

基于特征图案的无人机着舰姿态估计快速算法

庄丽葵 曹云峰 史阳阳 胡运强

(南京航空航天大学航天学院, 江苏 南京 210016)

摘要 根据无人机自主着舰要求,设计了一种辅助的特征图案。利用 Harris 算法进行角点检测,获得了特征点在图像坐标系下的坐标,然后对应得到它的世界坐标系坐标。通过正交迭代的算法估计出无人机的姿态。在自行开发的以数字信号处理机为核心的视觉估计系统平台上对上述算法进行了实验,并进行了半物理仿真。仿真结果表明,该算法具有较快的计算速度和较高的估计精度,对实际应用具有一定参考价值。

关键词 机器视觉;自主着陆;姿态估计;正交迭代;计算机视觉

中图分类号 V249.32 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s109002

A Fast Method of Unmanned Aerial Vehicle Carrier Landing Attitude Estimation Based on Feature Pattern

Zhuang Likui Cao Yunfeng Shi Yangyang Hu Yunqiang

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract Based on the demand of the unmanned aerial vehicle's (UAV's) autonomous landing, an easily identifiable pattern is designed. The image information is achieved by the camera in UAV, by using Harris algorithm to process corner detection to obtain the image coordinates of feature points, and matching them with the spatial coordinates of feature points. Orthogonal iteration algorithm is used to estimate the attitude of UAV. The algorithm is implemented on vision evaluation platform based on digital signal processor (DSP), and semi-physical simulation is conducted. Experimental results show that the method has higher calculation speed and accuracy, which providing a certain reference to practical application.

Key words machine vision; autonomous carrier landing; attitude estimation; orthogonal iteration; computer vision

OCIS codes 150.1708; 150.0155; 150.1135

1 引言

近年来,基于视觉的无人机自主着陆/舰技术已成为国内外飞行控制与导航领域的一个研究热点^[1-2],其关键技术就是从获取的机载图像中快速准确地估计出无人机着陆/舰所需的位姿信息。目前已提出了多种姿态估计算法,如基于点、线的姿态估计以及基于特征如轮廓和曲线的姿态估计算法^[3-8]。

基于特征点的姿态估计算法中,线性算法对噪声非常敏感;而非线性算法虽具有较强的抗干扰能力,但需要初始值,而且需经过大量迭代才能收敛,实时性差。

为解决上述非线性算法的问题,设计了一个易

辨识的辅助特征图案,采用正交迭代算法,以目标域的最小共线误差为目标函数求取最优解。该方法具有与 Levenber-Marquardt 方法相似的精度,而且有更高的计算效率,对初值依赖低,稳健性更强。本文在以数字信号处理器(DSP)为核心的视觉估计系统平台上实现该算法,并进行了半物理仿真,验证了算法的有效性。

2 算法研究

2.1 特征图案设计

着陆区域特征图案的设计直接影响姿态估计的

收稿日期: 2013-10-01; 收到修改稿日期: 2013-11-20

基金项目: 航空基金(20110752005)

作者简介: 庄丽葵(1963—),女,博士,副研究员,主要从事无人机飞行控制技术方面的研究。

E-mail: lkzhuang@nuaa.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

速度和精度。图 1 为在实际环境下设计的一个“H”形图案。底板宽和高都是 1 m,红色标志宽高都为 50 cm,背景为白色。

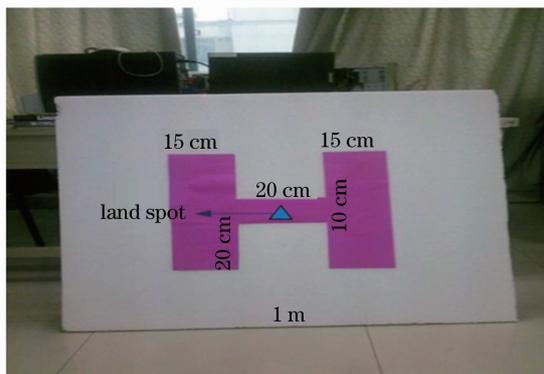


图 1 特征图案

Fig. 1 Feature pattern

2.2 图像分割与特征点提取

进行基于图像空间(HIS)的颜色阈值分割。在 HIS 颜色空间,对 H 分量采用 220~260 经验值进行分割。分割后经中值滤波,并对不连续的目标区域进行调整。并运用 Harris 算子计算像素位置梯度检测出特征点。图 2 为目标测试后的特征图案,其中红点为检测出来的特征点。

