

无人机视觉着舰导航鲁棒角点精确检测算法

郝 帅¹, 程咏梅¹, 马 旭¹, 王 涛², 赵建涛¹

(1. 西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072;

2. 中国航空工业集团西安飞行自动控制研究所重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对舰载无人直升机着舰时拍摄的图像存在大尺度、角度畸变, 使得合作目标角点难以检测的问题, 提出了一种鲁棒角点精确检测算法。设计了一种彩色非对称合作目标, 通过计算合作目标的最小周长多边形 (minimum perimeter polygon, MPP) 来获取轮廓上的角点。针对这些角点存在伪角点及未排序问题, 给出了斜率约束、距离约束和方向约束策略。最后, 针对亚像素 Harris 角点检测算法精度高但未排序、三重约束的 MPP 角点检测精度低但已排序的问题, 制定了这两种角点检测方法的融合策略。实验结果表明, 所提算法可以有效解决合作目标图像发生大角度畸变以及一定尺度畸变范围内的角点检测。

关键词: 视觉着舰; 三重约束; 最小周长多边形; 融合策略; 亚像素

中图分类号: TP 217.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2013.06.22

Robust corner precise detection algorithm for visual landing navigation of UAV

HAO Shuai¹, CHENG Yong-mei¹, MA Xu¹, WANG Tao², ZHAO Jian-tao¹

(1. College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Key Laboratory of Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: A robust corner precise detection algorithm is proposed to solve the problem that the images have a serious distortion of scale and angle when the carrier-based unmanned helicopter lands. A cooperation with distinct color contrast and asymmetric is designed. And corners on the cooperative object can be gotten through calculating the minimum perimeter polygon (MPP) of the cooperative object. To solve the problem of removing false corners and corners out of order, a strategy which concludes slope constrain, distance constrain and orientation constrain is proposed. Finally, to solve the problem of the sub pixel Harris corner detection algorithm with high precision but out of order and the MPP corner detection algorithm based on triple constraints with low precision but ordered, a fusion strategy is proposed. Experiment results show that the proposed fusion algorithm can effectively solve the problem of corner detection when cooperation has a serious distortion of angle and a certain range of scale distortion.

Keywords: visual landing; triple constrain; minimum perimeter polygon (MPP); fusion strategy; sub pixel

0 引言

舰载无人直升机由于在海上担负侦察、救护、反潜舰、空中预警以及电子战等多种使命, 受到了世界各国的重视^[1-3]。然而, 舰载无人直升机使用过程中一个关键问题就是如何实现安全回收。由于海面情况复杂多变, 加上天气影响, 使得传统的人员遥控降落方式变得困难, 事故率较高^[4]。视觉作为信息感知的一种手段, 以其信息量大、自主性、无源等优点, 成为无人直升机着舰导航的一种很好辅助手段。因此, 利用视觉技术引导舰载机着舰成为国内外一

个重要的研究领域^[5-7]。

视觉着舰导航主要是通过摄像机获取着舰点附近的图像, 利用机器视觉技术对舰上合作目标进行检测识别, 通过图像检测出信标的角点并排序, 利用角点解算出无人机与舰上信标坐标系的相对位姿, 从而实现无人机精确着舰^[8]。舰载机视觉着舰中一个关键问题就是合作目标角点的精确检测。目前, 合作目标角点检测方法可以分为两类: 直接角点检测法和间接角点法。直接角点检测法主要是通过图像的灰度信息或是轮廓曲率信息直接进行角点提取。文献[9]设计了 H 形合作目标

图案,并利用 Harris 检测 H 形图标的角点。文献[10]设计了 T 形合作目标图案,采用轮廓跟踪方法进行合作目标角点提取,但是它们的检测精度是像素级。间接角点检测法主要是先对图像进行边缘检测,然后通过 Hough 变换等方法提取直线边缘,最终通过两条直线的交点求出角点的精确坐标。文献[11-15]都是采用间接角点检测法提取合作目标角点。间接角点检测法虽然能达到亚像素级精度,但是由于采用 Hough 变换等手段提取直线,当合作目标出现尺度畸变、角度畸变时图像边缘就会发生弯曲,直线检测误差增大,进而导致合作目标角点检测不准,鲁棒性弱。

