

基于粗定位-精匹配的双目视觉目标定位方法

杜玉晓¹ 郑晓森¹ 陈祎杭¹ 王小桥² 王公东² 钟楠²

(1.广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006 2.广东海信电子有限公司, 广东 江门 529000)

摘要: 为提高双目视觉系统定位精度, 提出一种基于粗定位-精匹配的双目视觉目标定位方法。利用 Canny 边缘检测算法对左、右图像中的目标物体进行识别, 提取目标物体最大、最小矩形区域, 从而实现目标物体的粗定位。采用 SIFT 算法得到左、右图像中目标的特征点; 用 RANSAC 得到精确匹配点, 并计算出左、右图像中物体之间的透视变换关系; 根据透视变换关系确定左图像的目标特征点在右图像目标潜在匹配点的位置, 得到目标物体的三维位姿及质心坐标, 从而实现目标物体的精匹配。实验结果表明: 本文方法平均测距误差为 4.6 mm, 平均耗时为 1.265 s, 相比 SIFT、SURF 特征匹配定位方法, 具有定位精度高、运行时间短的特点。

关键词: 双目立体视觉; 粗定位; 精匹配; SIFT 算法; RANSAC; 透视变换

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1674-2605(2021)05-0002-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2021.05.002

0 引言

随着机器人自主化的不断深入, 对机器视觉技术的要求也不断提高。以往机器视觉主要通过像素灰度和梯度获取图像信息, 但三维图像信息更为丰富。双目立体视觉技术通过模拟人类的视觉结构, 获取物体不同角度的图像, 利用投影点之间的视差恢复物体的空间坐标, 实现目标三维空间位置的测量。该技术主要基于三角测量原理, 为非接触式测量, 具有成本低、结构简单、效率高等特点, 广泛应用于机器人导航、机器人工业生产、农业采摘及三维场景感知等场合, 实现机器人在未知环境中快速、准确地识别目标物体信息, 规划可行路径, 完成基于视觉的任务。目前, 双目立体视觉技术已成为自主机器人技术的关键组成部分^[1-2]。

双目立体视觉技术的核心是双目视觉定位的精度, 正确获取目标的位置、位姿, 关键在于选取立体空间位置一致的左、右图像中的同名特征点, 即立体匹配。立体匹配方式主要分为基于全局的立体匹配、基于局部的立体匹配和基于特征的立体匹配。本文采用基于特征的立体匹配, 通过提取左、右图像的局部特征点进行匹配来实现目标定位, 如 Harris 角点、尺度不变特征变换 (scale invariant feature transform,

SIFT)、快速鲁棒性特征 (speed up robust feature, SURF)、加速分割测试特征 (features from accelerated segment test, FAST) 等。其中, SIFT 因对尺度、旋转、光照等变化有良好的鲁棒性而广泛应用^[3], 但其计算复杂度较高, 实时性差。SURF 在保证匹配率的基础上, 改善了 SIFT 算法实时性差的问题^[4]。在 SIFT 和 SURF 算法基础上, 学者不断进行改进, 以期通过提高特征匹配率和缩短匹配时间来提升双目视觉定位系统的定位精度和实时性^[5-9]。但上述特征提取方法存在 2 个问题: 1) 提取目标多个特征点, 导致立体匹配计算量大、实时性差; 2) 无法得到精确、连续的视差图, 且在最后定位时, 大多只能以多个特征点的均值作为定位点, 并非目标中心点; 只能获取目标在摄像头坐标系下的深度距离 (z 轴方向), 无法精确获取目标的水平距离 (x 轴方向) 和垂直距离 (y 轴方向)。

为解决上述问题, 本文提出一种基于粗定位-精匹配的双目视觉目标定位方法。在粗定位阶段, 快速获取目标区域, 并分析目标区域的中心点及关键角点信息; 在精匹配阶段, 在目标区域内提取精确的匹配点并拟合出左、右目标区域的透视变换关系; 最后通过相似三角形原理, 还原目标的位置信息。

