

# 基于改进 FAST 和 BRIEF 的双目视觉测量方法

宋超群<sup>1,2</sup>, 许四祥<sup>1,2\*</sup>, 杨宇<sup>1,2</sup>, 化猛奇<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>安徽工业大学特种重载机器人安徽省重点实验室, 安徽 马鞍山 243032;

<sup>2</sup>安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243032

**摘要** 针对传统 features from accelerated segment test (FAST) 算法检测到的角点存在聚簇现象和阈值依靠人为确定, 图像匹配算法匹配准确率较低和双目视觉测量精度较低等问题, 提出一种基于改进 FAST 和 binary robust independent elementary features (BRIEF) 的双目视觉测量方法。首先用 FAST 算法提取出特征点, 简化检测模板, 同时用自适应阈值提取特征点; 然后用改进的 BRIEF 描述特征点, 用像素点邻域的灰度平均值进行比较形成描述子; 之后用汉明距离完成匹配; 最后用灰度梯度法得到匹配点的亚像素坐标, 根据视差和三角测量原理计算出匹配点的三维空间坐标, 从而完成被测物体的尺寸测量。实验结果表明: 在角点检测方面, 改进的 FAST 检测到的角点更均匀; 在图像配准方面, 通过与其他算法进行对比, 验证了所提方法能有效地提高匹配准确率; 在测量方面, 所提方法测量的最低相对误差为 0.45%, 满足测量要求。

**关键词** 图像处理; 双目视觉; FAST 算法; BRIEF 描述符; 灰度梯度法

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0810013

## Binocular Vision Measurement Method Using Improved FAST and BRIEF

Song Chaoqun<sup>1,2</sup>, Xu Sixiang<sup>1,2\*</sup>, Yang Yu<sup>1,2</sup>, Hua Mengqi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Anhui Province Key Laboratory of Special Heavy Load Robot, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243032, China;

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243032, China

**Abstract** The detection using traditional features from accelerated segment test (FAST) algorithm showed the existence of clustering corner phenomenon and the threshold value depended on artificial determination. Further, the detection using image matching algorithm showed that the matching and binocular vision measurement accuracies are low. In this paper, we proposed a binocular vision measurement method using improved FAST and binary robust independent elementary features (BRIEF). First, the FAST algorithm was used to extract the feature points and simplify the detection template. Next, the adaptive threshold was used to extract the feature points, which are described using the improved BRIEF, and the descriptor was formed by comparing the gray average of the neighborhood of a pixel. Then, it was based on the Hamming distance to complete the match. Finally, we adopted the gray gradient method to obtain the subpixel coordinates of the matching points. The three-dimensional spatial coordinates of the matching points were calculated using the principle of parallax and triangulation, to complete the size measurement of the measured object. From the experimental results, the corner points detected using the

收稿日期: 2021-01-22; 修回日期: 2021-02-27; 录用日期: 2021-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(51374007)、安徽高校自然科学研究重点项目(KJ2020A0259)、特种重载机器人安徽重点实验室开放基金(TZJQR005-2021)

通信作者: \*xsxhust@ahut.edu.cn

improved FAST are more uniform with regard to corner detection, verifying that the proposed method effectively improves the matching accuracy compared with other algorithms. Besides, the minimum relative error of measurement of proposed method is 0.45%, which satisfies the measurement requirements.

**Key words** image processing; binocular vision; FAST algorithm; BRIEF descriptor; gray gradient method

## 1 引言

在钢铁行业中,通过火焰将连铸板坯切割成定尺长度是一个重要环节。但在火焰切割板坯的同时,板坯的下方会形成一条不规则的毛刺,若不及时清理,不仅会影响钢板的表面质量,而且会降低轧辊的寿命,因此需对毛刺进行及时清理。本课题组提出一种基于等离子弧高效去除板坯毛刺的装置<sup>[1]</sup>,在该系统中板坯的停放位置是通过光电开关来控制的,导致不能预知板坯在辊道上的位姿,从而机器人不能按照预先设定的固定轨迹切割板坯毛刺。故在去除毛刺之前,需通过双目视觉对板坯进行定位与测量,协助机器人完成轨迹规划,进而切除板坯毛刺。