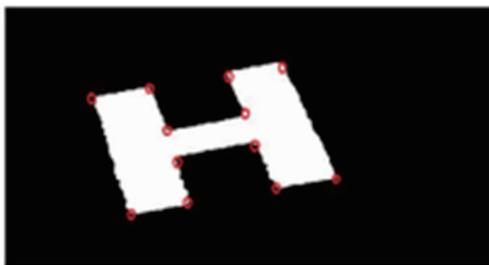


图 2 目标测试后的特征图案

Fig. 2 Feature picture after target test

2.3 姿态估计算法

正交迭代算法根据特征点在图像坐标系及世界坐标系对应关系来确定摄像机外参数(也就是摄像机坐标系相对于空间坐标系的旋转及平移)。其基本思想就是对物体的姿态估计提出一个合适的误差方程,即空间点共线误差目标向量范数。然后把求解误差方程最小值转化为最优问题,迭代求解出最优解。正交迭代算法可以将任意的初始值收敛到最优值。

2.3.1 目标空间点共线误差

物体坐标系中给出的三维特征点 $P_i = (x_i, y_i, z_i)^T, i=1, 2, \dots, n, n \geq 3$, 对应的照相机坐标系点为 $Q_i = (x'_i, y'_i, z'_i)^T$, 两者之间的转换关系为

$$Q_i = RP_i + t, \quad (1)$$

式中 $R = [r'_1, r'_2, r'_3]^T, t = [t_x, t_y, t_z]^T$ 分别是旋转矩阵及平移矩阵。

图 3 为投影模型中目标空间共线误差,其中 P_i 在正规图像平面的投影点为 $v_i = (u_i, v_i, 1)^T$ 。目标空间共线方程如下:

$$RP_i + t = V_i(RP_i + t), \quad (2)$$

目标空间共线误差为

$$e_i = (I - V_i)(RP_i + t), \quad (3)$$

式中 $V_i = \frac{v_i v_i^T}{v_i^T v_i}$ 为沿着视线的投影矩阵, I 为单位矩阵。

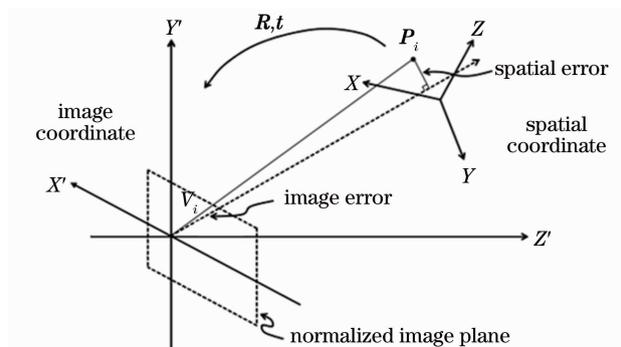


图 3 投射模型中目标空间共线误差

Fig. 3 Colinearity error of target space in the perspective projection model

2.3.2 正交迭代算法

正交迭代(OI)算法就是获得 R 和 t 使得共线误差平方和最小。令目标函数为

$$E(R, t) = \sum_{i=1}^n \|e_i\|^2 = \sum_{i=1}^n \|(I - V_i)(RP_i + t)\|^2, \quad (4)$$

限制条件为 $R^T R = I$ 。当给定旋转矩阵 R , 可以得到 t 的最优解

$$t(R) = \frac{1}{n} \left(I - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^n (V_i - I) RP_i. \quad (5)$$

令 $Q_i(R) = V_i[RP_i + t(R)], P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i, Q(R) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i(R), M(R) = \sum_{i=1}^n Q'_i(R) P'_i$, 其中 $P'_i = P_i - P, Q'_i(R) = Q_i(R) - Q(R)$ 。

