

# 基于改进 SURF 算法的双目视觉测量系统研究

彭泽林, 谢小鹏

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

**摘要:** 针对双目视觉测量中所使用的 SURF 图像匹配算法精度不高的问题, 提出了一种改进 SURF 算法的图像匹配方法并将其运用到双目视觉测量中; 首先通过经典 SURF 算法检测和描述图像特征点、特征向量; 其次采用双向特征向量匹配策略对匹配点进行初始过滤; 最后采用 PROSAC 算法根据极线约束几何模型对初始过滤后的匹配点进行二次筛选, 得到最终的优质匹配集合; 实验表明, 改进 SURF 算法具有更高的匹配准确性和较好的算法实时性, 运用改进 SURF 匹配算法的双目测量系统可实现更准确的目标测距定位。

**关键词:** 双目测量; 特征匹配; SURF 算法; PROSAC 算法

## Research on Binocular Stereo Measurement System Based on Improved SURF Algorithm

Peng Zelin, Xie Xiaopeng

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the SURF image matching algorithm used in binocular stereo measurement is not accurate enough, an improved image matching algorithm based on SURF algorithm is proposed and applied to the binocular distance measurement system. Firstly, SURF algorithm is used to detect and describe feature points and feature vectors. Secondly, reverse feature vectors matching strategy is used to initialize the matching points set. Finally, the PROSAC algorithm is used to select the initial matching point set according to the polar geometric model, and get the final good match set. Experiments show that the improved SURF algorithm has higher matching accuracy and good real-time performance, and the binocular measuring system with improved SURF matching algorithm can achieve more accurate positioning.

**Keywords:** binocular stereo vision; feature matching; SURF algorithm; PROSAC algorithm

## 0 引言

随着当今工业自动化和智能化的不断发展, 工业机器人在生产中的地位得到了前所未有的重视。机器视觉定位作为机器人相关技术的一个重要的分支, 其准确度的提高成为了研究人员努力的目标和方向。

双目立体测量技术是基于计算机视觉基础发展起来的一项重要的非接触式三维测量技术, 因其结构简单, 测量范围较大以及较高的测量精度, 在生产生活中得到了广泛的应用<sup>[1-4]</sup>, 成为机器视觉定位中的一种常用方法。在双目视觉测量系统中, 图像匹配过程是对图像特征点的提取和特征点之间的对应过程, 匹配的结果对后续的处理至关重要, 直接影响了双目视觉测量系统的准确性, 因此受到了广泛的关注。SURF (speeded-up robust features) 算法是 Bay<sup>[5]</sup> 等人在 SIFT<sup>[6]</sup> (scale-invariant feature transform) 特征检测算法的基础上提出的改进算法, 不仅保持了 SIFT 算法的检测精度, 而且缩短了算法的运行时间。由于 SURF 算法本身缺陷, 进行特征点匹配时容易产生特征点对的误匹配, 因此许多研究学者也在这方面进行了大量工作。

收稿日期: 2018-01-11; 修回日期: 2018-01-30。

作者简介: 彭泽林(1993-), 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 主要从事机器视觉方向的研究。

Maresca<sup>[7]</sup> 等将 NNDR 策略加入经典 SURF 算法中, 提高了匹配精度, 不过在去除误匹配的同时也去除了大量正确匹配; 陈洁<sup>[8]</sup> 等采用基于极线约束几何模型的 RANSAC 算法剔除经典 SURF 算法的误匹配, 不过由于 RANSAC 算法对样本进行随机抽样, 造成算法实时性较差; 韩峰<sup>[9]</sup> 等将基于极线约束的 RANSAC 改进匹配算法运用到双目视觉测量中, 提高了经典 SURF 算法双目立体视觉测量精度。

在上述研究基础上, 提出一种改进 SURF 算法的图像匹配方法, 通过两次匹配点筛选提高匹配精度, 并将改进算法与双目视觉测量模型相结合, 完成目标定位测距。通过实验证明, 改进方法在准确性和实时性上均有较好表现, 应用改进 SURF 算法的双目视觉测量系统也可达到较高定位测量精度。

## 1 双目视觉测量原理

双目视觉测量是通过双目相机采集目标图像对, 获取目标点三维坐标的测量方法<sup>[10]</sup>。模仿人眼的双目结构, 根据采集目标图像对计算目标点在左、右图像上的视差 (disparity) 计算空间目标点的三维信息。图 1 为双目立体视觉测量原理图, 其中  $O_l - x_l y_l z_l$  为左相机坐标系,  $O_r - x_r y_r z_r$  为右相机坐标系。