目前,常用角点检测算法有 Harris<sup>[2]</sup>、Shi-Tomasi<sup>[3]</sup>、SUSAN<sup>[4]</sup>、features from accelerated segment test (FAST)<sup>[5]</sup>等。其中,FAST算法通过直接计算圆心像素点与圆周上像素点的关系找出图像中的角点,其计算速度远大于其他角点检测算法,因而受到广泛应用。但传统的FAST角点检测算法中的阈值依靠人为设置,没有很好的自适应性,同时检测到的角点存在冗余现象,因此需对传统的FAST算法进行改进。刘妍等<sup>[6]</sup>采用SAR-FAST,将FAST应用到合成孔径雷达(SAR)图像中,解决了传统FAST不能直接提取SAR图像角点的缺陷;王蒙等<sup>[7]</sup>构造了一种差分FAST特征,该特征利用像素差分减小了光照变化带来的影响;张绍荣等<sup>[8]</sup>建立基于尺度空间和网格抑制的方法,使得FAST具有尺度不变性,减少特征点冗余。上述几种方法尽管能将FAST应用到SAR图像中、消除光照的影响以及使FAST具有尺度不变性,但阈值的确定仍然依靠人为,不具有自适应性。

特征描述算法中 binary robust independent elementary features (BRIEF) 描述符<sup>[9]</sup>仅仅通过比较灰度值,形成二值化的位字符串形式,用汉明距离就能够测量两个描述符的相似程度,较传统的 scale-invariant feature transform (SIFT)、speeded up robust features (SURF) 特征描述器,具有速度快的优点。周莉莉等<sup>[10]</sup>利用强度质心法实现了 BRIEF

的旋转不变性;李莉<sup>[11]</sup>通过扩大滤波范围来处理目标积分图像,通过特征点主方向的旋转矩阵,实现 BRIEF 的改进。上述方法虽然实现了 BRIEF 的旋转不变性,但仍存在误匹配率较高的问题。

针对上述问题,本文提出了一种基于改进 FAST 和 BRIEF 的双目视觉测量方法。首先利用相机标定的结果对拍摄得到的图片进行校正;之后采用改进的 FAST 算法提取出图像中的特征点,解决了传统 FAST 算法阈值依靠人为确定的缺陷;然后采用改进的 BRIEF 描述符对提取出的特征点进行描述,提高了匹配准确率;最后采用灰度梯度法获取角点的亚像素坐标,提高了测量精度。

## 2 平行双目视觉测距原理

双目视觉测量技术用摄像机从不同位置对同一物体进行取像,利用物体在两个摄像机平面上成像点的不同,通过视差原理计算空间点的三维信息<sup>[12]</sup>。相对于非平行双目视觉,平行双目视觉具有结构简单、运算方便等优点,因此采用平行双目模型完成板坯尺寸的测量。图 1 是双目立体成像原理图。

在平行双目系统中,两摄像机的成像平面与被

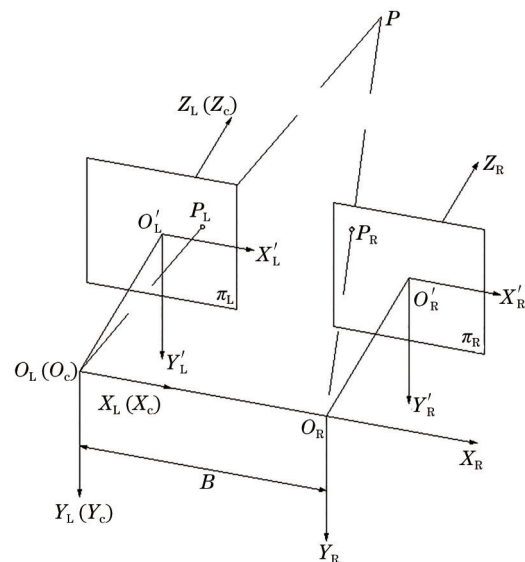


图 1 双目立体成像原理图

Fig. 1 Diagram of binocular stereo imaging principle

测物体之间构成一个三角形,根据相似三角形原理得出

$$\begin{cases} X_L = f \frac{X_c}{Z_c} \\ X_R = f \frac{(X_c - B)}{Z_c} \\ Y = Y_L = Y_R = f \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases}, \quad (1)$$