虽然目前的研究成果可以完成对合作目标角点的检测,但不适用于合作目标发生大尺度、角度畸变的情况。在实际情况中,由于飞机与合作目标距离的变化、海面上的海浪、机载摄像机抖动等影响,使所拍摄的合作目标存在尺度、角度等畸变。在该条件下精确检测出合作目标的角点,并进行准确排序,是位姿解算的保障。针对该问题,本文首先设计了具有鲜明颜色对比度的非对称合作目标,将 Harris 算子和具有距离、斜率约束以及方向约束的轮廓跟踪最小周长多边形(minimum perimeter polygon, MPP)方法相结合,提出了亚像素鲁棒角点检测方法,来实现航海上合作目标的角点检测。通过搭建实验系统完成了该方法在精度、鲁棒性方面的验证。

1 亚像素鲁棒角点检测算法

1.1 Harris 角点检测法

Harris 算法的主要思想是,通过引入信号处理中自相关函数理论,利用一阶偏导数来描述灰度的变化,把角点检测和图像的局部自相关函数相结合,通过特征值分析来判断检测的点是否为角点。Harris 算子定义为

$$\mathbf{R} = \text{Det}(\mathbf{M}) - k \cdot \text{Tr}^2(\mathbf{M}) \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{G}(s) \otimes \begin{bmatrix} \mathbf{I}_x^2 & \mathbf{I}_x \mathbf{I}_y \\ \mathbf{I}_x \mathbf{I}_y & \mathbf{I}_y^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{G}(s)$ 为高斯模板; \mathbf{I}_x 和 \mathbf{I}_y 分别为 x 方向和 y 方向的梯度; \otimes 为卷积;Det为矩阵的行列式;Tr为矩阵的迹; k 为经验值,本文取0.06。

1.2 曲面拟合法

常用的曲面拟合法有二维多项式拟合和高斯函数拟合。而实际应用中大多采用二元二次多项式拟合相关函数曲面。本文利用二次多项式来逼近式(1)中 Harris 角点响应函数,如式(3)所示。

$$R(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (3)$$

式中, a_0, a_1, \dots, a_5 为待定系数,在已检测出的角点 (x_0, y_0) 取相邻的8个点,构成 3×3 的拟合窗口,从而可以得到9个方程,利用最小二乘法求解这个超定方程。由于亚像素级角点 (x, y) 对应的是二次多项式的极大值点。因此,函数 $R(x, y)$ 在拟合曲面的极值点应满足以下条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial R(x, y)}{\partial x} = a_1 + 2a_3x + a_4y = 0 \\ \frac{\partial R(x, y)}{\partial y} = a_2 + a_4x + 2a_5y = 0 \end{cases} \quad (4)$$

求解式(4),可以得到亚像素级坐标 x 和 y 为

$$\begin{cases} x = \frac{2a_1a_5 - a_2a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5} \\ y = \frac{2a_2a_3 - a_1a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5} \end{cases} \quad (5)$$

虽然该方法检测精度高,可以达到亚像素级精度,但是当合作目标出现大尺度、角度等畸变时难以确定角点的顺序。

1.3 MPP 角点检测法

MPP 法的主要思想是,用最少的多边形线段获取图像边界形状的近似,在此基础上完成角点检测。在利用 MPP 法进行检测角点前,首先需要合作目标进行轮廓跟踪,本文采用 Freeman 链码跟踪法对合作目标进行轮廓跟踪。从跟踪的链码中记录所得到的凸顶点和凹顶点,其中,凸顶点是指多边形的一个顶点的内角在 $0^\circ \sim 180^\circ$,否则为凹顶点。使用凸顶点构造一个初始多边形,在进一步的计算中删除位于该多边形之外的凹顶点。接着用剩余的凹顶点和凸顶点构造一个多边形,不断重复上一个步骤,最终得到点就为 MPP 法的角点。通过 MPP 法得到的角点可以保证角点在合作目标的轮廓上,而且具有方向性。该算法的主要缺点是检测出合作目标边缘的很多伪角点,而且由于前期对合作目标边缘的一些处理(如腐蚀、膨胀等),使得 MPP 法检测出的角点可能存在一些偏差,所以需要进一步处理。