对于空间任意一点  $P$  点, 在左相机成像平面的投影点

为  $P_l$ ，在右相机成像平面的投影点为  $P_r$  ( $P_l$  与  $P_r$  互为对应点)。

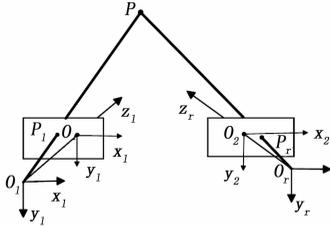


图 1 双目立体视觉测量原理

通过匹配  $P_l$  和  $P_r$  的对应关系，根据双目视觉测量系统的定位原理，即式 (1) 可计算出空间点  $P$  在左相机坐标系的空间三维坐标。

$$\begin{cases} Z = \frac{Bf}{d - cx + cx'} \\ X = \frac{x - cx}{f}Z = \frac{(x - cx)B}{d - cx + cx'} \\ Y = \frac{y - cy}{f}Z = \frac{(y - cy)B}{d - cx + cx'} \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中， $B$  为左、右相机坐标系在水平方向距离，即双目视觉测量系统的基线距； $f$  为左右相机的镜头焦距参数； $c_x, c_x'$  分别是左右相机图像中心在光心水平方向上的偏移； $c_y$  为左相机的成像平面中心在光心垂直方向上的偏移量； $X, Y, Z$  分别是  $P$  点在左相机坐标系下的三维坐标， $x, y$  分别是  $P$  点在左图像平面的坐标， $d$  为  $P$  点的视差值。其中，基线距  $B$ 、镜头焦距  $f$ ， $c_x, c_x'$  以及  $c_y$  等参数可通过相机内、外标定获取<sup>[11-12]</sup>。

## 2 经典 SURF 算法匹配原理

经典 SURF 算法是在图像尺度空间上对局部特征点检测和描述方法，其特征提取结果不受图像旋转、缩放等因素的影响，具有仿射不变性。经典 SURF 算法一般包括特征检测，主方向确定，特征描述以及特征匹配等 4 个步骤。

1) 特征检测：SURF 算法对图像特征点进行特征检测时，利用 Hessian 矩阵对图像像素点进行判别式求解。针对像素点  $f(x, y)$ ，其 Hessian 矩阵如式 (2) 所示，根据判定结果取值将像素点进行分类。当 Hessian 矩阵判别式取得局部最值时，即判定当前像素点为极值点，由此定位图像特征点位置。

$$H(f(x, y)) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

2) 主方向确定：以 (1) 中确定的特征点为圆心，根据圆心特征点的尺度值  $S$ ，生成半径为  $6S$  的圆形域。在圆形域内，以  $60^\circ$  扇形作为扫描区间，统计扫描区间内所有像素点水平 Harr 小波特征和垂直 Harr 小波特征总和。旋转扫描区间，特征点的主方向即为扫描得到最长的方向向量。

3) 特征描述：在 2) 中特征点的主方向确定后，以特征点为中心，沿着特征点主方向建立一个  $4 \times 4$  的矩形区域。矩形区域中每个子区域统计 25 个像素相对于主方向上的水平和垂直 Harr 小波特征，分别记做  $dx$  和  $dy$ 。通过对 Harr 小波特征加权，得到水平方向和垂直方向上加权小波响应值和响应值绝对值，并分别记做  $\sum dx, \sum |dx|, \sum dy, \sum |dy|$ ，每个子区域形成的 4 维向量记为  $V$ ：

$$V = \{ \sum dx, \sum |dx|, \sum dy, \sum |dy| \} \quad (3)$$

由于存在  $4 \times 4$  个子区域，因此对每个特征点形成 64 维的特征描述向量。

4) 特征匹配：通过计算特征描述向量之间的欧氏距离  $Uab = \sqrt{\sum_i (ai - bi)^2}$ ， $i \in (1, 2, \dots, n)$  对图像特征点匹配，查找第一幅图像中的特征点的特征向量在另一幅图像中特征向量的最邻域，从而确定第一幅图像中的特征点在另一副图像中的匹配点，得到最初的匹配点集合。

