

DOI: 10.11992/tis.201712005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20180411.1548.014.html>

基于显著性检测的双目测距系统

安果维, 王耀南, 周显恩, 谭建豪

(湖南大学 机器人视觉感知与控制技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为了提高双目视觉测距系统中图像匹配的实时性与测距的精度, 提出一种将显著性检测与焦距拟合相结合的双目测距方法。首先对双目相机进行畸变矫正, 并利用双目相机成像的特点拟合相机焦距与目标距离的关系, 随后对所得图像进行显著性检测, 并提取目标区域, 最后, 利用 surf 算子对提取出的区域进行特征匹配, 将匹配点代入测距模型中得到目标物体的距离。结果表明: 显著性检测方法明显提升算法执行速度, 焦距拟合降低双目测距模型误差, 明显提升双目测距精度。

关键词: 机器视觉; surf 算子; 双目测距; 特征点匹配; 相机矫正

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2018)06-0913-08

中文引用格式: 安果维, 王耀南, 周显恩, 等. 基于显著性检测的双目测距系统[J]. 智能系统学报, 2018, 13(6): 913-920.

英文引用格式: AN Guowei, WANG Yaonan, ZHOU Xian'en, et al. Binocular distance measurement system based on saliency detection[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2018, 13(6): 913-920.

Binocular distance measurement system based on saliency detection

AN Guowei, WANG Yaonan, ZHOU Xian'en, TAN Jianhao

(National Engineering Laboratory for Robot Visual Perception and Control Technology, Hu'nan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To improve real-time image matching and ranging accuracy in binocular vision ranging systems, this paper proposes a binocular distance measurement method, in which saliency detection and focal length fitting are combined. The method first corrects the distortion of the binocular camera and then fits the relationship between the camera focal length and object distance by using the characteristics of the binocular camera imaging and further applies the obtained image for saliency detection, and then the target object area is extracted. Finally, the surf operator is used to perform feature matching on the extracted region, and the matching point is substituted into the ranging model to obtain the distance of the target object. The results show that the saliency detection method can significantly improve the execution speed of the algorithm, and the focal length fitting can reduce the error of binocular ranging model, which significantly improves the binocular ranging system accuracy.

Keywords: machine vision; surf operator; binocular distance measurement; feature points match; camera correction

双目视觉测距技术是计算机视觉技术的一种应用。它具有通过对人类双眼处理景物方式的模拟感知周围环境空间深度的功能^[1]。在一些领域, 机器视觉正在代替人眼成为有效的新工具。双目视觉在机器人导航与避障、机械臂的引导、三维成像、汽车导航等诸多领域都极具应用价值^[2-3]。

与目前其他测距方法相比, 双目测距具有成本低、精度高、方便快捷等优点^[4-5]。作为计算机视觉的分支, 双目视觉技术在近些年来得到了长足的发展^[6]。

双目视觉测距技术的基本原理是基于物体在左右相机像平面成像的相差, 利用相似三角形的几何关系, 得到物体距相机的距离^[7]。其中的关键部分则是对左右视图进行匹配得到特征点的相差。而 surf 算法的特征点匹配具有稳定性高, 实

收稿日期: 2017-12-04. 网络出版日期: 2018-04-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61433016, 61573134).

通信作者: 安果维. E-mail: 992466100@qq.com.

时性高的特点^[8]。本文在对视图进行显著性检测的基础上,用 surf 算子对提取出的目标区域进行特征点匹配。准确地得到了目标的距离,并提高了测距过程的实时性。

1 双目视觉测距系统

本文设计的双目视觉测距系统旨在为旋翼飞行器机械臂系统提供目标物体的距离信息,如图1所示,双目相机安装在旋翼飞行器机械臂系统的机械臂末端,通过双目相机对目标物体的实时测距并反馈距离信息,来控制旋翼飞行器机械臂系统操作实现抓取功能。双目视觉系统的原理图如图2所示。



