过程中拍摄了多组目标图像,进行图像匹配,匹配软件界面如图7所示。

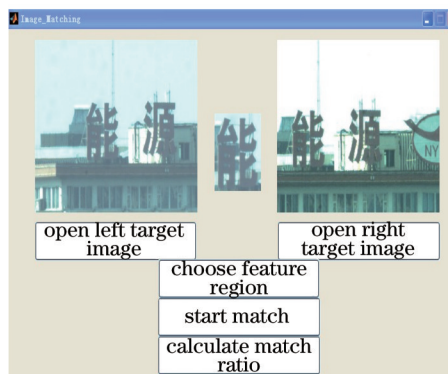


图7 图像匹配软件界面

Fig.7 Software interface of image matching

结合远距离双目 CCD 测距系统的标定参数,获得的实验测量结果如表 1 所示。

表 1 “吉林省能源局”测距图组测量数据

Table 1 Measurement data of ranging image groups for “Energy bureau of Jilin Province”

Number	Coordinate of left match point /pixel	Coordinate of right watch point /pixel	Distance /km
1	(83.00,229.00)	(87.17, 64.00)	2.252
2	(81.00, 222.00)	(87.35, 62.59)	2.257
3	(82.00, 221.00)	(88.33, 68.00)	2.255
4	(83.00, 225.00)	(86.83, 66.75)	2.258
5	(82.00, 221.00)	(87.07, 66.23)	2.253

#### 4.2 双目测距实验结果的误差分析

这里对双目 CCD 测距公式进行了修正,并讨论二维情况,实际的三维成像计算仅为二维的拓展,不会影响公式的计算。双目视觉系统成像模型<sup>[11-12]</sup>如图 8 所示, $O_L, O_R$ 表示左摄像机和右摄像机的光心, $O_L Z_L$ 和 $O_R Z_R$ 分别是左右两摄像机的光轴, $f_L$ 和 $f_R$ 分别是左右两摄像机的焦距。

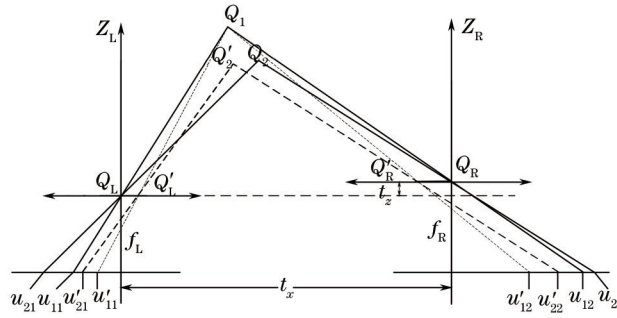


图 8 双目视觉系统成像模型

Fig.8 Imaging model of binocular vision system

在图 8 中,设  $Q_1$  为标定,假设此标定点在左右摄像机坐标系下的坐标分别为  $(x_{1L}, z_{1L})$  和  $(x_{1R}, z_{1R})$ 。根据一阶径向畸变针孔模型<sup>[13]</sup>,  $Q_1$  在像平面上的理想位置为  $u_{11}, u_{12}$ , 实际的位置为  $u'_{11}, u'_{12}$ 。可以假设每个像素点的二维位置误差都相等,均为  $E$ , 表达为

$$E = \sqrt{(X_d - X_u)^2 + (Y_d - Y_u)^2} \quad (6)$$

根据  $Q_1$  及其二维图像位置点  $u'_{11}, u'_{12}$  的位置关系,可以用线性方法计算,求得摄像机光心的位置  $O'_L$  和  $O'_R$ 。由直线  $O_L Q_1$  和像平面的交点得到点  $u_{11}$  和  $u_{12}$  在左右摄像机坐标系下的坐标为

$$u_{11} = \left( -\frac{f_L x_{1L}}{z_{1L}} + E, -f_L \right), u_{12} = \left( \frac{f_R x_{1R}}{z_{1R}}, -f_R \right), \quad (7)$$

由此可知,

$$u'_{11} = \left( -\frac{f_L x_{1L}}{z_{1L}} + E, -f_L \right), u'_{12} = \left( \frac{f_R x_{1R}}{z_{1R}} + E, -f_R \right), \quad (8)$$

再由直线  $u'_{11} Q_1$  得到  $O'_L$  在左摄像机坐标系下的坐标为  $\left( \frac{z_{1L} E}{z_{1L} + f_L}, 0 \right)$ 。同样  $O'_R$  在右摄像机坐标系下的坐标为

$\left( t_x - \frac{z_{1L} E}{z_{1L} + f_L}, 0 \right)$ 。然后由得到的摄像机参数对测试点进行恢复,设测试点  $Q_2$  的实际坐标为  $(x_{2L}, z_{2L})$  和  $(x_{2R}, z_{2R})$ , 则点  $Q_2$  的理论像点应该为  $u'_{21}, u'_{22}$ ,  $u'_{21}$  和  $u'_{22}$  分别为  $\left( -\frac{f_L x_{2L}}{z_{2L}} + E, -f_L \right)$  和  $\left( t_x - \frac{f_R (t_x - x_{2L})}{z_{2L}} - E, -f_R \right)$ 。