## 3 改进 SURF 图像匹配算法

采用经典 SURF 图像匹配算法后可以得到大量特征点和匹配点集，不过由于经典 SURF 算法自身缺陷以及图像遮挡、背景混乱等原因，匹配点集中会出现较多误匹配点对。在双目视觉测量系统中，若图像匹配过程出现大量误匹配，则会导致视差计算错误，从而影响最终的三维重建精度<sup>[13]</sup>。

本文的改进算法是在经典 SURF 图像匹配算法特征点检测及特征向量描述的基础上，首先采用双向特征向量匹配策略对经典 SURF 算法得到的匹配点集进行初始过滤，接下来采用 PROSAC 算法根据极线约束模型对初始过滤后的匹配点集进行二次筛选，得到最终的优质匹配集合，算法流程如图 2 所示。

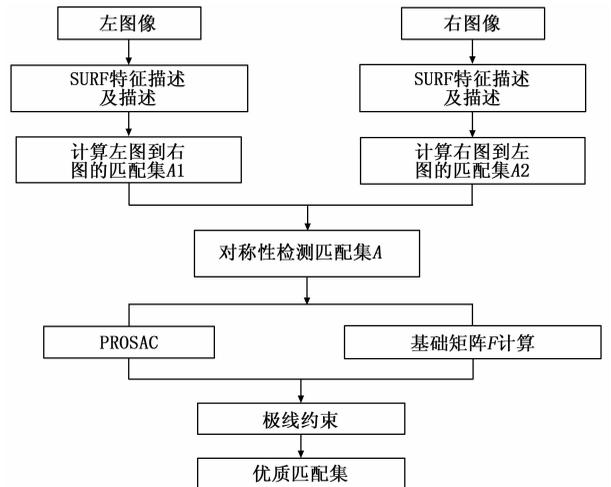


图 2 改进图像匹配算法流程图

### 3.1 双向特征向量匹配

由于经典 SURF 算法特征匹配过程是单向的，即只在图像 2 特征点中寻找图像 1 中特征点的匹配点，因此匹配点

集中会出现较多误匹配点对。对于经典 SURF 算法的缺陷, 采用双向特征向量匹配策略, 对图像 1 和图像 2 的特征向量进行双向匹配, 并对特征向量匹配结果添加一定约束, 提高匹配点集的正确率。

首先通过经典 SURF 图像匹配算法, 获取图像 1 特征向量与图像 2 特征向量的最近邻距离  $d_1$  与次近邻距离  $d_2$ , 设置阈值  $R$ 。若  $d_1$  与  $d_2$  的比值小于阈值  $R$ , 则认为此对匹配点是正确的匹配点对, 结果存入点集  $A_1$  中。

接下来调整匹配顺序, 通过经典 SURF 图像匹配算法得到图像 2 中特征点在图像 1 中的匹配点, 计算图像 2 中特征向量与图像 1 中特征向量的最近邻距离  $d_1'$  与次近邻距离  $d_2'$ 。若  $d_1'$  与  $d_2'$  的比值小于  $R$ , 则将结果存入点集  $A_2$  中。

最后将点集  $A_1$  与点集  $A_2$  取交集, 则得到了双向特征向量初始过滤后的匹配集  $A$ , 即:

$$A = A_1 \cap A_2 \quad (4)$$

经过实验验证, 当阈值  $R$  取值  $0.4 \sim 0.6$  时, 能获得较好误匹配过滤效果。

### 3.2 PROSAC 算法获得最终匹配

PROSAC (Progressive Sample Consensus) 算法是由 Ondrej Chum<sup>[14]</sup> 等提出的 RANSAC (Random Sample Consensus) 算法的改进算法。

PROSAC 算法和 RANSAC 算法的目的都是从数据集中将异常数据筛选出来。RANSAC 算法思路是随机抽样选取样本来拟合具体的几何约束模型, 满足几何约束模型的样本称为内点, 根据样本拟合情况调整几何约束模型参数, 往复循环, 直到从数据集中筛选中最多内点; PROSAC 算法是在 RANSAC 算法的基础上, 对样本拟合顺序做了改进。首先对数据集内样本按照某种标准进行排序, 排序靠前的样本可能是正确模型的内点, 根据内点样本确定的模型参数越好, 几何约束模型调整幅度也越小。因此对于内点概率高的数据集, 采用 PROSAC 算法无论是在鲁棒性还是在时间效率上都要优于采用 RANSAC 算法。