1 双目视觉系统

在双目视觉系统中, 通常使用水平左、右摄像机从不同角度获取目标图像, 并利用视差原理重建目标的三维信息^[10-14]。平行双目视觉测距模型如图1所示。

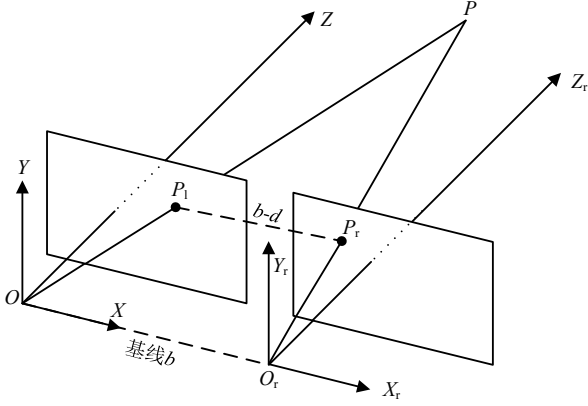


图1 平行双目视觉测距模型

在理想状态下, 2个摄像机的光心 O 、 O_r 处于同一水平, 2个摄像头之间的距离为 b (基线距离)。 $P(X, Y, Z)$ 为空间中目标物体位置, P 在左、右摄像机像素坐标系下的坐标分别为 $P_l = (u_l, v_l)$ 、 $P_r = (u_r, v_r)$; 图像坐标系下的坐标分别为 $P_l = (x_l, y_l)$ 、 $P_r = (x_r, y_r)$ 。已知 $y_l = y_r = y$, 通过相似三角关系, 可得

$$\begin{cases} x_l = f \frac{X}{Z} \\ x_r = f \frac{X-b}{Z} \\ y = f \frac{Y}{Z} \end{cases} \quad (1)$$

式中 f 为摄像机的物理焦距。

由此可得目标物体 P 在主摄像机 (左摄像机) 坐标系中的坐标为

$$\begin{cases} X = \frac{bx_l}{D} \\ Y = \frac{by}{D} \\ Z = \frac{bf}{D} \end{cases} \quad (2)$$

式中视差 $D = x_l - x_r$ 。

因此, 只要能找到左、右2个摄像机图像中的任意一点的相应匹配特征点, 就可以计算出该点的实际三维坐标, 从而还原三维场景。

1.1 摄像机标定与校准

要近似达到理想的平行双目摄像模型的关键在于摄像机的标定与校准。标定摄像机的内外参数^[15-16]包括图像中心坐标、左、右摄像机焦距、旋转矩阵、平移向量等。标定系统主要涉及4个坐标系: 世界坐标系、摄像机坐标系、图像坐标系和像素坐标系。在不同坐标系下, 物体坐标都不一样, 但各个坐标系之间能通过摄像机外部参数旋转矩阵 R 和平移向量 T 来实现相互之间的转变, 其相互关系如图2所示。

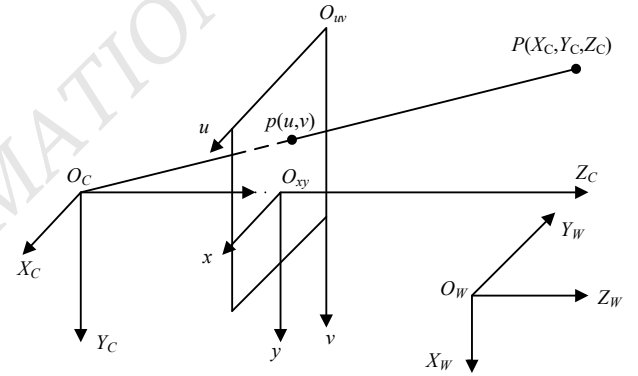


图2 坐标系的变换关系

像素坐标系 O_{uv} 是以图像左顶点为坐标原点的二维坐标系, 中心点坐标为 (u_0, v_0) , 单位是 pixels。

图像坐标系 O_{xy} 是以图像中心点为原点建立的坐标系, 其通常与像素坐标系建立在同一平面上, 中心坐标为 $(0, 0)$, 单位是 mm。

像素坐标系与图像坐标系之间的变换关系为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{l} & v_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $k \times l$ (单位 mm) 为像素点的物理大小。

摄像机坐标系 $O_{X_c Y_c Z_c}$ 是以左侧摄像机的光心 O_c 为原点建立相应坐标系。若要确定 P 点在摄像机坐标系下坐标, 需将 P 点投影至图像坐标系下的二维坐标变换为摄像机坐标系下的空间三维坐标。