针对 MPP 法检测出的伪角点,根据本文所设计的合作目标图形,如图1所示,提出基于斜率约束、距离约束以及方向约束这三重约束的伪角点剔除算法。

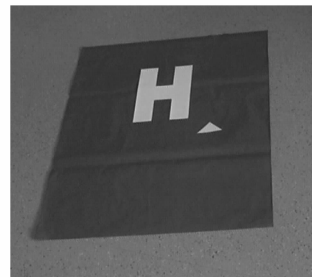


图1 合作目标图案

该算法表述如下:

(1) 斜率约束

假设检测出合作目标上任意3个相邻的角点,分别记为 A, B 和 C ,连线 AB 和 BC ,根据设计合作目标图像先验信息可知,只有当 AB 线的斜率和 BC 线的斜率差值大于设定阈值时, B 点才可能是所需要的角点。

由此给出斜率约束表示为

$$k1 = (x(i-1) - x(i)) / (y(i-1) - y(i)) \quad (6)$$

$$k2 = (x(i) - x(i+1))/(y(i) - y(i+1)) \quad (7)$$

$$k = \| k1 \| - \| k2 \| \quad (8)$$

式中, $x(i-1), x(i), x(i+1)$ 分别为前一角点、当前角点以及下一角点的横坐标; $y(i-1), y(i), y(i+1)$ 为对应点的纵坐标, 当 k 大于设定阈值 0.4 时, 才为满足条件的角点。

(2) 距离约束

假设合作目标上检测出前后两个相邻的角点记为 A 和 B , B 点为待判断的角点, 根据设计合作目标图像先验信息可知, 只有当 A 点和 B 点之间的欧式距离大于设定的阈值, B 点才可能是所需要的角点。

由此给出距离约束为

$$(x(i) - x(i-1))^2 + (y(i) - y(i-1))^2 > \text{thresh} \quad (9)$$

式中, thresh 是根据合作目标性状所设定的固定阈值, 文中实验设置为 20。

当检测出的角点同时满足斜率约束和距离约束的条件, 才是所要的角点。

(3) 方向约束

在得到所要的角点后, 另一个关键问题就是如何确定 MPP 角点的初始角点。因为进行 MPP 角点提取前, 需要进行轮廓跟踪, 而轮廓跟踪出来的边缘链码都是按自然数最小规则排列的, 所以最终检测出的 MPP 角点虽然可以按顺序排列出来, 但是其初始点不是固定的, 会随着尺度、角度的变化而改变。

因此, 通过本文设计合作目标图形中的小三角形边缘上的点求取三角形上重心, 并以重心作为参考点, 进一步求 H 形轮廓上距离该点最近的角点, 将该点作为起始点, 把 H 形轮廓上的角点重新排序, 就可以得到所要的 MPP 角点顺序。

1.4 亚像素 Harris 角点与 MPP 角点的融合策略

从第 1.2 节分析可知, Harris 角点检测精度高, 但是检测出的角点没有顺序; 从第 1.3 节分析可知, MPP 角点虽然具有顺序, 但是角点精度不高。因此, 本文结合这两种算法的优点, 制定了亚像素 Harris 角点与 MPP 角点的融合策略, 使最终检测出的角点不仅可以达到亚像素级精度, 而且具有顺序性。其融合策略思想表述如下: 以经过双重约束后的每一个 MPP 角点为基准点, 求取每一个亚像素 Harris 角点到该基准点的最小欧式距离, 使得每一个 MPP 角点都对应一个与之距离最近的亚像素 Harris 角点, 从而实现了亚像素 Harris 角点与 MPP 角点的融合。融合策略如下:

设 MPP 角点集合为 $\{A_i\}$, 其中, $i = 1, 2, \dots, m$, m 为 MPP 角点个数; Harris 角点集合为 $\{B_j\}$, 其中, $j = 1, 2, \dots, n$, n 为 Harris 角点个数。

$$\begin{aligned} &\text{For } i = 1:m \\ &J = \arg \min_{j=1:n} f(A_i, B_j) \\ &C_i = B(J) \\ &\text{end} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, f 为欧式距离函数; C_i 为经过融合决策后得到的角点。

2 实验系统设计

2.1 合作目标设计

考虑到甲板上除了跑道外还有其他一些设备, 机载摄像机获取的图片很可能包含很多非合作目标, 为了降低检测难度, 设计了具有鲜明颜色对比度的非对称合作目标。绿色的合作目标 H 形和小三角形放置在红色的背板上, 小三角形在 H 形右下角 45° 方向。