由于最初的匹配点集经过了双向特征向量匹配步骤的初次筛选, 点集内的样本是内点的概率很高, 因此非常适合采用 PROSAC 算法。

本文采用的 PROSAC 算法是基于极线约束模型, 采用基本矩阵作为参数模型, 其原理如图 3 所示。

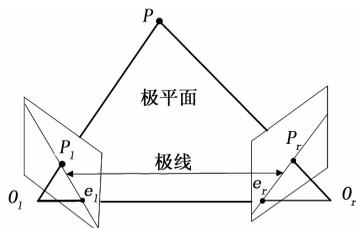


图 3 极线约束原理图

图 3 中,  $P$  为空间中一点, 分别在左、右相机成像平面上的成像点为  $P_l$  和  $P_r$ 。空间点  $P$  和左右相机光心  $O_l$  和

$O_r$  三点构成的平面称为极平面,  $O_l$  和  $O_r$  的连线与成像平面的交点  $el$  和  $er$  称为极点, 极平面与左右成像平面的交线  $l1(plel)$  和  $l2(prer)$  都为极线。

由图 3 可知, 根据双目视觉系统图像采集特点, 无论  $P$  点位置如何改变, 其在左成像平面的点  $P_l$  一定会通过极线  $l1$ , 右成像平面的点  $P_r$  一定会通过极线  $l2$ , 所以  $P_l$  的对应点一定在  $l2$  上,  $P_r$  的对应点一定在  $l1$  上, 这种约束关系就是极线约束。通过基础矩阵  $F$  可以将像点  $P_l$  和  $P_r$  的坐标关系表示出来, 即为:

$$P_r^T P_l = 0 \quad (5)$$

现将采用 PROSAC 算法剔除误匹配点对步骤总结如下:

(a) 根据经典 SURF 特征描述距离, 对点集  $A$  中的匹配点对进行排序;

(b) 根据取样次数  $t$  确定假设生成集的大小  $n$ , 即认为内点在前  $n$  中;

(c) 从前  $n$  中随机抽取 7 个数据, 和第  $n$  个数据组成计算样本, 根据 8 点法计算基础矩阵;

(d) 对每个基础矩阵  $F$ , 计算每对匹配点到各自极线的距离平方和记为  $D$ , 设定阈值  $T$ , 将符合  $D < T$  的匹配点对作为内点, 统计内点的个数;

(e) 对步骤 (b) ~ (d) 进行循环, 若符合终止条件, 则结束循环, 根据所对应的基础矩阵, 剔除误差较大匹配点。

出现以下情况, 则算法循环终止:

(a) 当最大内点在样本中比例达到或超过设定的阈值时, 则算法循环终止;

(b) 当  $M$  次采样次数后样本中内点数量不再增加, 则算法循环终止;

(c) 当  $N$  次采样次数后, 内点的增加没有减少模型的误差和, 则算法循环终止。

## 4 实验及结果分析

为了验证前述改进算法的准确性和采用该算法的双目视觉测量精度, 下面进行具体的实验测试。

### 4.1 实验平台

搭建的实验平台如图 4 所示。图像采集设备采用两个 MicroVision 工业摄像头组成双目视觉系统, 相机分辨率  $1280 \times 960$ , 帧率 15 fps; 平面标定板采用高精度棋盘格型金属平面标定板, 格边长  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ , 打印精度为  $\pm 0.01 \text{ mm}$ ; 视觉软件为自主开发, 开发环境 Visual Studio, 开发语言为 C++; 软件运行环境为 Windows7 操作系统的计算机, 采用 Intel (R) Core i3 3210 M CPU @ 2.5 GHz, 4 GB 内存。



图 4 双目视觉测量实验平台

### 4.2 图像立体匹配实验

为了检验本文改进图像匹配算法,使用双目视觉系统采集的图像对经典 SURF 图像匹配算法、文献 [9] 改进算法和本文改进算法进行验证和比较,其匹配结果如图 5 和表 1 所示。



(a) 经典SURF算法 (b) 文献[9]改进算法 (c) 本文改进算法

图 5 图像立体匹配结果

表 1 3 种算法匹配结果对比

使用方法	匹配点对	正确匹配点对	正确率 / %	匹配时间 / ms
经典 SURF 算法	48	35	72.92	1409
文献[9]改进算法	38	35	92.11	2365
本文改进算法	33	33	100	1653