图1 双目视觉系统实物

Fig. 1 Real object drawing of binocular vision system

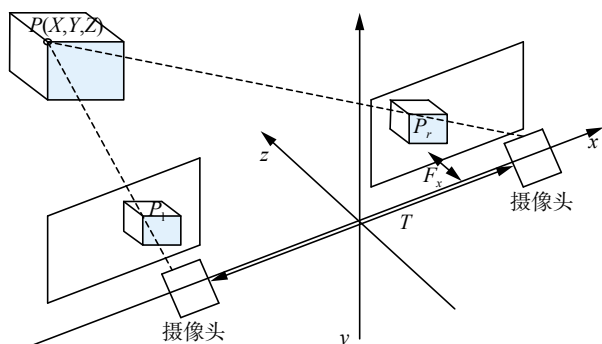


图2 双目视觉结构原理

Fig. 2 The principle diagram of the binocular vision

假设左右相机的焦距和其他相关参数均相等,且平行放置。镜头基线均垂直于成像平面,左右相机满足 x 轴重合, y 轴平行,左右相机像平面重合。左右相机的成像像差只在 x 轴存在。目标 P 为物体上一点,在摄像机坐标系下坐标为

(X, Y, Z) , 点 P 在左右像平面的成像坐标分别为 $P_l(x_l, y_l)$ 和 $P_r(x_r, y_r)$, P_l 与 P_r 为点 P 的一组匹配点对。图2为该模型在 X - Z 平面的投影成像图。左右相机光心 O_l 、 O_r 平行放置相距为基线距离 T 。相机焦距为 F_x , 点 P 距离相机平面的距离为 Z , 则由相似三角形几何关系^[9-10]可得:

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

推导可得:

$$\begin{cases} X = \frac{x_l}{x_l - x_r}T \\ Y = \frac{y}{x_l - x_r}T \\ Z = \frac{F_x}{x_l - x_r}T \end{cases} \quad (2)$$

式中 $(x_l - x_r)$ 为左右视差图匹配点的视差。可见目标点距离相机平面的距离 Z 的求取精度与相差直接相关,所以图像特征点匹配的成功与否直接决定距离测量的精度, X - Z 平面成像图如图3所示。

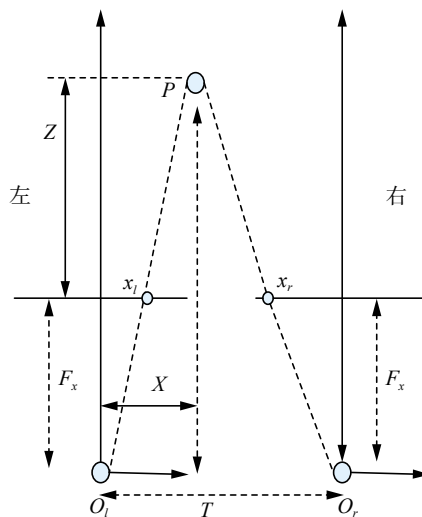


图3 X - Z 平面成像图

Fig. 3 The projection on X - Z plane

2 本文方法

为了提高双目测距过程的实时性,本文设计了一种双目视觉成像测距模型,并重点研究了目标检测识别与左右视图特征匹配的问题,提出了一种基于显著性检测的双目视觉测距方法。根据目标物体在视图中颜色对比度比较明显的特征,采用基于直方图对比度 (histogram contrast, HC) 的显著性值检测方法^[11]提取检测目标区域。针对相

机焦距会随距离变化产生误差的特点, 提出了一种用多组实验数据拟合相机焦距的方法, 随后对检测到的目标物体应用 surf 算子^[8]进行匹配, 得到目标物体的距离信息, 算法流程如图 4 所示。

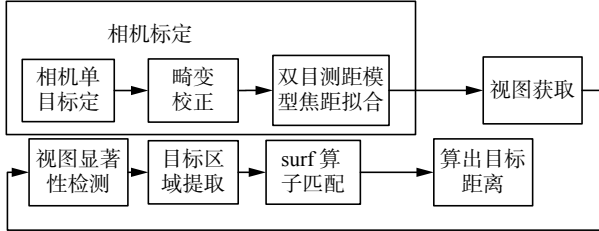


图 4 本文算法流程图

Fig. 4 The flowchart of the proposed method

2.1 相机畸变校正

在本文模型中主要考虑相机的径向畸变问题^[12]。由图 5 可以看出, 由于径向畸变的存在, 在远离图像中心的区域 a 与区域 b , 现实当中的直线已经出现明显的弯曲。设不考虑畸变的图像坐标为 (x, y) , 畸变之后的图像坐标为 (\tilde{x}, \tilde{y}) , 则两者的对应关系满足:

$$\tilde{x} = x + x(k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2) \quad (3)$$

$$\tilde{y} = y + y(k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2) \quad (4)$$