世界坐标系 $O_{X_w Y_w Z_w}$ 是指相对地面不动的坐标系, 也称作绝对坐标系, 是判定相机、物体位置的基准坐标系。通过摄像机外部旋转矩阵 R 、平移向量 T 可得到摄像机坐标系与世界坐标系之间的关系为

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ o^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

摄像机获取的空间任意 P 点, 通过坐标系间相互转换即可得出 P 点在世界坐标系下的坐标为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (R \ T) \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$= s M (R \ T) \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

式中, $s = \frac{1}{Z_c}$ 为矩阵的比例系数; M 为相机内参数矩阵。

1.2 极线约束

常用的匹配约束条件有极线约束、连续性约束、相似性约束、唯一性约束和顺序一致性约束^[17]。其中极线是较为可靠、有效的几何约束条件, 因此本文采用极线约束。

空间中的任意一点, 通过双目视觉系统左、右摄像机捕获图像, 分别在左、右立体图像上有 1 个对应点。根据射影几何原理, 三维空间中同一点的 2 个对

应点存在极线约束关系——左(右)图中的投影点在右(左)图中对应点位置一定被约束在一条直线上, 这条线被称作极线^[18]。将三维空间中的点 $P(x, y, z)$ 投影至 2 个重合平面 I_l, I_r , 分别交于点 P_1, P_2 。由此点 P, P_1, P_2 所构成的平面 S 与 2 个投影平面分别相交于极线 l_1, l_2 , 如图 3 所示。

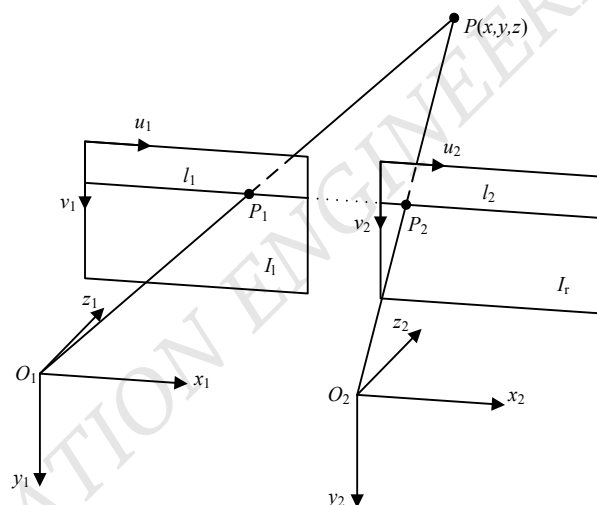


图 3 双目立体匹配模型

2 目标定位系统

本文定位算法框架结构如图 4 所示。从优化搜索策略出发, 本文采用 Canny 边缘检测算法对目标区域进行粗定位, 以避免不必要的特征提取和匹配的庞大计算量, 具有较好的实时性和鲁棒性, 并通过边缘轮廓获取质点。精匹配阶段, 在目标区域提取 SIFT, 并通过随机抽样一致性算法 (random sample consensus, RANSAC) 获取优质的匹配结果, 建立左右区域的透视变换关系, 从而利用平行双目视觉模型恢复目标物体的三维重构及计算目标物体质心的三维坐标位置。这样既具有粗定位快速的特点, 又有精匹配结果较高一致性的特点。