2.2 视觉着舰导航角点检测系统计算流程

视觉着舰导航角点检测系统计算流程如图 2 所示。首先, 对合作目标进行设计, 然后对获取的图像进行滤波、分割、识别等预处理。对预处理过的图像分别进行 MPP 法角点提取以及 Harris 角点提取, 其中, 对 MPP 法提取出的角点进一步利用小三角形的重心将 MPP 角点重新排序, 再对其进行斜率约束和距离约束。最后将 Harris 角点和经过三重约束的 MPP 角点经过融合策略进行融合, 最终就可以得到具有顺序的 Harris 角点。

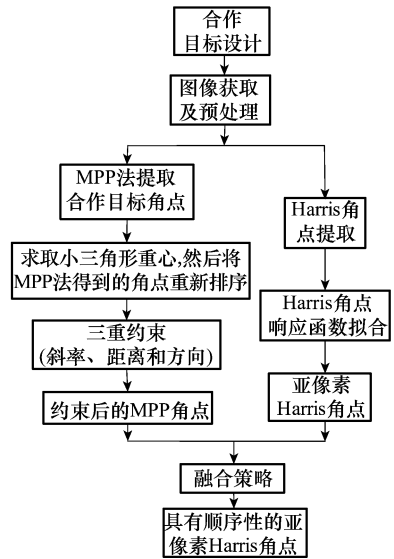


图 2 着舰导航角点检测系统计算流程图

3 实验分析

3.1 坐标系及姿态角定义

(1) 机体坐标系: 原点 O_b 取在飞机质心处, 如图 3 所示, 3 个轴分别用 X_b, Y_b 和 Z_b 表示。

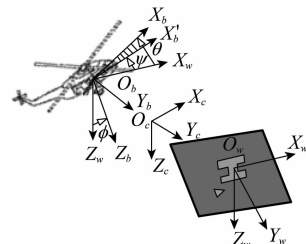


图 3 坐标系示意图

图3中, X_b 轴在飞机对称平面内并平行于飞机的设计轴线指向机头; Y_b 轴垂直于飞机对称平面指向机身右方; Z_b 轴在飞机对称平面内, 与 X 轴垂直并指向机身下方。

(2) 合作目标坐标系: 原点 O_w 取在合作目标图形中心, 并与甲板坐标系固连, 3个轴分别用 X_w, Y_w 以及 Z_w 表示。其中, X_w 轴在 H 合作目标图形对称平面内, 并指向舰首方向; Y_w 轴垂直于 H 图形对称平面指向合作 H 形右方; Z_w 轴在 H 图形对称平面内, 与 X 轴垂直并指向合作目标下方。

(3) 摄像机坐标系与相机坐标系固连, 并与相机坐标系成一定的夹角关系, 3个轴用 X_c, Y_c 和 Z_c 表示。

俯仰角 θ : 机体轴 X_b 与 X_w 的夹角, 抬头为正;

偏航角 ψ : 机体轴 X_b 在合作目标坐标系的投影 X'_b 与 X_w 的夹角, 机头向右偏航为正;

滚转角 ϕ : 机体轴 Z_b 与通过机体轴 X_b 的铅垂面间夹角, 飞机向右滚转时为正。

3.2 实验条件及步骤

实验是在 CPU 为 2.5 GHz, 内存为 2 GB 的电脑上进行的, 使用北京微视新纪元科技有限公司的图像采集盒, 像素分辨率为 640×480 , 合作目标 H 形的长为 29.5 cm, 宽为 20.7 cm, 短边长度为 7 cm, 小正三角形边长为 7 cm, 放置在 H 图形的右下角 45° 方向, 红色的背板长为 1 m, 宽为 77 cm。

实验步骤如下:

步骤 1 利用合作目标的颜色特征, 对图像进行阈值分割, 将合作目标从背景中分离出来;

步骤 2 将分割出来的合作目标进行识别, 考虑到直升机运动和甲板的运动引起的合作目标图像畸变, 本文采用仿射不变矩进行识别, 其表达式可参考文献[4];

步骤 3 识别出合作目标后, 将合作目标区域进行裁剪并进行边缘提取以及形态学滤波, 寻找该区域中的联通区域, 选出连通区域链码长度最长的 3 个, 第 1 个为红色背景的轮廓, 第 2 个为 H 形轮廓, 第 3 个为三角形轮廓;