式中 k_1 与 k_2 为径向畸变系数。

假设在图像像素坐标系下, 不考虑畸变的坐标为 (u, v) , 考虑畸变后的坐标值为 (\tilde{u}, \tilde{v}) , 则式 (3) 与式 (4) 等价于:

$$\tilde{u} = u + (u - u_0)(k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2) \quad (5)$$

$$\tilde{v} = v + (v - v_0)(k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2) \quad (6)$$

式中 (u_0, v_0) 表示图像平面的主点, 对式 (5) 与式 (6) 继续整理可得:

$$\begin{bmatrix} (u - u_0)(x^2 + y^2) & (u - u_0)(x^2 + y^2)^2 \\ (v - v_0)(x^2 + y^2) & (v - v_0)(x^2 + y^2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u} - u \\ \tilde{v} - v \end{bmatrix}$$

假设有 n 幅图片, 每幅图片有 m 个点, 则可以得到 $2mn$ 个等式, 运用最小二乘法对结果进行优化, 可以解得:

$$\mathbf{k} = (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{d} \quad (7)$$

在考虑到畸变参数之后把世界坐标系下的点反投影到图像坐标系下, 并与理想无畸变的参数进行最大似然估计, 得到式 (8), 可以采用 LM 算法进行计算求取最优解。

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|u_{ij} - f(M, R_i, t_i, k_1, k_2, U_{ij})\|^2 \quad (8)$$

然后由式 (9) 与式 (10),

$$u = \tilde{u} + (\tilde{u} - u_0)[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \quad (9)$$

$$v = \tilde{v} + (\tilde{v} - v_0)[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \quad (10)$$

即完成了相机畸变校正的过程, 其中 (u, v) 表示畸变校正后的像素坐标, (\tilde{u}, \tilde{v}) 代表畸变校正前, 实际径向畸变下的像素坐标。由图 6 可以看出, 与畸变校正前的图 5 相比, 在畸变影响下变弯曲的直线得到了很明显的修正。

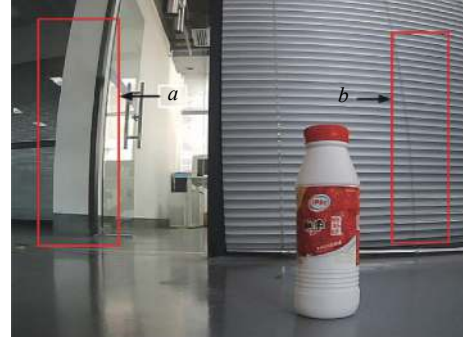


图 5 畸变校正前图像

Fig. 5 Image before distortion correction



图 6 畸变校正后图像

Fig. 6 Image after distortion correction

2.2 双目测距模型焦距的拟合

在双目视觉的测距过程中, 由于误差存在的原因, 随着距离的变大, 测量的焦距逐渐增大^[13], 焦距与距离近似满足线性关系如式 (11)。于是本文采用测量多组数据进行线性回归拟合以得到焦距的方法。其中, 求取焦距与实际距离的拟合公式为

$$F_x = G(D) \quad (11)$$

测量的焦距 F_x 与实际距离 D 成线性关系, 即可以近似写成:

$$F_x T = kD + b \quad (12)$$

式中 k, b 为常数。

由方程组

$$F_x T = kD + b \quad (13)$$

$$D = F_x T / (x_l - x_r) \quad (14)$$

可以得到实际距离 D 与相差 $x_l - x_r$ 的关系:

$$D(x_l - x_r - k) + b = 0 \quad (15)$$

得到 D 与 $(x_l - x_r)$ 的数据后, 为了求得最准确的 k 与 b 值, 由最小二乘法求出线性回归拟合方程组。为方便表达, 设 D 的值为 $x, F_x T$ 的值为 y , 为使

k 与 b 的值误差最小,即要求误差平方和

$$Q = \sum_{i=1}^n (kx_i + b - y_i)^2 \quad (16)$$

最小,先求出 x 与 y 的平均值 \bar{x} 与 \bar{y} ,将式(16)变形得

$$Q = \sum_{i=1}^n [(b + k\bar{x} - \bar{y}) - (y_i - \bar{y}) + k(x_i - \bar{x})]^2 \quad (17)$$