式中:\$(X\_L, Y\_L)\$为空间中点投影至左图像平面中的坐标;\$(X\_c, Y\_c, Z\_c)\$为世界坐标系中的点坐标;\$f\$为焦距;\$B\$为基线距。观测点的三维坐标为

$$\begin{cases} X_c = \frac{B \cdot X_L}{D_{\text{disparity}}} \\ Y_c = \frac{B \cdot Y_L}{D_{\text{disparity}}} \\ Z_c = \frac{B \cdot f}{D_{\text{disparity}}} \end{cases}, \quad (2)$$

式中:\$D\_{\text{disparity}}\$为视差。图 1 中,\$O\_c(X\_c, Y\_c, Z\_c)\$为世界坐标系;\$O'\_L(X'\_L, Y'\_L)\$为左图像的图像坐标系;\$O'\_R(X'\_R, Y'\_R)\$为右图像的图像坐标系;\$O\_L(X\_L, Y\_L, Z\_L)\$为左相机坐标系;\$O\_R(X\_R, Y\_R, Z\_R)\$为右相机坐标系;\$P\_L(X\_L, Y\_L)\$为观测点在左图像成像形成的图像坐标;\$P\_R(X\_R, Y\_R)\$为观测点在右图像成像形成的图像坐标;\$\pi\_L\$为左相机的成像平面;\$\pi\_R\$为右相机的成像平面。

### 3 板坯尺寸测量

板坯尺寸测量主要包括以下步骤:双目相机标定、图像校正、特征点提取、立体匹配、亚像素级坐标获得、特征点三维重建等,具体流程如图 2 所示。

#### 3.1 相机标定与图像校正

相机标定是双目视觉的基础和必要环节,其结果将影响目标物体的测量精度。通过标定确定相机的内、外参数,若已获得左右图像中特征点匹配关系,通过上述标定得到的参数,就能完成对空间点三维坐标的确定。

采用张正友标定法<sup>[13]</sup>进行标定,并利用 MATLAB 标定箱<sup>[14]</sup>实现。

图像校正技术<sup>[15]</sup>对左右相机拍摄得到的图像进行高度对齐,从而为后续特征点匹配提供便利。在实验过程中,两相机拍摄得到的图片不可能完全高度对齐,因此,为实现左右图像的行对准,在完成标定后,利用 MATLAB 工具箱完成图像的立体校

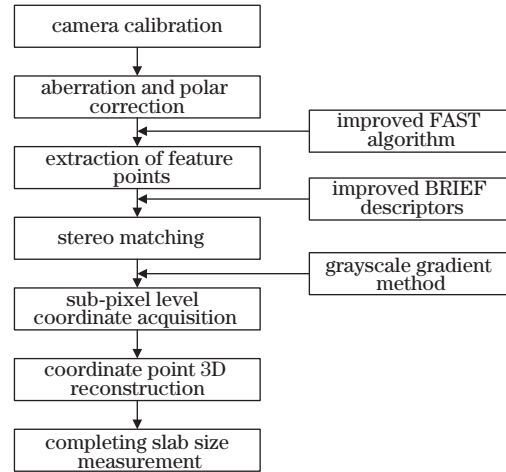


图 2 板坯尺寸测量流程

Fig. 2 Flow chart of slab size measurement

正过程。

#### 3.2 改进的 FAST 算法进行特征点提取

传统的 FAST 角点检测算法以像素点为圆心,对半径为 3 的 Bresenham 圆周上的点按顺时针方向进行编号,如图 3 所示。若圆周上有足够多连续点的像素的亮度比圆心像素的亮度加上阈值还亮,或比圆心像素的亮度减去阈值还要暗,则确定该圆心是一个角点<sup>[16]</sup>。一个候选点是否为角点用如下响应函数来判断:

$$N = \sum_{V_x \in C_{\text{circle}}} |I_x - I_p| > t, \quad (3)$$

式中:\$I\_x\$为圆周上任一点的像素灰度值;\$I\_p\$为候选点的像素灰度值;\$t\$为给定的阈值;\$p\$为待检测点。统计出圆周上满足(3)式的像素点的个数,若 \$N\$ 大于给定的一个阈值,则认为候选点为角点。一般情况下,\$N\$ 取为 12。同时,阈值 \$t\$ 的确定一般依靠经验来确定。最后,对候选角点进行非极大值抑制,得到最终角点。

传统 FAST 角点检测算法中的阈值依靠人为来确定,通过对图像的灰度值和对比度进行分析,提出一种基于图像对比度确定阈值的方法。

$$t = \alpha \sqrt{\frac{\sum_{1 \leq i \leq n} (I_{i\max} - I_{i\min})^2}{n}}, \quad (4)$$