步骤 4 对 H 形和三角形进行 Harris 角点提取, 并对 Harris 角点响应函数 R 进行二次曲面拟合, 求取亚像素 Harris 角点;

步骤 5 对 H 形和三角形进行 MPP 法角点提取;

步骤 6 利用本文提出的融合策略将亚像素 Harris 角点与 MPP 角点融合, 得到最终所要的角点。

3.3 实验结果及分析

实验在距离合作目标 H 形径向距离 3.5 m 时拍摄的, 相机距离地面高度为 1.5 m, 相机的俯仰角为 -30° , 偏航角为 -20° , 滚转角为 5° 。图 4(a) 为原始图像; 图 4(b) 为对拍摄图像增强后的图像, 可以看出, 经过图像增强后的红色背

板以及绿色的合作标志与周围的背景色彩差异较大, 有利于彩色图像的分割; 图 4(c) 在进行 MPP 法提取角点前, 先对图像进行了膨胀、腐蚀处理, 而且为了防止图像边缘断裂进行了边缘连接, 所以提取出的 H 形边缘有些畸变, 而且利用 MPP 法会得到很多角点, 并且这些角点受前期图像预处理的影响有一定的误差; 图 4(d) 为经过三重约束以及排序后, 剩下所需的有顺序角点, 这些点虽然具有顺序性, 但是可以看出这些角点有一定的偏差; 图 4(e) 为 Harris 提取的角点, 由于背板和 H 形合作目标存在较大的灰度差异, 所以提取的角点比较精确, 但是这些角点的顺序难以确定; 图 4(f) 将 MPP 法和 Harris 法结合, 经过融合策略的融合, 最终得到的角点。

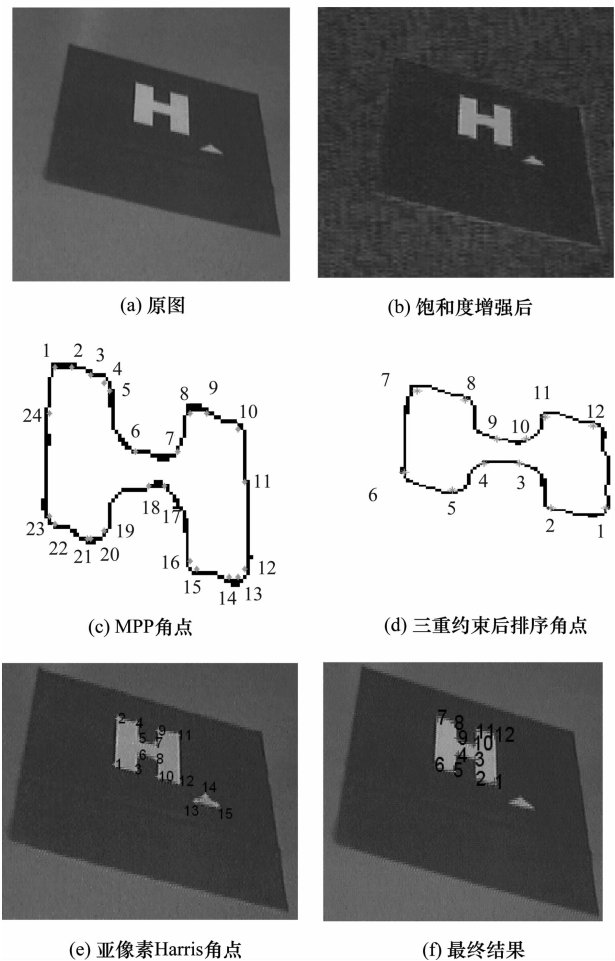


图4 检测结果图

为了验证本文算法对角度畸变的影响, 摄像机距离地面高度为 1.5 m, 距离合作目标 H 形径向距离为 3 m, 将相机俯仰角和滚转角, 分别设为 50° 和 5° , 并保持不变调整偏航角分别为 $-10^\circ, 80^\circ, 170^\circ$ 和 260° , 实验结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出本文算法在合作目标发生角度畸变时都可以检测出合作目标角点, 具有较好的抗畸变能力。