将平方开出,并整理得

$$Q = k^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 - 2k \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) + n(b + k\bar{x} - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (18)$$

此为关于 k 的一元二次方程,所以当且仅当

$$\begin{cases} k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2} \\ b = \bar{y} - k \cdot \bar{x} \end{cases} \quad (19)$$

时,误差 Q 取最小值,式(19)即为 k 与 b 的线性回归拟合方程组。将测量的数据代入式(19)中,得到 $b = 37474.28, k = 22.0778$ 其中测量得到的数据(已知基线距离 $T = 62$ mm)如表1所示。

表1 拟合焦距所测得的数据
Table 1 Measured data by fitting the focal length

距离 D /mm	相差 $(x_i - x_r)$	测量的焦距 F_x /mm
334	135	727.3
366	124	732.0
433	108	754.3
517	94	783.8
556	89	798.1
586	86	812.8
624	81	815.2
667	77	828.4
706	75	854.0
784	69	872.5
811	67	876.4
836	66	889.9
884	64	912.5
917	62	917.0
968	60	936.8
1011	58	945.8

实验所得线性回归方程拟合所得图像如图7所示。

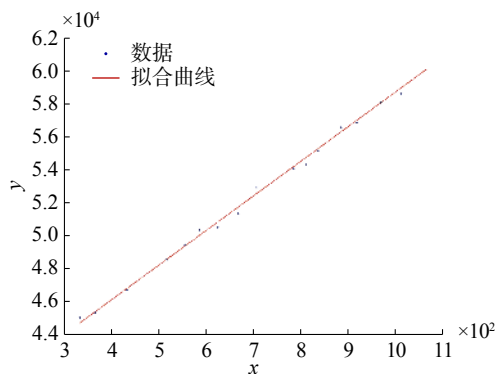


图7 线性拟合图像

Fig. 7 Linear fitting image

2.3 图像的显著性检测

图像的显著性区域检测是近年来计算机视觉和图像预处理领域的研究热点之一,其本质是模拟人眼观察自然界图像时的视觉选择性注意机制,是一种视觉注意模型^[14]。显著区域检测在图像检索、图像分割、目标识别^[15-17]等诸多领域有广泛的应用。

本文采用CHENG的基于直方图对比度(histogram contrast, HC)的图像像素显著性值检测方法^[11]。该方法利用人的视觉系统对高对比度的视觉信号比较敏感的特点,首先定义一个像素的显著性值 $S(I_k)$,根据该方法的原理,一个像素的显著性值与它和图像中其他像素颜色的对比度相关,所以在图像 I 中像素 I_k 的显著性定义为

$$S(I_k) = \sum_{I_i \in I} D(I_k, I_i) \quad (20)$$

式中 $D(I_k, I_i)$ 为像素 I_k 与像素 I_i 在 $L \times a \times b$ 空间的颜色距离度量。

将式(20)按照像素顺序展开得到:

$$S(I_k) = D(I_k, I_1) + D(I_k, I_2) + \cdots + D(I_k, I_n) \quad (21)$$

可以看出,由于没有考虑空间的关系,在这种定义下,具有相同颜色值的像素会具有相同的显著性值,因此把具有相同颜色值 c_j 的像素归在一起,可以得到每个颜色的显著性值

$$S(I_k) = S(c_i) = \sum_{j=1}^n f_j D(c_i, c_j) \quad (22)$$

式中: c_i 为像素 I_k 的颜色值, n 为图像中所含有的颜色总数, f_j 为在图像 I 中颜色 c_j 出现的概率。

图8与图9为显著性检测的实验效果图。

2.4 目标区域的提取

在得到目标物体的显著图后,首先对显著图进行腐蚀与膨胀操作,去除显著图中的噪点干扰,如图10所示。随后根据显著图中得到的目标

区域信息对原图做与运算, 则目标区域内像素值不变, 目标区域外像素值置零, 将目标区域从原图中提取出来, 如图 11 所示。在此基础上, 对所得到的图像信息进行判断, 只对像素不为零的值进行特征点匹配, 处理流程如图 12 所示。