算法迭代过程如下:

- 1) 给出旋转矩阵初始值 $R^{(0)}$, 计算平移矩阵初始值 $t^{(0)}$;
- 2) 假设 R 的第 k 个估计值为 $R^{(k)}$, 则 $t^{(k)} = t[R^{(k)}], Q_i^{(k)} = R^{(k)} P_i + t^{(k)}$;
- 3) 求出第 $k+1$ 个迭代的旋转矩阵 $R^{(k+1)}$ 及平移矩阵 $t^{(k+1)}$;

$$\mathbf{R}^{(k+1)} = \arg \min_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^n \| \mathbf{R} \mathbf{P}_i + \mathbf{t} - \mathbf{V}_i \mathbf{Q}_i^{(k)} \|^2 = \arg \max_{\mathbf{R}} r[\mathbf{R}^t \mathbf{M}(\mathbf{R}^{(k)})], \quad (6)$$

式中 $\arg \min_{\mathbf{R}}$ 表示最大化, $\arg \max_{\mathbf{R}}$ 表示最小化。

$$\mathbf{t}^{(k+1)} = \mathbf{t}[\mathbf{R}^{(k+1)}]. \quad (7)$$

利用奇异值分解(SVD)求解(6)式:

4) 如果误差函数(4)式的值大于预先设置的最大限制值,就返回到步骤3),否则结束流程并给出结

果 \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 。

3 DSP 实现及仿真研究

3.1 系统构成

为验证方法的有效性,开发了以 DSP 为核心的视觉估计系统,处理器采用的 DSP 为 TMS320DM642,摄像机为 Mitsugi 公司的 MS-923D。样机及半物理仿真系统如图 4 所示。

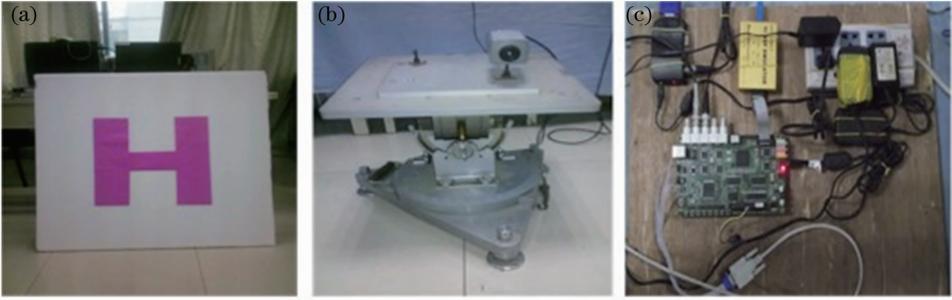


图 4 实验系统。(a)特征图案;(b)原地旋转台;(c) DSP 板

Fig. 4 Experimental system. (a) Feature pattern; (b) manually operated turntable; (c) DSP platform

3.2 实验结果及分析

由于转台转角限制(当转角过大时,特征点不能全部都显示在图像中),实验中转角范围取为 $0^\circ \sim 40^\circ$ 。姿态的绝对误差(RMSE)为三个欧拉角的平方根 $\sqrt{(\theta' - \theta)^2 + (\phi' - \phi)^2 + (\psi' - \psi)^2}$ 的误差,其中 θ', ϕ', ψ 为计算值, θ, ϕ, ψ 为实际值。

将相机固定在离目标 2 m 处,先每次只改变其中一个姿态角,实验结果分别如表 1、表 2、表 3 所示。然后同时改变三个姿态角,结果如表 4 所示。

表 1 改变俯仰角

Table 1 Changing pitch angle

Real value / (°)	OI value / (°)			OI RMSE / (°)
	Yaw angle	Pitch angle	Roll angle	
5	-0.29	5.02	-0.11	0.31
10	-0.42	10.13	-0.16	0.47
15	-0.61	15.43	-0.31	0.81
20	-1.12	20.92	-0.3	1.48
25	-1.32	25.64	-0.27	1.49
30	-1.64	30.72	0.04	1.79
35	-1.69	36.14	0.19	2.05
40	-2.35	41.26	1.21	2.93

分析可知:

1) 初始值与实际值的接近度影响结果的精确度。初始值与真实值越接近,算法迭代的次数越少,精度也越高;

2) 理论上,特征点越多,算法就越准确。然而实际实验的结果表现不明显;

3) 实验表明,算法迭代的次数一般在 30 次以内,在主频 600 MHz 的 DSP 开发板上运行的时间接近 2 ms,算法的实时性较好。

表 2 改变偏航角

Table 2 Changing yaw angle

Real value / (°)	OI value / (°)			OI RMSE / (°)
	Yaw angle	Pitch angle	Roll angle	
5	4.89	-0.09	0.39	0.42
10	9.76	-0.15	0.89	0.93
15	15.10	-0.31	0.98	1.03
20	19.97	-0.65	1.13	1.30
25	24.74	-0.78	1.76	1.94
30	29.90	-0.83	1.81	1.99
35	35.33	-1.36	2.12	2.54
40	40.01	-1.68	2.36	2.90

表 3 改变滚转角

Table 3 Changing roll angle

Real value / (°)	OI value / (°)			OI RMSE / (°)
	Yaw angle	Pitch angle	Roll angle	
5	-0.31	-0.2	5.08	0.38
10	-0.06	0.32	9.89	0.34
15	0.43	0.51	15.35	0.75
20	0.91	0.73	20.52	1.28
25	1.13	0.91	26.11	1.82
30	1.58	1.31	30.55	2.12
35	1.62	1.36	36.53	2.61
40	2.06	1.56	41.43	2.95

表 4 改变所有角
Table 4 Changing all angles

Real value /($^{\circ}$)			OI value /($^{\circ}$)			OI RMSE /($^{\circ}$)
Yaw angle	Pitch angle	Roll angle	Yaw angle	Pitch angle	Roll angle	
5	0	0	4.89	-0.49	-0.67	0.83
5	5	0	5.56	5.61	-1.21	1.47
5	5	5	5.10	6.12	4.06	1.47
10	5	5	9.76	6.42	4.53	1.51
10	10	5	9.86	11.74	6.21	2.12
10	10	10	10.12	11.71	11.74	2.44
15	10	10	14.85	12.23	12.60	3.43
15	15	10	15.81	16.74	12.46	3.12
15	15	15	16.71	16.72	16.19	2.70
20	15	15	20.60	17.32	17.69	3.60
20	20	15	22.45	22.25	17.81	4.35
20	20	20	22.74	22.33	23.64	4.46

4 结 论

研究了一种基于特征图案的姿态估计方法,可以在保证精度的同时提高姿态估计的速度。实验结果表明该算法具有较高的估计精度和较好的实时性。

参 考 文 献

- 1 Lorenz Meier, Gim Hee Lee. A micro aerial vehicle design for autonomous flight using onboard computer vision [J]. *Auton Robot*, 2012, 33(1-2): 21-39.
- 2 Tomas Krajník, Matias Nitsche, S Pedre, *et al.*. A simple visual navigation system for an UAV [C]. *System, Signal and Devices (SSD)*, 2012 9th International Multi-Conference on IEEE, 2012: 1-6.
- 3 Yang Gui, Pengyu Guo. Airborne vision-based navigation method

- for UAV accuracy landing using infrared lamps [J]. *J Intelligent & Robot Systems*, 2013, 72: 197-218.
- 4 Peng Wang, Xu Xiao, Zimiao Zhang, *et al.*. Study on the position and orientation measurement method with monocular vision system [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(1): 55-58.
- 5 Zimiao Zhang, Changku Sun, Peng Wang. Two-step pose estimation method based on five reference points [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(7): 071501.
- 6 Jianfang Dou, Jianxun Li. Robust image matching based on SIFT and Delaunay triangulation [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(s1): s11001.
- 7 Zhuxin Zhao, Gongjian Wen, Bingwei Hui, *et al.*. Velocity estimation of an airplane through a single satellite image [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(8): 081002.
- 8 Zimiao Zhang, Changku Sun, Peng Wang. Pose measurement method based on geometrical constraints [J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(8): 081505.

栏目编辑: 李志兰