式中:\$\alpha\$为比例系数;\$I\_{i\max}\$为图像中最大的第 \$i\$ 个灰度值;\$I\_{i\min}\$为图像中最小的第 \$i\$ 个灰度值;\$n\$为图像中前 \$n\$ 个最大(小)的灰度值,\$n\$ 取为 6。

具体实现如下。

1) 简化检测模板,将用于检测候选角点圆周上的 16 个点缩减为以半径为 2 的圆周上 12 个点,如

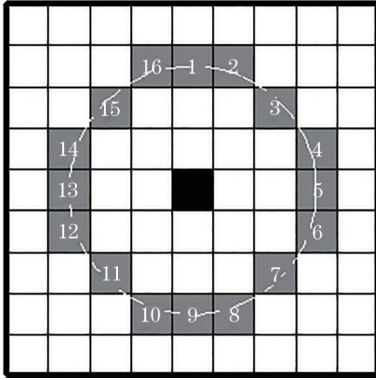


图 3 FAST 算法中的圆心及其 16 个像素的圆周  
Fig. 3 Center of the circle in FAST algorithm and its circumference with 16 pixels

图 4 所示。

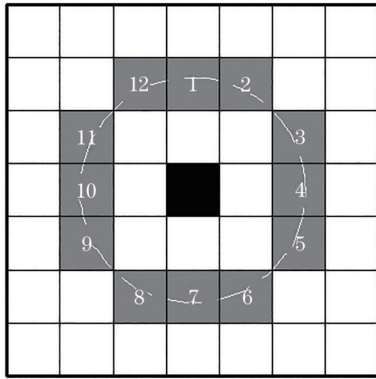


图 4 角点检测模板  
Fig. 4 Corner detection template

2) 首先检测 1, 4, 7, 10 这四个像素点, 若这四个像素点至少有 3 个满足角点条件, 则圆心才有可能为角点。

3) 若初步判断为角点, 进一步检测圆周上其他像素点, 若满足角点条件的像素点总数至少有 9 个, 则认为是角点。

4) 对角点进行非极大值抑制, 得到最终的角点。

考虑到步骤 2) 是对角点进行粗筛选的, 因此步骤 2) 中的阈值较小, 通过多次实验, 步骤 2) 中  $\alpha$  取值为 0.06, 步骤 3) 中  $\alpha$  取值为 0.12 时就能达到较好的效果。

### 3.3 改进的 BRIEF 描述符完成匹配

BRIEF 提供一种二值位字符串的描述符形式, 它不同于 SIFT 算法利用梯度直方图来计算特征描述子。它以特征点为中心定义一块大小为  $S \times S$  的补丁区域, 在这个补丁区域内按某一方式选取  $n_d$  个像素点对, 之后对于每个点对  $(p_j, q_j)$ , 比较这两个

点的灰度值大小, 若  $p_j$  点的灰度值小于  $q_j$  点的灰度值, 则在对应的二值串中的位置为 1, 否则置为 0, 将所有点对的比较结果串成一个二值位字符串的形式, 从而形成该特征点的描述符  $B$ 。

$$b_j = \begin{cases} 1, & I(p_j) < I(q_j) \\ 0, & I(p_j) \geq I(q_j) \end{cases}, \quad (5)$$

$$B = \sum_{1 \leq j \leq n_d} 2^{j-1} b_j. \quad (6)$$

$n_d$  在实际使用中选择 128, 256, 512。

传统的 BRIEF 描述符是通过比较像素点对的灰度值形成描述符的, 仅仅依靠单个点对进行比较很单一, 对图像的匹配具有一定的影响。因此提出一种像素点的邻域像素灰度平均值比较的方法, 具体实现如下: 首先以像素点为中心形成一个  $s \times s$  邻域, 计算出该邻域灰度值的平均值  $\bar{I}$ , 利用该平均值进行比较生成描述子, 完成对特征点的描述, 将所有点对的比较结果形成一个长度为  $l$  的二值串。

$$\bar{I} = \sum_{x,y} I(x,y) / k, \quad (7)$$

$$b_j = \begin{cases} 1, & \bar{I}(p_j) < \bar{I}(q_j) \\ 0, & \bar{I}(p_j) \geq \bar{I}(q_j) \end{cases}, \quad (8)$$