图 8 显著性检测前效果图

Fig. 8 Renderings before significance detection

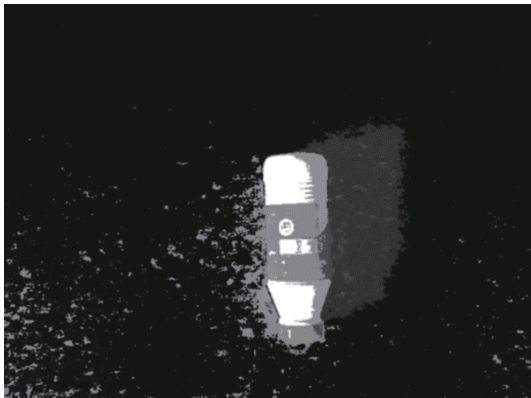


图 9 显著性检测后效果图

Fig. 9 Renderings after significance detection

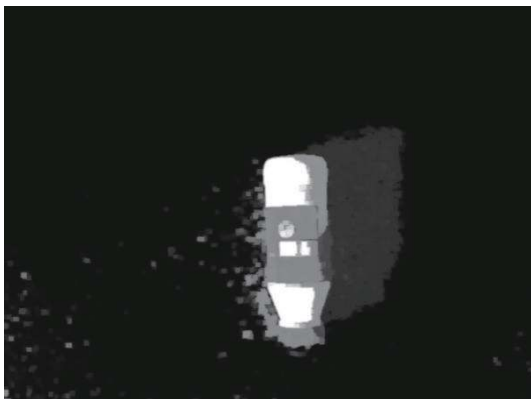


图 10 对显著图先腐蚀后膨胀效果图

Fig. 10 Renderings after erosion and dilate

2.5 surf 算法特征点检测

由于 SIFT 算子在检测的过程中存在计算数据大, 耗时长的问题, Bay 等^[8]提出了一种对尺度和旋转具有鲁棒性的快速鲁棒的特征描述方法

(speed up robust features, surf)。surf 检测算子与 sift 检测算子类似, 首先构建尺度空间, 初步检测极值点, 在确定特征点主方向后确定特征点描述子。与 sift 对图像构造金字塔图不同, surf 是通过改变滤波器的大小构造金字塔图层构建尺度空间, 在此基础之上采用 Hessian 矩阵检测极值点, 对检测的速度有很大提高。



图 11 目标区域从原图中提取后效果图

Fig. 11 Renderings after extracted the target area from original image

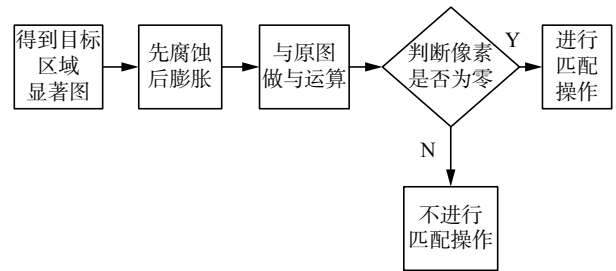


图 12 目标区域处理流程图

Fig. 12 The flowchart of target area processing

2.5.1 Hessian 矩阵确定特征点

在 surf 算子检测特征点的过程中 Hessian 矩阵判别式尤为关键, 在构建尺度空间后, 当 Hessian 矩阵判别式的局部值最大时所检测出的即为待选的特征点。在图像 I 中, 点 (x, y) 处尺度为 σ , 则其 Hessian 矩阵为

$$H(x, y, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(x, y, \sigma) & L_{xy}(x, y, \sigma) \\ L_{xy}(x, y, \sigma) & L_{yy}(x, y, \sigma) \end{bmatrix}$$