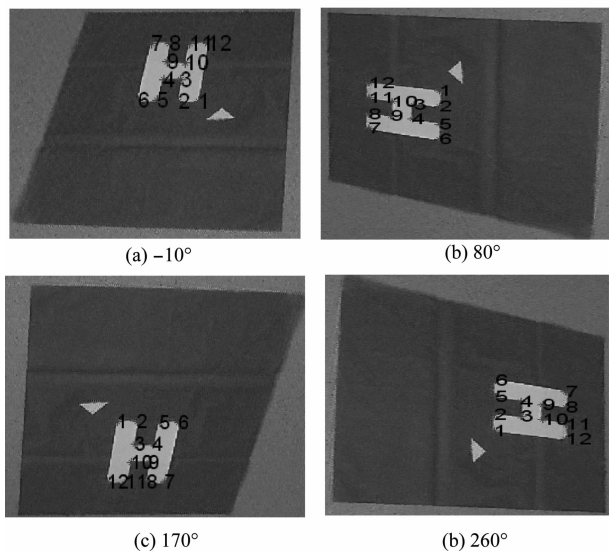


图 5 角度畸变测试结果图

为了验证本文算法的精度,并与传统的轮廓跟踪算法作比较,摄像机距离地面高度为 1.5 m,相机俯仰角为 50°,距离合作目标 H 形径向距离为 3.5 m,角点检测结果如表 1 所示。实验中选取其中前 6 个角点进行比较。通过表 1 可知,传统算法角点检测的平均精度误差约为 1.35 个像素,而本文算法的精度误差为 0.59 个像素,本文算法的精度较高。

表 1 轮廓跟踪法与本文算法提取角点位置比较

角点序号	真实位置	Harris 角点	Harris 误差/像素	本文方法提取的角点	本文方法误差/像素
1 号角点	(317,317)	(317,318)	1	(316.35, 316.64)	0.74
2 号角点	(296,314)	(297,314)	1	(295.66, 314.16)	0.38
3 号角点	(295,294)	(296,294)	1	(295.23, 294.16)	0.28
4 号角点	(276,291)	(277,293)	2.7	(276.58, 291.96)	1.1
5 号角点	(272,307)	(273,307)	1	(272.03, 307.03)	0.04
6 号角点	(252,303)	(253,302)	1.4	(252.11, 303.39)	0.97

此外,为验证本文算法的鲁棒性,通过调整偏航角以及相机与合作目标的径向距离,进行了 48 次实验,实验结果如表 2 所示。

通过表 2 可以看出,本文算法对于图像角度畸变以及一定范围内的尺度畸变都具有较好的鲁棒性,检测精度较高,可以达到亚像素级精度。当距离合作目标越来越远时精度不断下降,在距离合作目标 5.5 m 时,由于利用 Harris 算子无法检测出 H 形合作目标上短边的角点而造成后续的步骤无法进行,检测出错。不过,通过增大照相机的分辨

率或是合作目标的大小都可以使本文算法的使用距离扩大。

表 2 角度检测平均误差

径向距离/m	相机与合作目标之间的旋转角度/(°)					像素
	45	90	135	180	225	
2.0	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02
2.5	0.05	0.12	0.04	0.13	0.11	0.08
3.0	0.25	0.61	0.72	0.22	0.34	0.67
3.5	0.59	0.42	0.67	0.34	0.72	0.66
4.0	0.82	0.93	0.44	0.84	0.67	0.98
4.5	1.2	0.99	0.89	0.88	1.16	1.34
5.0	1.33	1.24	1.01	0.89	1.54	1.24
5.5	error	1.91	error	1.5	error	1.88

通过实验表明,本文算法的作用距离与相机的分辨率和合作目标的大小近似成正比关系,即在合作目标大小不变的情况下,把相机分辨率提高一倍,合作目标的检测距离近似可以增加一倍。当机载相机分辨率选取为 1 280 × 720,且合作目标设计为 5.0 m × 3.6 m 时,通过本文算法,舰载机在距离合作目标中心 130 m 范围内可以有效地检测出合作目标角点。

4 结 论

针对舰载无人直升机着舰时拍摄的图像可能存在大尺度、角度畸变使得合作目标难以检测的问题展开研究,提出采用亚像素 Harris 法结合带有三重约束的 MPP 法的亚像素鲁棒检测算法。经过实验可以得到以下结论:

(1) 本文提出的亚像素鲁棒角点算法可以解决舰载无人直升机着舰时拍摄的图像存在大角度畸变以及一定范围内尺度畸变的合作目标角点检测问题。该算法精度较高,有较强鲁棒性,对无人直升机视觉着舰导航具有一定的指导意义。

(2) 本文算法的作用距离受照相机分辨率和合作目标大小的影响。当照相机分辨率固定时,增大合作目标尺寸可以使本文算法作用范围近似成比例增大。

参考文献:

[1] Kumar V, Yong H, Dugki M, et al. Auto landing control for small scale unmanned helicopter with flight gear and HILS[C]// Proc. of the 5th International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology, 2010:676-681.

[2] Esmailifar S M, Saghafi F. Autonomous unmanned helicopter landing system design for safe touchdown on 6 DOF moving platform[C]// Proc. of the 5th International Conference on Automatic and Autonomous Systems, 2009:245-250.

[3] Qiao Y J, Bai X M, Xie X F, et al. Visual simulation of aircraft carrier assistant landing system[C]// Proc. of the Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application, 2008:714-717.

[4] Cui H M, Xu J H, Zeng Q J, et al. The present situation and development of the world of shipboard helicopter[J]. Helicopter

- Technique*, 2009(2):68-71. (崔翰明, 许建华, 曾庆吉, 等. 世界舰载直升机的现状与发展[J]. 直升机技术, 2009(2):68-71.)
- [5] Wu L B G, Hu J Z, Xu Y M. Visually-guided autonomous helicopter landing on deck[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(34):243-245. (乌兰巴根, 胡继忠, 徐元铭. 无人直升机自主着舰的目标定位视觉算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(34):243-245.)
- [6] Srikanth S, James F M, Gaurav S S. Visually guided landing of an unmanned aerial vehicle[J]. *IEEE Trans. on Robotics & Automation*, 2003, 19(3):371-380.
- [7] Laurent C, Francois C. Visual detection and 3D model-based tracking for landing on an aircraft carrier[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011:1746-1751.
- [8] Srikanth S, James F M, Gaurav S S. Vision-based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2002:2799-2804.
- [9] Xu C, Qiu L K, Liu M, et al. Stereo vision based relative pose and motion estimation for unmanned helicopter landing[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Information Acquisition*, 2006:31-36.
- [10] Li B, Wang X T, Xu X G, et al. Study on assisted landing technology for shipboard helicopter based on computer vision[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(3):370-373. (李博, 王孝通, 徐晓刚, 等. 基于计算机视觉的舰载直升机助降技术研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(3):370-373.)
- [11] Ji S Y. Study of guidance methods of computer vision for the automatic landing of UAV on ship[D]. *Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008. (嵇盛育. 基于计算机视觉的无人机自主着舰引导技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.)
- [12] Qiu L W, Song Z S, Shen W Q. Computer vision scheme used for the automate landing of unmanned helicopter on ship deck[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2003, 24(4):351-354. (邱力为, 宋子善, 沈为群. 用于无人直升机着舰控制的计算机视觉技术研究[J]. 航空学报, 2003, 24(4):351-354.)
- [13] Wang X J, Pan S L, Song Z S, et al. Computer vision scheme for autonomous landing of unmanned helicopter on ship deck[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, 33(6):686-689. (王晓剑, 潘顺良, 宋子善, 等. 无人直升机自主着舰的计算机视觉技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(6):686-689.)
- [14] Zeng F, Shi H Q, Wang H. The object recognition and adaptive threshold selection in the vision system for landing an unmanned aerial vehicle[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Information and Automation*, 2009:117-122.
- [15] Yuan B, Hao Y G. A method of vision-based state estimation of an unmanned helicopter[C]// *Proc. of the 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing*, 2010:1-4.

作者简介:

郝帅(1986-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为视觉导航、模式识别和图像处理。

E-mail: hsh000@163.com

程咏梅(1960-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为信息融合、目标跟踪、视觉导航、模式识别和图像处理。

E-mail: chengym@nwpu.edu.cn

马旭(1985-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为视觉导航、模式识别和图像处理。

E-mail: maxu.fish@yahoo.com.cn

王涛(1976-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为视觉导航和图像处理。

E-mail: keylab@facri.com

赵建涛(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为视觉导航、模式识别和图像处理。

E-mail: haoxust@163.com