式中:  $k$  代表邻域内像素点个数;  $I(x, y)$  代表像素点的灰度值;  $\bar{I}(p_j)$  和  $\bar{I}(q_j)$  分别表示第  $j$  个像素点对的两个像素的邻域的灰度平均值。

## 4 板坯尺寸测量

### 4.1 相机标定及校正结果

采集到的图像大小为  $1600 \times 1200$ , 标定板使用  $11 \times 8$  棋盘格, 棋盘格大小为  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。标定的结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 双目系统内参数标定结果  
Table 1 Calibration result of internal parameters in binocular system

Parameter in left camera	Parameter in right camera
$\begin{bmatrix} 2200.5 & -1.3997 & 737.8416 \\ 0 & 2205.7 & 568.3220 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2223.3 & -2.3103 & 752.2 \\ 0 & 2228.9 & 620.9 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

标定结果的平均重投影误差为 0.28 pixel, 标定结果可用于后续测量计算。板坯校正前后的结果如图 5 所示。

### 4.2 特征点提取

在角点检测过程中, 一个好的角点检测算法应

表 2 双目系统外参数标定结果  
Table 2 Calibration result of external parameters  
in binocular system

Rotation matrix $R$	Translation matrix $T$
$\begin{bmatrix} 0.9999 & 0.0050 & 0.0156 \\ -0.0050 & 1.0000 & 0.0029 \\ -0.0155 & -0.0029 & 0.9999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -100.9393 \\ 0.7804 \\ 11.5155 \end{bmatrix}$

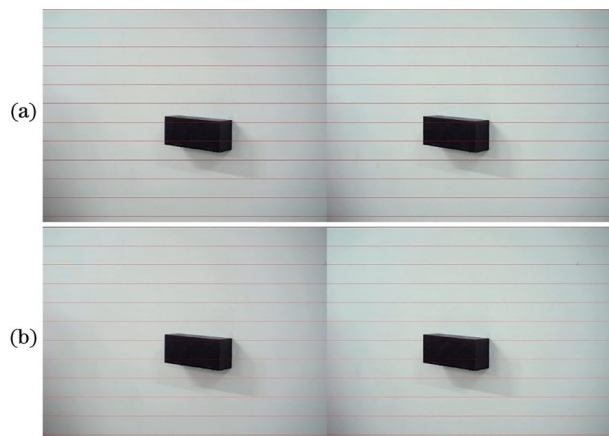


图 5 校正前后板坯模型对比图。(a)校正前;(b)校正后  
Fig.5 Comparison of the slab model before and after correction. (a) Before correction; (b) after correction

该具有检测时间短、检测角点均匀等优点。为了验证改进 FAST 算法在特征点分布上的优势,分别采用板坯模型和标准 Blox 图片进行角点检测,得到的效果分别如图 6、7 所示。从图中可以看出,在检测出板坯模型的关键特征点的同时,改进的 FAST 检测出的特征点更均匀,有效减少了角点聚集现象。

表 3 两种 FAST 算法检测结果对比  
Table 3 Comparison of detection results of two FAST algorithms

Parameter	Detection target	Traditional FAST algorithm	Proposed FAST algorithm
Number of feature points	Slab model	501	161
	Blox	431	294
Time /s	Slab model	0.148	0.326
	Blox	0.215	0.374

4.3 改进的 BRIEF 描述符完成匹配与亚像素点坐标获取  
在使用改进后的 FAST 算法完成特征点的提

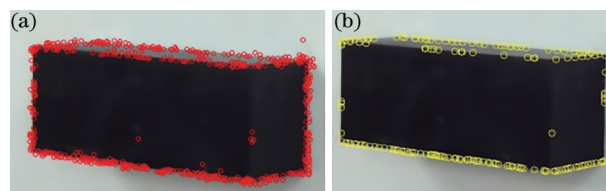


图 6 板坯模型角点检测对比图。(a)传统 FAST 角点检测算法;(b)所提改进的 FAST 算法  
Fig.6 Comparison of corner detection of the slab model. (a) Traditional FAST; (b) proposed improved FAST