2.1 粗定位

在粗定位阶段, 左、右图像采用 Canny 边缘检测算法进行目标识别, 提取目标物体轮廓并得到左、右目标中心点, 用于下一阶段的像素搜索范围的压缩。

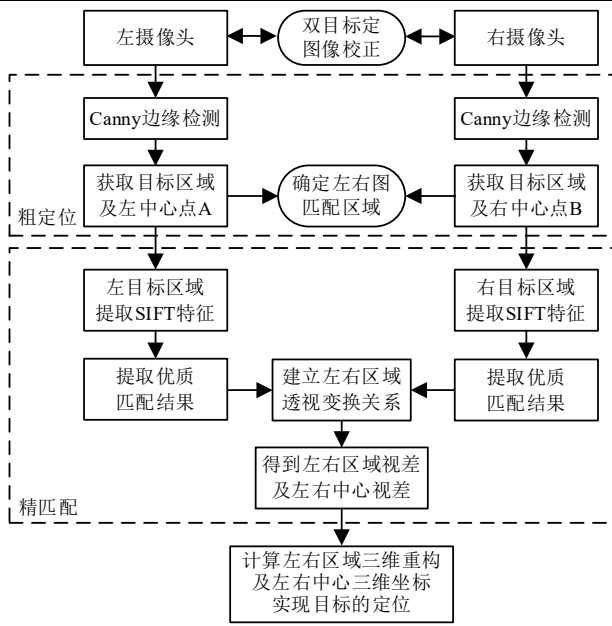


图4 定位算法框架

Canny 边缘检测算法具有效果好、误码率低、精度高等特点,得到的边缘宽度是单个像素宽度。首先,用 3×3 的高斯平滑滤波器对图像进行卷积,等效于降采样,得到图像 $I(x,y)$; 然后,计算图像 $I(x,y)$ 像素点的梯度和方向,图像梯度计算可转化成像素灰度变化,计算公式为

$$A(x,y) = \sqrt{\phi_x(x,y)^2 + \phi_y(x,y)^2}$$

$$\theta_\phi = \tan\left(\frac{\phi_x(x,y)}{\phi_y(x,y)}\right) \quad (6)$$

对图像像素邻域 4 个方向($-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$)进行非极大值抑制,即中心像素点与邻域上 4 个方向的像素点进行幅值比较,若最大,保留;否则舍去。对梯度图像采用双阈值方法检测并接边缘,分别选取 2 个阈值 T_1 和 T_2 ($T_1 < T_2$),若像素点的梯度值 $> T_2$,则此像素点为边缘特征点;若像素点梯度值 $< T_1$,则此像素点为非特征点;当 $T_2 > \text{梯度值} > T_1$,则需判断此中心点 8 邻域点中,是否有满足梯度值 $> T_2$ 的点,若有,则该像素点也为边缘特征点。

通过立体校正的双目平行摄像机,在极线约束下,左、右图像的特征匹配点在同一水平线上(即纵坐标

v 相等),因此匹配搜索范围降到一维。但考虑校正后左、右图像仍可能存在像素误差 e ,匹配初始像素搜索范围为 $R = \{p(u,v) | v \in (v_l - e, v_l + e)\}$ 。

2.2 精匹配

精匹配完整地建立了左、右区域的精确关系。

SIFT 算法基本原理是对二维图像构建尺度空间,分析每层图像的局部特征并找到极值点,排除易受干扰点和低对比度的极值点;再使用该点邻域内的信息来描述特征点信息;从而得到具有旋转、光照和尺度不变性的特征点^[19]。

SIFT 算法主要有 5 个步骤^[20]:

- 1) 构建尺度空间;
- 2) 尺度空间局部极值检测;
- 3) 排除易受干扰极值点;
- 4) 确定每个特征点方向;
- 5) 特征点描述子生成。

一般特征点描述计算 4×4 窗口中 8 个方向的梯度信息,共有 128 维方向信息,运算量较大,运算时间长,无法达到实时性要求。此时若直接用透视变换求取关系矩阵代价过高,且粗匹配存在大量误匹配点,使后续结果误差较大。于是引入 RANSAC 假设数据内群来计算合适的内群模型。RANSAC 可从一组包含“局外点”的观测数据集中,通过迭代方式估计数学模型的参数^[21]。当有效数据占绝大多数时,可通过最小二乘法来拟合参数和误差。

3 实验结果及分析

实验平台采用 Intel Core i7-7700HQ @2.80 GHz 的 PC 机,在 VS2017 上用 C++ 与 OpenCV 进行调试。图像采集使用 HBV-1780 平行双目摄像机,视场角、焦距为 $72^\circ/3.6 \text{ mm}$,图像分辨率为 640×480 像素。

3.1 双目标定结果

在目标定位前,需要对双目摄像机进行标定,包括左、右摄像机内参和外参(2 个摄像机的相对位置关系)。本文采用张正友棋盘标定法进行标定。实验采集标定板左、右图像 14 组,提取棋盘点进行标定,得到摄像机参数如表 1 所示。

表1 摄像机标定参数

摄像头	内参	畸变参数	旋转矩阵	平移矩阵
左	$\begin{bmatrix} 875 & 0 & 340 \\ 0 & 881 & 279 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.52 \\ 1.09 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.9995 & -0.0029 & 0.0321 \\ 0.0033 & 0.9999 & -0.0113 \\ -0.0321 & 0.0114 & 0.9994 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -59.15 \\ -0.22 \\ -0.23 \end{bmatrix}$
右	$\begin{bmatrix} 875 & 0 & 315 \\ 0 & 881 & 278 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.46 \\ 0.37 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$		