由图 5 和表 1 所示,经典 SURF 得到最多的匹配点对,误匹配现象也非常明显,匹配正确率不高。文献 [9] 采用了 RANSAC 算法对经典 SURF 匹配点集进行了筛选,提高了匹配正确率;本文改进算法由于采用了双向特征向量匹配以及 PROSAC 算法,因此获得的匹配点对数量较经典 SURF 算法和文献 14 算法少,不过由于经过了两次匹配点集的筛选,因此没有出现误匹配的现象,匹配正确率达到 100%。匹配时间上,由于本文改进算法和文献 [9] 改进算法都是在经典 SURF 特征检测和匹配结果上进行改进,因此算法运行时间都高于经典 SURF 算法,不过本文改进算法相较文献 [9] 改进算法,在匹配效果近似的情况下,在算法的运行时间上有了明显的提升,能够更好地满足实时性的需求。

### 4.3 双目视觉测量定位实验

为了验证本文改进图像匹配算法在双目视觉测量中的测量精度,基于搭建的实验平台进行目标测量实验。

首先采用张氏平面标定法<sup>[12]</sup>对双目相机单目和立体标定,求取基线距  $B$ 、镜头焦距  $f$ ,  $c_x$ 、 $c_x'$  以及  $c_y$  等双目系统内、外参数。

固定双目相机及测量目标物体,采集测量目标左、右图像,并分别采用经典 SURF 算法、文献 [9] 改进算法和本文改进算法对左、右图像进行图像匹配。根据匹配结果统计所有特征点的图像坐标,并计算其对应特征点的视差值。

通过式 (1) 计算图像特征点在左相机坐标系下的三维坐标值,对所有特征点深度方向测量距离求取平均值,即可估计为目标物体空间距离,实现对目标物体的深度距离测量。比较 3 种图像匹配方法测量结果,并和实际距离相比较,分析采用不同匹配算法的双目视觉测量精度。

移动测量目标物体,在不同位置进行对比实验,并将

测量值与实际值进行比较,所得实验结果如表 2 所示。

表 2 双目测量定位实验结果

实测距离 /mm	经典 SURF 算法/mm	文献[9]改进算法/mm	本文改进算法/mm
500	508	505	503
600	611	607	604
700	713	708	706
800	815	811	805
900	918	912	906
1000	1024	1013	1 008

由表 2 数据可知,在实测距离 500~1 000 mm 测距范围内,运用本文改进算法相较于采用经典 SURF 算法和文献 [9] 改进算法,双目测量定位结果更准确,而且随着实测距离的增加,本文改进算法的测量精度优势更为明显。

定位结果误差经分析,主要有以下几个来源:

- 1) 相机标定过程产生的误差对深度信息的计算产生影响;
- 2) 图像处理的过程中,提取的特征点的图像坐标精度不够,对视差计算结果造成影响。
- 3) 采用特征点坐标平均值来估计目标物体空间坐标存在一定误差。

### 5 结束语

针对双目立体测量中所使用的图像匹配算法精度不高的问题,提出了一种基于 SURF 算法的改进图像匹配方法。该方法首先采用经典 SURF 算法获取特征点和特征向量;接下来采用双向特征向量匹配原则剔除误匹配点对;最后采用基于极线约束的 PROSAC 算法对匹配点集进行筛选。同时对经典 SURF 算法、文献 [9] 算法和本文改进算法进行了图像匹配对比实验,结果表明本文改进 SURF 图像匹配算法具有更高的匹配准确性和较好的算法实时性。基于搭建的双目视觉测量实验平台进行测量定位实验,采用本文改进算法可实现更准确的目标测量定位,具有一定工程运用价值。

#### 参考文献:

[1] 徐昌源,全燕鸣,郭清达.改进最小二乘法双目视觉位姿测量技术与测试[J].中国测试,2016,(9):27-30,35.

[2] 许允喜,陈方.基于视差空间运动估计的高精度立体视觉定位[J].光电工程,2012,(10):95-102.

[3] 李光乐,谢小鹏.水下移动双目视觉高精度定位方法[J].中国测试,2015,(S1):37-39.

[4] 汪神岳,刘强,王超然,等.基于双目立体相机的室外场景三维重建系统设计[J].计算机测量与控制,2017,25(11):137-140,145.