式中: $L_{xx}(x, y, \sigma)$ 表示高斯二阶偏导数在点 (x, y) 处与图像 I 的卷积, $L_{xy}(x, y, \sigma)$ 与 $L_{yx}(x, y, \sigma)$ 与此相同。为了方便计算且不影响效果, 直接用框状滤波模板代替高斯的二阶偏导, 如图 13 所示。

在模板中用 D_{xx} 、 D_{xy} 和 D_{yy} 分别取代原矩阵中的 L_{xx} 、 L_{xy} 与 L_{yy} 。所以得到近似 Hessian 矩阵的表示:

$$\det H = D_{xx}D_{yy} - (\omega D_{xy})^2 \quad (23)$$

由于高斯滤波与近似高斯滤波的差异性, 用

滤波响应的相对权重系数 ω 来平衡 Hessian 矩阵行列式,一般取 0.9。

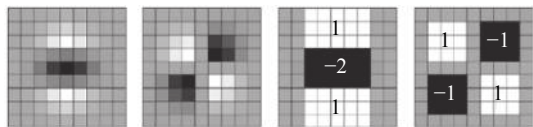


图 13 框状滤波模板代替高斯二阶偏导滤波

Fig. 13 Frame filter template instead of Gaussian second-order partial derivative filter

2.5.2 surf 描述子

为了保证 surf 特征点的描述子具有旋转不变的特性,需要确定特征点的主方向。以某个特征点为圆心,在半径为 6σ 的 (σ 为尺度因子) 邻域内用边长为 4σ 的 Harr 小波模板在 X 、 Y 方向上求取 Harr 小波响应。用一个圆心角为 $\pi/3$ 的扇形窗口,以特征点为圆心旋转遍历一个完整的圆形区域,计算每个扇形窗口包括的图像点的 Harr 小波响应总和,其中最大的响应即为该特征点的主方向。

在此基础之上,构造一个带方向(前面计算的主方向)的正方形区域,边长设定为 20σ ,首先把区域划分成 $16(4 \times 4)$ 个子域,对每个子域计算其主方向与垂直方向上的 Harr 小波响应,并计算 $\sum d_x$ 、 $\sum d_y$ 、 $\sum |d_x|$ 、 $\sum |d_y|$ 。这样每个子区域可以用一个矢量 $\mathbf{v} = (\sum d_x, \sum d_y, \sum |d_x|, \sum |d_y|)$ 来表示。将区域内得到的 64 个值组合起来,就得到了此特征点的 surf 特征描述子。

2.5.3 surf 算法特征点匹配

双目立体视觉系统中最关键且最重要的一步是立体特征匹配^[18]。在双目立体视觉系统中的立体匹配通常是通过寻找两幅图像中能够检测到的具有明显特征的元素如角点,边缘或者区域进行匹配。由双目立体视觉测距原理可知图像匹配的准确度决定了测量距离的精度^[19]。

surf 特征匹配采用近邻欧氏距离比例法,通过对图像中特征向量属性进行判断,来达到两幅图像匹配成功的目的^[20]。在本文算法过程中,首先计算左图中局部特征点的特征向量 $(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ 与右图中待匹配特征点特征向量 $(x''_1, x''_2, \dots, x''_n)$ 的欧氏距离,即式 (24),通过比较最近邻欧式距离和次近邻欧式距离之比 η 来剔除因为噪声干扰而引起的匹配错误的特征点,即式 (25)。如果 η 大于某个阈值,则认为对应的最近邻欧氏距离匹配点与次近邻欧氏距离匹配点和其他待匹配特征点都很接

近,将这一配对剔除^[18]。

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x'_i - x''_i)^2} \quad (24)$$

$$\eta = \frac{D_{\text{near}}}{D_{\text{sub_near}}} \quad (25)$$

3 算法效果与结果对比实验

3.1 显著性检测前后对比实验

为了降低双目视觉测距的误差,降低特征匹配的误差率,本文首先对使用的相机进行了单目标定,用标定后的参数对原始图像进行了畸变校正。在此基础之上本文采取了 10 组目标与角度不同的图片,图为应用显著性检测方法前后 surf 算子匹配时间对比,可以看出在应用本文算法之后,匹配时间缩短,实时性提高,如表 2 所示。