3.2 粗定位目标识别

把左摄像机作为参考坐标系来描述空间信息,采用粗定位方法实现目标的粗定位,左、右图像目标识别结果如图5所示。利用粗定位方法分别找到左、右图像目标的边缘,绘制最小外接轮廓、最大外接轮廓及中心位置,提取目标区域位置,并保留相关信息供后续使用。粗定位目标识别平均执行时间为396 ms。

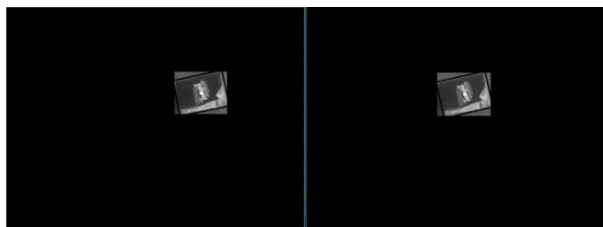


图5 粗定位目标识别结果

3.3 精匹配

在粗定位基础上,左、右区域分别提取SIFT特征点,单纯通过SIFT算法确定2个图像的透视变换关系过程比较复杂且结果不尽人意,如图6所示。采用RANSAC找到优质的匹配点,从初匹配的105对匹配点中选取30对匹配准确的匹配点组,如图7所示,此过程耗时669 ms。

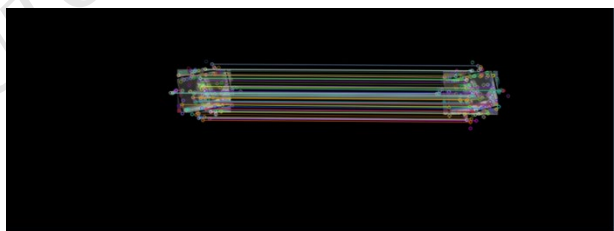


图6 SIFT特征点匹配结果

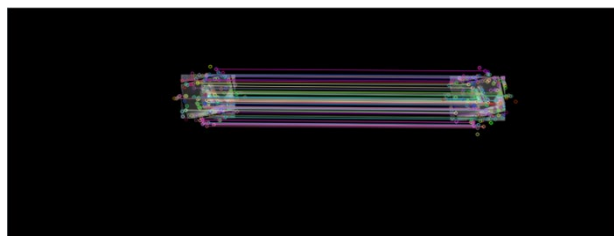


图7 RANSAC精确匹配结果

通过透视变换找到左、右摄像机成像区域的对应关系。透视变换是将图像投影到新的视平面,通过透视变换找到一个 3×3 的投影矩阵 M 来描述左、右区域的关系,从而可通过矩阵 M 找到左图像素点对应特征点在右图中的位置,并快速地还原出图像位置。透视变换公式为

$$\begin{bmatrix} x' & y' & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} M$$

其中,变换矩阵可以拆成4部分: $\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$ 表示线性变换; $\begin{bmatrix} a_{31} & a_{32} \end{bmatrix}$ 表示平移; $\begin{bmatrix} a_{13} \\ a_{23} \end{bmatrix}$ 表示透视变换; a_{33} 表示常数部分且 $a_{33} = 1$ 。

通过精确的匹配点得到透视变换矩阵 M ,从而可求右图对应像素点位置;再通过透视变换,用SURF提取特征,并使用KNN进行匹配,可得到113对精确的匹配点对,如图8所示。