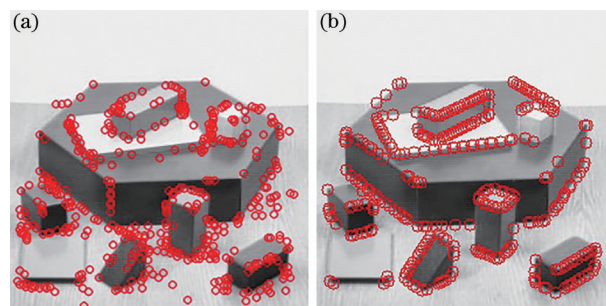


图 7 Blox 图片角点检测对比图。(a)传统 FAST 角点检测算法;(b)所提改进的 FAST 算法  
Fig.7 Comparison of corner detection of Blox picture. (a) Traditional FAST; (b) proposed improved FAST

表 3 为传统 FAST 算法和改进 FAST 算法检测结果对比。从表中可以看出,改进的 FAST 算法有效地减少了角点冗余现象,特征点检测的数量分别减少了 340 和 137,但由于所提改进的 FAST 算法需要依据图像对比度确定阈值,因此检测时间长于传统 FAST 角点检测算法。

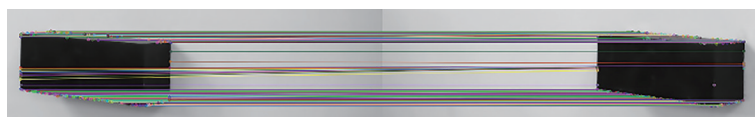


图 8 匹配图  
Fig.8 Matching diagram

取之后,使用所提改进的 BRIEF 描述符对特征点进行描述,最后用 Hamming 距离完成匹配,匹配结果如图 8 所示。

通过筛选得到测量所需的最终角点匹配,如图 9 所示。

为进一步提高板坯尺寸测量的精度,通过上述算法得到的仅仅是角点的像素级坐标,在此基础上进行进一步的分析,得到角点的亚像素级坐标。假设  $q$  是实际角点,一个起始角点  $p$  在实际亚像素角点附近。 $p$  点在  $q$  点附近的邻域中,若  $p$  点在均匀区

域内部,则  $p$  点的梯度为 0,如图 10(a) 所示;若  $p$  点在边缘上,则  $p$  点的梯度方向垂直边缘方向,如图 10(b) 所示。在图 10 中两种情况下, $p$  点的梯度与  $p$ 、 $q$  两点所构成的向量的点积均为零<sup>[17]</sup>。从而得到关键特征点分别投影在左右图像上的像素坐标系下的坐标以及在空间坐标系中的三维坐标,如表 4 所示。



图 9 最终匹配点对

Fig. 9 Final matching point pairs

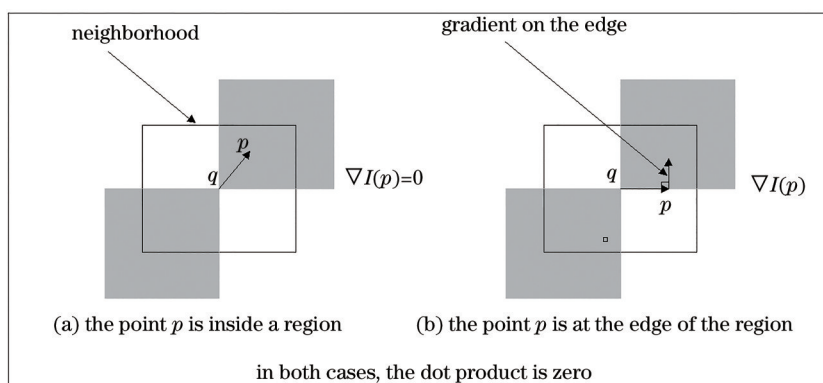


图 10 计算亚像素角点

Fig. 10 Calculating sub-pixel corner points

表 4 匹配点坐标

Table 4 Matching point coordinates

Point	Left image pixel coordinate /pixel	Right image pixel coordinate /pixel	Coordinate in the world coordinate system /mm
A	(723.77, 717.487)	(571.616, 717.918)	(-79.7535, 100.9622, 1459.6821)
B	(725.41, 568.935)	(573.926, 568.744)	(-79.0136, 2.2250, 1466.1381)
C	(805.564, 561.832)	(659.936, 562.203)	(-26.6387, -2.4136, 1525.0945)
D	(1124.86, 588.755)	(961.164, 588.999)	(173.1698, 14.4136, 1356.7617)