表 2 算法处理前后时间对比

Table 2 The time comparison before and after the algorithm processing ms

目标序号	算法处理前匹配时间	算法处理后匹配时间
1	312	125
2	281	47
3	297	62
4	296	63
5	265	78
6	312	62
7	328	94
8	249	47
9	281	47
10	281	46

3.2 拟合焦距前后对比实验

为了测量距离更加准确,本文对相机的焦距进行了焦距拟合。并与未进行焦距拟合的实验结果进行对比。表中拟合前的测量值为将目标 1 与目标 2 实验数据计算所得焦距代入测距模型所得到的实验结果。拟合后测量值为进行线性拟合后所得焦距代入测距模型中,所得到的实验结果,如表 3、表 4 所示。

可以看出,在该测距模型中,与拟合实验中目标 1、目标 2 比较接近的距离误差较小,随着测量距离与目标 1、目标 2 的距离的差距的增大,测量误差增大较快。使用进行线性拟合后的焦距测量的实验结果,相对于未进行线性拟合算出的焦距测量的实验结果,随着距离的增加误差增大较慢,测量的距离准确性增高明显。

表3 焦距拟合前测距实验结果对比

Table 3 Distance measurement results before fitting of focal length

目标 序号	实际距 离/mm	拟合前测 量值/mm	拟合前测量 误差/%
1	300	306.63	1.65
2	400	397.43	0.64
3	500	485.03	2.99
4	600	565.54	5.74
5	700	641.72	8.33
6	800	714.25	10.72
7	900	782.48	13.06
8	1 000	848.19	15.19
9	1 100	909.90	17.28
10	1 200	970.41	19.13

表4 焦距拟合后测距实验结果对比

Table 4 Distance measurement results after fitting of focal length

目标 序号	实际距 离/mm	拟合后测 量值/mm	拟合后测量 误差/%
1	300	301.85	0.62
2	400	403.65	0.92
3	500	508.21	1.64
4	600	610.23	1.71
5	700	712.58	1.80
6	800	815.76	1.97
7	900	918.25	2.02
8	1 000	1 022.36	2.24
9	1 100	1 125.71	2.33
10	1 200	1 233.91	2.83

4 结束语

本文主要提出了一种在双目视觉测距系统中通过显著性检测方法识别出目标物体,在应用特征点来进行双目视觉中左右视图的匹配,来准确获得物体距离信息的方法。本文在对相机畸变校正后,对相机进行了焦距拟合,与相机拟合前的实验结果进行对比,得到了误差更小的实验结果。本文方法旨在为旋翼飞行器中机械臂系统提供待抓取物体的深度信息。通过实验可得,本文方法得到的目标物体的深度信息准确可靠,为旋翼飞行器机载机械臂的任务抓取提供了可靠准确的数据支持。

参考文献:

- [1] 杨景豪,刘巍,刘阳,等. 双目立体视觉测量系统的标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 300–308.
YANG Jinghao, LIU Wei, LIU Yang, et al. Calibration of binocular vision measurement system[J]. Optics and precision engineering, 2016, 24(2): 300–308.
- [2] 邱雪娜,刘士荣. 基于序贯检测机制的双目视觉运动目标跟踪与定位方法[J]. 机器人, 2011, 33(1): 181–190.
QIU Xuena, LIU Shirong. Moving objects tracking and localization with binocular vision based on sequential detection mechanism[J]. Robot, 2011, 33(1): 181–190.
- [3] 赵振庆,叶东,陈刚,等. 垂直直线特征的双目视觉位姿测量方法[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1015003.
ZHAO Zhenqing, YE Dong, CHEN Gang, et al. Binocular vision method of measuring pose based on perpendicular lines[J]. Acta optica sinica, 2014, 34(10): 1015003.
- [4] 刘俸材,谢明红,王伟. 双目视觉的立体标定方法[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(4): 1508–1512.
LIU Fengcai, XIE Minghong, WANG Wei. Stereo calibration method of binocular vision[J]. Computer engineering and design, 2011, 32(4): 1508–1512.
- [5] 郭慧,刘亚菲,王勇,等. 大型齿轮工件焊接的双目视觉测量标定[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2013, 39(4): 455–459.
GUO Hui, LIU Yafei, WANG Yong, et al. Calibration of binocular vision measurement of large gear workpiece welding[J]. Journal of Donghua university: natural science, 2013, 39(4): 455–459.
- [6] 历艳琨,毛建旭,刘仁明. 基于特征点的3D人脸姿态跟踪[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(4): 605–612.
LI Yankun, MAO Jianxu, LIU Renming. 3D face pose tracking based on feature matching[J]. Journal of electronic measurement and instrument, 2016, 30(4): 605–612.
- [7] 张国刚,徐向辉. 基于加权纹理特征的SAR图像目标识别算法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(9): 22–25.
ZHANG Guogang, XU Xianghui. SAR image target recognition algorithms based on weighted texture features[J]. Foreign electronic measurement technology, 2015, 34(9): 22–25.
- [8] BAY H, TUYTELAARS T, VAN GOOI L. SURF: speeded Up robust features[C]//Proceedings of the 9th European conference on Computer Vision. Graz, Austria, 2006: 404–417.
- [9] 余小欢,韩波,张宇,等. 基于双目视觉的微型无人机室内3维地图构建[J]. 信息与控制, 2014, 43(4): 392–397.
YU Xiaohuan, HAN Bo, ZHANG Yu, et al. Binocular stereo vision based 3D mapping for micro aerial vehicles in an indoor environment[J]. Information and control, 2014,

- 43(4): 392–397.
- [10] 公衍超, 万帅, 杨楷芳, 等. 利用双目视觉视频的实时三维裸手手势识别[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2014, 41(4): 130–136.
- GONG Yanchao, WAN Shuai, YANG Kaifang, et al. Real-time 3D bare-hand gesture recognition using binocular vision videos[J]. Journal of Xidian university, 2014, 41(4): 130–136.
- [11] CHENG Mingming, ZHANG Guoxin, MITRA N J, et al. Global contrast based salient region detection[C]//Proceedings of 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, RI, USA, 2011: 409–416.
- [12] ZHANG Zhengyou. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision. Kerkyra, Greece, 2002, 1: 666–673.
- [13] 丁莹, 范静涛, 宋天喻. 双目立体视觉检测系统正向最优优化设计方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 650–657.
- DING Ying, FAN Jingtao, SONG Tianyu. Optimal forward design method for the binocular stereo vision inspection system[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2016, 37(3): 650–657.
- [14] HOU Xiaodi, ZHANG Liqing. Saliency detection: a spectral residual approach[C]//Proceedings of 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minneapolis, USA, 2007: 1–8.
- [15] YAN Qiong, XU Li, SHI Jianping, et al. Hierarchical saliency detection[C]//Proceedings of 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Portland, USA, 2013: 1155–1162.
- [16] GOFERMAN S, ZELNIK-MANOR L, TAL A. Context-aware saliency detection[C]//Proceedings of 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, USA, 2010: 2376–2383.
- [17] KANAN C, COTTRELL G. Robust classification of objects, faces, and flowers using natural image statistics [C]//Proceedings of 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, USA, 2010: 2472–2479.
- [18] VALLERAND S, KANBARA M, YOKOYA N. Binocular vision-based augmented reality system with an increased registration depth using dynamic correction of feature positions[C]//Proceedings of 2003 IEEE Virtual Reality. Los Angeles, USA, 2003: 271–272.
- [19] BANKS J, CORKE P. Quantitative evaluation of matching methods and validity measures for stereo Vision[J]. The international journal of robotics research, 2001, 20(7): 512–532.
- [20] BAY H, ESS A, TUYTELAARS T, et al. Speeded-Up robust features (SURF)[J]. Computer vision and image understanding, 2008, 110(3): 346–359.

作者简介:



安果维, 男, 1992年生, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉与图像处理。



王耀南, 男, 1957年生, 教授, 主要研究方向为智能控制理论与智能信息处理, 主持国家级项目多项, 发表学术论文 320 余篇, 著作 8 部。



周显恩, 男, 1988年生, 博士研究生, 主要研究方向为模式识别、图像处理, 发表学术论文 10 余篇。