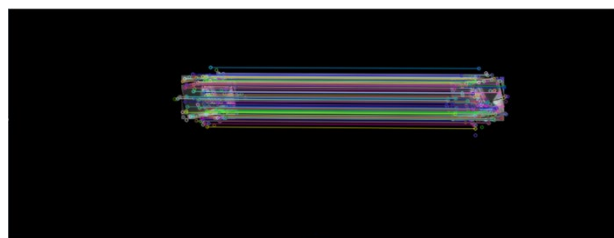


图8 透视变换后精确的匹配点

3.4 定位结果及分析

根据左、右区域的透视变换关系,可求视差图,如图9所示,三维重构图如图10所示。

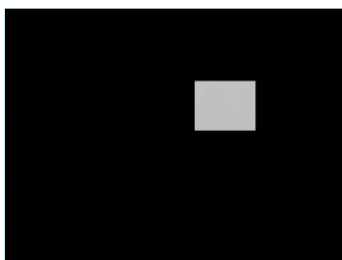


图 9 视差图

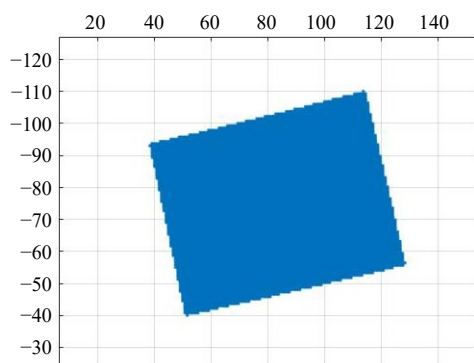


图 10 三维重构图

由于深度 Z 与视差 D 成反比,当视差 D 很小时,即使其发生非常小的变化,都会使深度 Z 发生很大变化;同样当深度 Z 很大,深度变化不明显时,视差 D 基本不会变化,因此视差变化不明显。这和前面的理论相吻合,所得视差也可以求出目标的深度信息。

通过边缘检测提取的最小轮廓(4个角点)及质点,并通过透视变换关系计算它们在三维空间的坐标,实测数据如表 2 所示,实测坐标 X - Y 截面结果图如图 11 所示。本文算法求取目标位置 and 实际测量误差在 7 mm 以内,平均误差为 0.676%。

表 2 实测深度数据与实际值对比

目标	深度测量值/mm	实际值/mm	误差/%
质点	663.892 58	668	0.61
角点 1	674.852 60	668	1.02
角点 2	674.948 89	668	1.04
角点 3	663.381 59	668	0.69
角点 4	667.890 93	668	0.02

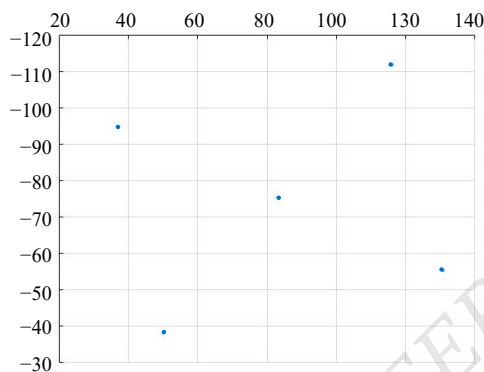


图 11 实测坐标 X - Y 截面结果图

本文方法分别与基于 SIFT、SURF 特征匹配定位方法进行比较。在定位精度方面,各方法平均测距误差依次为: 4.6 mm、12.6 mm、13.6 mm。由此可知,本文方法测距精度有明显优势。在实时性方面,各方法平均耗时分别为: 1.265 s、5.801 s、3.526 s。本文方法候选匹配点数量减少,耗时也相应减少,同时精匹配过程误匹配的概率也减少。

4 结语

本文提出基于粗定位-精匹配的双目视觉定位方法,在粗定位阶段采用 Canny 边缘检测获取目标区域和目标质心。在精匹配阶段,以目标区域为搜索范围,求出左右区域的透视变换关系,最后利用匹配结果恢复目标的位置及质点空间坐标,实现了目标的精确定位。该方法用于双目立体视觉,定位误差较小且定位实时性高,在一定的范围内可以实现目标精确快速定位,具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 杜娟,邱海涛.基于共享坐标系的双目立体匹配算法实现[J].自动化与信息工程,2020,41(5):7-11.
- [2] 王浩,马振书,穆希辉,等.危险品弹药遥操作搬运机器人的研究与开发[J].科学技术与工程,2007,7(3):393-395,405.
- [3] 肖健.SIFT 特征匹配算法研究与改进[D].重庆:重庆大学,2012.
- [4] 韩峰,李晓斌.基于改进 SURF 算法的双目视觉定位[J].电视技术,2015,39(23):22-25,30.
- [5] 李耀云,贾敏智.基于 Harris-SIFT 算法的双目立体视觉定位[J].电视技术,2013,37(9):23-25,29.
- [6] 朱铭杰,朱颖汇,王玲,等.基于尺度不变特征转换算法的棉花