## 5 数据分析

### 5.1 测距精度分析

本实验中采用的板坯模型尺寸为 263 mm × 100 mm × 80 mm, 测量得到的各边长如表 5 所示。

从表 5 中可以看出,板坯模型测量的最小相对误差是 0.45%, 最高相对误差达到 1.25%, 其中 AB 边和 BC 边的测量误差较大, 这一方面是拍摄原因, 导致角点的检测与实际的角点存在一定的偏差, 另一方面与相机标定的结果有关。

表 5 板坯模型尺寸测量结果

Table 5 Size measurement results of the slab model

Side	Measured size /mm	Actual size /mm	Relative error /%
AB	98.9508	100	1.05
BC	78.9968	80	1.25
CD	261.8063	263	0.45

### 5.2 匹配准确率分析

实验硬件环境: Inter(R) Core(TM) i5200; 处理器内存 8 GB; 64 位 Window10 操作系统。软件实施平台为 VS2017 + Opencv4.2.0。分别比较 SIFT、传

统的 FAST+BRIEF、文献[10]算法、所提算法的匹配准确率和时间,结果如表 6 所示,匹配效果如图 11 所示。传统的 SIFT 算法匹配的时间最长,且不能匹配上关键特征点;传统的 FAST 算法+BRIEF 描述符虽然时间最短,但在匹配准确率上最低,同时匹配

对数较多,增加了后面筛选的时间;文献[10]算法由于增加了方向的计算,因此较传统的 FAST+BRIEF 算法,匹配时间上有所增加,但匹配准确率有所提高;所提算法由于计算邻域的平均灰度值,所以时间上有所增加,但匹配准确率最高。

表 6 四种算法的对比结果

Table 6 Comparison results of the four algorithms

Matching algorithm	Number of coarse matching point pairs	Number of correct matching point pairs	Correct rate /%	Total time /s
SIFT algorithm	68	30	44.12	9.956
Traditional FAST+BRIEF	180	68	37.78	1.108
Algorithm in Ref. [10]	84	46	54.76	1.400
Proposed algorithm	127	96	75.59	2.035

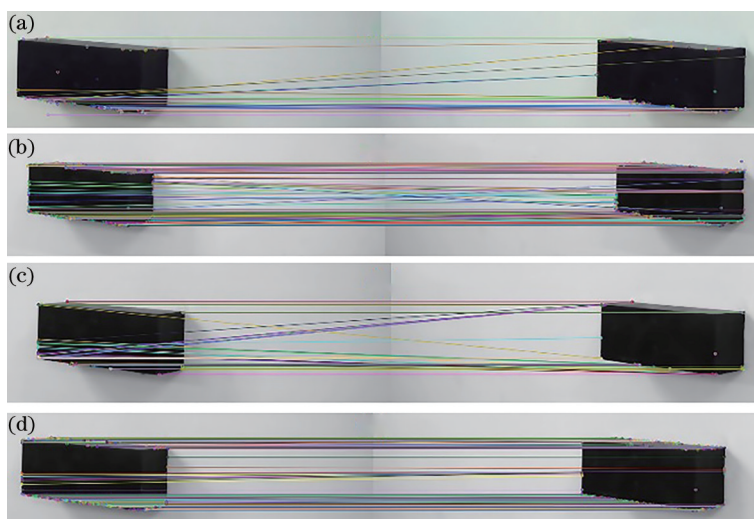


图 11 特征点匹配。(a) SIFT 算法;(b)传统 FAST+BRIEF;(c)文献[10]算法;(d)所提算法

Fig. 11 Feature point matching. (a) SIFT algorithm; (b) traditional FSAT+BRIEF; (c) algorithm in Ref. [10]; (d) proposed algorithm

### 5.3 对比分析

分别比较所提算法、传统 FAST 算法+BRIEF 描述符、文献[10]算法的测量精度,如表 7 所示。从表中可以看出,因为文献[10]算法增加了主方向的计算,因此耗时略有增加,但测量精度有所提高;所

提算法检测到的角点较为精确,并且增加了角点亚像素坐标的获取这一步骤,因而所提算法的板坯测量精度最高,同时由于匹配对数较少,从而减少了筛选时间,与文献[10]算法相比相差不多。