考虑由于匹配造成的误差影响,检测到  $Q_2$  的对应像点分别为  $u''_{21}, u''_{22}$ , 匹配误差为  $D$ , 则

$$u''_{22} = \left[ t_x - \frac{f_R (t_x - x_{2L})}{z_R} - E - D, -f_R \right]. \quad (9)$$

所以  $O'_L$ 、 $O'_R$  的基线长为  $b = t_x - 2 \frac{z_{2L} E}{z_{2L} + f_L}$ , 视差  $d$  表达为

$$d = \frac{f_R(t_x - x_{2L})}{z_{2R}} + E + D + \left( \frac{f_L x_{2L}}{z_{2L}} + E \right) - \frac{2z_{2L} E}{z_{2L} + f_L}. \quad (10)$$

根据左右 CCD 摄像机关系图可以求得  $Q_2$  的深度值为

$$l' = \frac{\left( t_x - 2 \frac{z_{2L} E}{z_{2L} + f_L} \right) f}{\left[ \frac{f_R(t_x - x_{2L})}{z_{2R}} + E + D + \left( \frac{f_L x_{2L}}{z_{2L}} + E \right) \right] - \frac{2z_{2L} E}{z_{2L} + f_L}}. \quad (11)$$

则系统误差为

$$l_c = l' - l, \quad l = z_{2L}. \quad (12)$$

在计算系统误差时, 匹配误差  $D=0.05$  pixel, 标定误差  $E=0.5826$  pixel, 因此, 这里系统误差约为 0.5%。

## 5 结 论

采用提出的图像匹配算法提高了双目 CCD 被动测距的精度。在测量过程中, 对目标图像应用改进的互相关算法与三次曲面拟合算法, 使其达到了图像的亚像素级匹配, 提高了测距的精度。通过对测量结果的误差分析, 修改了系统误差的计算公式。实验表明, 3 km 以内的目标测量精度优于 0.5%, 具有较高的实用价值。

### 参 考 文 献

- Hakkarainen J M. A 40×40 CCD/CMOS absolute-value-of-difference processor for use in a stereo vision system[J]. IEEE J Solid-State Circuits, 1993, 28(7): 799-807.
- Vallerand S, Kanbara M, Yokoya N. Binocular vision-based augmented reality system with an increased registration depth using dynamic correction of feature positions[C]. Proc IEEE Virtual Reality, 2003. 271-272.
- Zhou Fuqiang, Zhu Jigui, Yang Xueyou, et al.. A high speed CCD camera calibration technique[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(1): 96-100.  
周富强, 郝继贵, 杨学友, 等. CCD 摄像机快速标定技术[J]. 光学精密工程, 2000, 8(1): 96-100.
- Shen Lin, Yang Jinhua, Zhao Qun, et al.. Research on measuring telephoto lens focal length by using image matching [J]. J Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(11): 1043-1047.  
申琳, 杨进华, 赵群, 等. 基于图像匹配的长焦透镜焦距测量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(11): 1043-1047.
- Xu Jie. Analyzing and improving the tsai camera calibration method in machined vision[J]. Computer Engineering & Science, 2010, 32(4): 46-47.  
徐杰. 机器视觉中摄像机标定 Tsai 两步法的分析与改进[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(4): 46-47.
- Yong Lü, Feng Qibo, Qi Liangyu, et al.. Sub-pixel surface fitting algorithm in digital speckle correlation method[C]. The 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2009, 4: 959-962.
- Hao Zhicheng, Zhu Ming. Serial image registration based on multiple restriction matching algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 702-707.  
郝志成, 朱明. 基于多约束准则匹配算法的系列图像配准[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 703-706.
- Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant key-points[J]. International J Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- Shen Lin. High Precision Ranging Based on binocular CCD[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011. 17-22.  
申琳. 高精度双目 CCD 测距研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011. 17-22.
- Zhou Fengjiao, Su Xianyu, Li Meiju. Camera linear calibration method with a coplanar target[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(4): 70-74.  
邹凤娇, 苏显渝, 李美菊. 基于共面点的摄像机线性标定法[J]. 光电工程, 2005, 32(4): 70-74.
- Zheng Zhigang. Study on High-Precision Camera Calibration and Robust Stereo Matching[D]. Hefei: University of

Science and Technology of China, 2008. 21-22.

郑志刚. 高精度摄像机标定和鲁棒立体匹配[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008. 21-22.

- 12 Zhang Chao, Wang Qionghua, Li Dahai, *et al.*. Acquisition of parallax images for multiView auto-stereoscopic display based on SIFT matching algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 1989-1993.

张超, 王琼华, 李大海, 等. 基于 SIFT 匹配算法的多视点自由立体显示视差图像的生成[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 1989-1993.

- 13 Wang Junduo, Wang Riwei, Wen Xianbin, *et al.*. Fast matching algorithm of lunar CCD image[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(1): 011102.

王君铎, 汪日伟, 温显斌, 等. 月球 CCD 影像的快速匹配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 011102.