- 双目视觉定位技术[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 182-188.
- [7] 韩峰, 韩文静. 一种改进 SURF 算法的视觉定位[J]. 电光与控制, 2016, 23(7): 29-33.
- [8] 程佳兵, 邹湘军, 陈明猷, 等. 多类复杂水果目标的通用三维感知框架[J]. 自动化与信息工程, 2021, 42(3): 15-20.
- [9] 惠记庄, 罗丽, 杨永奎, 等. 基于 SURF-BRISK 的目标识别匹配与定位方法研究[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(3): 93-101.
- [10] 罗桂娥. 双目立体视觉深度感知与三维重建若干问题研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [11] 李先祥, 陈思琪, 肖红军, 等. 基于 SGBM 算法与 BM 算法的三维重建分析[J]. 自动化与信息工程, 2019, 40(5): 6-12.
- [12] 徐昱琳, 杨永焕, 李昕, 等. 基于双目视觉的服务机器人仿人机械臂控制[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2012, 18(5): 506-512.
- [13] ZHAO Peng, NI Guoqiang. Simultaneous perimeter measurement for 3D object with a binocular stereo vision measurement system[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2010, 48(4): 505-511.
- [14] 项荣, 应义斌, 蒋焕煜, 等. 基于双目立体视觉的番茄定位[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 161-167.
- [15] ZHAO Z J, LIU Y C, ZHANG Z Y. Camera calibration with three noncollinear points under special motions[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(12): 2393-2402.
- [16] 蓝福明, 杨宜民. 基于 OpenCV 和本质矩阵的双目立体视觉摄像机标定方法[J]. 自动化与信息工程, 2012, 33(6): 4-7.
- [17] 时洪光, 张凤生, 郑春兰. 基于图像校正与灰度相关性的立体匹配算法研究[J]. 机械, 2010, 37(8): 15-17, 33.
- [18] 王敏行. 一种双目视觉的精准立体匹配算法[J]. 科学技术创新, 2019(13): 7-9.
- [19] LOWE D G. Distinctive image feature from scale-invariant key point [J]. Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [20] 卢洪军. 基于双目视觉移动机器人目标的检测与定位[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- [21] 梁远芳, 林苗婷, 葛坤, 等. 基于改进的 SIFT 特征的数字图像无缝拼接技术[J]. 福建电脑, 2014, 30(6): 9-12, 18.

Binocular Vision Target Location Method Based on Coarse Location and Fine Matching

Du Yuxiao¹ Zheng Xiaosen¹ Chen Yihang¹ Wang Xiaoqiao² Wang Gongdong² Zhong Nan²

(1. College of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

2. Hisense Electronics Co., Ltd. Jiangmen 529000, China)

Abstract: In order to improve the localization accuracy of binocular vision system, a binocular vision target localization method based on coarse localization fine matching is proposed. Canny edge detection algorithm is used to recognize the target object in the left and right images, and the maximum and minimum rectangular regions of the target object are extracted, so as to realize the rough positioning of the target object. SIFT algorithm is used to obtain the feature points of the target in the left and right images; The exact matching points are obtained by RANSAC, and the perspective transformation relationship between the objects in the left and right images is calculated; According to the perspective transformation relationship, the position of the target feature point of the left image at the potential matching point of the target in the right image is determined, and the three-dimensional pose and centroid coordinates of the target object are obtained, so as to realize the fine matching of the target object. The experimental results show that the average ranging error of this method is 4.6 mm and the average time is 1.265 s. Compared with sift and surf feature matching positioning methods, this method has the characteristics of high positioning accuracy and short running time.

Key words: binocular stereo vision; coarse location; fine matching; SIFT algorithm; RANSAC; perspective transformation

作者简介:

杜玉晓, 男, 1973 年生, 工学博士, 副教授, 主要研究方向: 自动化装备与集成技术、生物电信号检测及处理技术。

E-mail: yuxiaodu@gdut.edu.cn

郑晓森(通信作者), 男, 1993 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 双目视觉, 图像处理等。E-mail: 362389141@qq.com

陈伟杭, 男, 1997 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 工业机器人、智能制造。

王小桥, 男, 1979 年生, 大专, 主要研究方向: 工业机器人与视觉测量技术。

王公东, 男, 1979 年生, 大专, 主要研究方向: 工业机器人与视觉测量技术。

钟楠, 男, 1998 年生, 工学学士, 主要研究方向: 工业机器人与视觉测量技术。