表 7 板坯测量精度分析

Table 7 Slab measurement accuracy analysis

Algorithm	Distance measuring length /mm	True length /mm	Running time /s	Relative error /%
Traditional FAST+BRIEF	259.4835	263	1.472	1.34
Algorithm in Ref. [10]	260.5256	263	1.688	0.94
Proposed algorithm	261.8063	263	1.859	0.45

## 6 结 论

针对传统的 FAST 角点检测算法的阈值需人为确定、有角点检测聚集现象和双目视觉测量精度

低的问题,采用一种改进的 FAST 算法作为特征检测器。该算法首先将用来检测角点的圆周像素的 16 个像素点缩小为 12,并且利用图像的对比度信息设置图像的阈值;使用改进的 BRIEF 描述符完成特

征点的匹配,实现图像的精准匹配;最后利用灰度梯度法获取关键特征点的亚像素坐标,提高测量精度。实验结果表明,改进的FAST算法检测到的特征点更加均匀,使用改进的BRIEF描述符实现特征点的描述,并用汉明距离完成匹配,匹配效果更好;同时在测量过程中采用亚像素级坐标,提高了测量精度,为今后机器人自主去除板坯毛刺提供依据。

### 参 考 文 献

- [1] Xu S X, Chen F Q, Gao P Q, et al. System for removing slab burr: CN102935547A[P]. 2013-02-20. 许四祥, 陈富强, 高培青, 等. 一种去除板坯毛刺的系统: CN102935547A[P]. 2013-02-20.
- [2] Harris C G, Stephens M. A combined corner and edge detector[J]. Proceedings of the Alvey Vision Conference, 1988, 1988(3): 147-151.
- [3] Shi J B, Tomasi. Good features to track[C]//1994 Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 21-23, 1994, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 1994: 593-600.
- [4] Smith S M, Brady J M. SUSAN: a new approach to low level image processing[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1): 45-78.
- [5] Rosten E, Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection[M]//Leonardis A, Bischof H, Pinz A. Computer vision-ECCV 2006. Lecture notes in computer science. Berlin: Springer, 2006, 3951: 430-443.
- [6] Liu Y, Yu H, Yang W, et al. SAR image registration using SAR-FAST corner detection[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(2): 430-436. 刘妍, 余淮, 杨文, 等. 利用SAR-FAST角点检测的合成孔径雷达图像配准方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(2): 430-436.
- [7] Wang M, Dai Y P. Local robust feature based on FAST corner detection[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(10): 1045-1050. 王蒙, 戴亚平. 基于FAST角点检测的局部鲁棒特征[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(10): 1045-1050.
- [8] Zhang S R, Zhang W Y, Li Y, et al. Improved UAV scene matching algorithm based on FAST corner and FREAK descriptor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(4): 102-110. 张绍荣, 张闻宇, 李云, 等. 基于FAST角点和FREAK描述符改进的无人机景象匹配算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4): 102-110.
- [9] Calonder M, Lepetit V, Ozuysal M, et al. BRIEF: computing a local binary descriptor very fast[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2012, 34(7): 1281-1298.
- [10] Zhou L L, Jiang F. Image matching algorithm based on FAST and BRIEF[J]. Computer Engineering and Design, 2015, 36(5): 1269-1273. 周莉莉, 姜枫. 基于FAST和BRIEF的图像匹配算法[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(5): 1269-1273.
- [11] Li L. Objects feature point match algorithm based on image structure and improved brief detector[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(2): 29-33. 李莉. 基于图像结构与改进Brief检测算子的目标匹配算法[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(2): 29-33.
- [12] Zhang G J. 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.
- [13] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [14] Wang Z Z. Binocular stereo vision distance measurement system based on a combination of MATLAB and OpenCV[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2013. 汪珍珍. 基于MATLAB与OpenCV相结合的双目立体视觉测距系统[D]. 天津: 天津理工大学, 2013.
- [15] Li J F, Bian J L. Least square stereo matching algorithm based on epipolar constraint[J]. Microcomputer Information, 2011, 27(9): 236-239. 李金凤, 边继龙. 基于极线校正的最小二乘立体匹配[J]. 微计算机信息, 2011, 27(9): 236-239.
- [16] Rosten E, Porter R, Drummond T. FASTER and better: a machine learning approach to corner detection [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2010, 32(1): 105-119.
- [17] Chen D, Zhang G. A new sub-pixel detector for x-corners in camera calibration targets[J]. Václav Skala Union Agency, 2005: 97-100.