

基于比值法与相关法融合的 SURF 特征点匹配方法

周 阳, 吴德伟, 邵能建, 杜 佳
(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

摘要: 为实现UCAV认知导航对特征点匹配的高匹配分数和低错误率要求,提出了一种针对SURF特征点匹配的融合方法。该方法在分析比值法和相关法提纯匹配对性能的基础上,将两者融合,通过划分阈值区间提纯匹配对。仿真结果表明,该方法获得的匹配对具有高匹配分数和低错误率,同时有效弥补了比值法无先验知识时阈值模糊的缺陷。

关键词: 无人机导航; SURF; 比值法; 相关法; 融合方法; 匹配分数

中图分类号: V279 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)03-0040-04

A Method for SURF Feature Point Matching Based on Fusion of Ratio and Correlation Methods

ZHOU Yang, WU Dewei, TAI Nengjian, DU Jia
(College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to satisfy the requirements of UCAVs in cognitive navigation on high matching score and low error rate for feature point matching, a fused matching method for SURF feature points was proposed. Analysis was made to the performance of purifying matching pairs for the ratio method and correlation method, based on which the two methods were fused together, and the matching pairs were purified by partitioning the threshold intervals. Simulation results show that the fused method can obtain matched feature points with high matching score and low error rate, and can effectively compensate the deficiency that can't choose the threshold clearly without prior knowledge.

Key words: navigation of UCAV; SURF; ratio method; correlation method; fusion method; matching scores

0 引言

无人战斗机(Unmanned Combat Aerial Vehicles, UCAV)认知导航系统^[1-2]必须具备环境感知能力。环境信息可通过视觉获取,其直观表示便是图像,因此以图像信息表征环境信息成为了环境感知的一种形式。然而UCAV高机动性及所处环境复杂性,带来图像污染,使得环境感知更加困难。近年来,基于图像局部不变特征性的特征点提取方法得到了较快发展,其中SURF算法^[3]提取的特征点对尺度变化、光照、图像旋转等均有很高的鲁棒性,通过稳健的特征点匹配实现环境感知值得深入研究。

SURF特征点匹配是指获取两幅或者多幅图像中

对应同一场景的特征点,作为图像识别和配准的依据。其匹配思路可归结为通过距离函数在高维矢量之间进行相似性检索^[4]。常用的匹配方法通过检索找到最近邻的匹配对,该方法得到的匹配对错误率较大,于是出现了各种匹配对提纯算法,如比值法^[4]、MLESAC算法^[5]和RANSAC算法^[6]等,目的均是为了提高特征点匹配分数、降低错误率。其中,比值法因实现简单得到较好应用,但该方法提纯匹配对时阈值选择范围广,在无特征点先验知识时阈值大小难以把握,如小阈值时匹配分数低,大阈值时错误率高。

本文以SURF提取特征点为研究对象,将相关法^[7]融入到比值法中,以最近距离得到的粗匹配对为基础,将比值法阈值和相关法阈值结合提纯匹配对,实现特征点的精匹配。提出一种高匹配分数和低错误率的特征点匹配方法,同时解决比值法阈值选择不明确的问题。

1 SURF 算法特征点提取分析

SURF算法是由Bay^[3]等人提出的一种快速特征

收稿日期:2012-10-17

修回日期:2012-11-09

基金项目:国家自然科学基金(61273048)

作者简介:周 阳(1987—),男,四川遂宁人,硕士生,研究方向为无人智能自主导航。

点检测和描述算法。其主要分为3个步骤:特征点检测、确定特征点主方向、生成特征描述矢量。

1.1 特征点检测

特征点检测时首先需积分图像^[8],然后将高斯二阶微分模板替换为盒子滤波器^[9],将图像的卷积转换成盒子滤波运算。

令对应简化后高斯二阶微分模板与图像卷积结果为 D_{xx} 、 D_{yy} 和 D_{xy} 。则 Hessian 矩阵行列式简化为

$$\text{Det}(H) = D_{xx}D_{yy} - (0.9D_{xy})^2 \quad (1)$$

式中的 D_{xx} 、 D_{yy} 和 D_{xy} 通过盒子滤波器对应4个角点积分图像值及盒子面积运算求解,以减小运算量。同时通过不断扩大滤波器尺寸求取积分图像滤波响应,得到尺度金字塔(本文设置了5组滤波器)。由此,将空间每个点在相邻位置和相邻尺度上的 Hessian 响应值(共26个)进行比较,极值点即为检测到的特征点,其对应的位置和尺度即为特征点位置和尺度。

1.2 确定特征点主方向

首先以特征点为中心,在以 $6s$ (s 为特征点的尺度)为半径的圆形区域内进行 x 和 y 方向 Haar 小波响应运算,然后使用 $\sigma = 2s$ 的高斯加权函数对 Haar 小波响应进行高斯加权,最后用 60° 的扇形窗口在以特征点为圆心的区域内以固定步长滑动,求取滑动窗口内 x 和 y 方向 Haar 小波响应累加值,最大值所对应的方向即为特征点主方向。

1.3 生成特征描述矢量

首先以特征点为中心沿主方向将 $20s \times 20s$ 的图像划分成 4×4 个子块,然后用尺寸为 $2s$ 的 Haar 模板求取每个子块响应值,并对响应值 $\sum dx$ 、 $\sum |dx|$ 、 $\sum dy$ 、 $\sum |dy|$ 进行统计,生成特征描述矢量。由于对每个特征点进行描述时有 4×4 个子块,且每个子块用4维向量表示,因此特征点的描述矢量共有64维。

在完成以上3个步骤后,即可提取图像的特征点,同时给出每个特征点的位置、尺度、主方向和描述矢量的信息。图1给出了图像中检测到的特征点。(326 × 400 图像共检测到656个特征点。)



图1 图像中检测到的特征点

Fig. 1 Detected feature points in an image

2 基于比值法与相关法融合的特征点匹配法

特征点匹配时需充分利用待匹配图中特征点描述

矢量间关系,若提取的两个特征点描述矢量间距离很小,则表示其在对应场景中同一位置可能性很大。反之,其在对应场景中同一位置可能性很小。特征点匹配时要尽可能得到高匹配分数和低的错误率。

匹配分数定义为两幅图像特征点之间正确匹配对的数量与两幅图像中检测到的较少特征点数量比。错误率表示提纯后错误匹配对数量与提纯后总匹配对数量之比。

2.1 基于比值法特征点匹配

基于比值法的特征点匹配建立于特征点描述矢量欧式距离上,其性能比其他基于欧式距离的匹配策略较好。常用的基于欧式距离的匹配策略有3种^[10]:基于最近距离的匹配、基于阈值的匹配和基于最近和次近距离比值的匹配(以下简称比值法)。

基于最近距离的匹配在无阈值限制时可获得最多匹配对,但错误率较大。基于阈值的匹配由于阈值选择的灵活性,导致匹配对多样性,大阈值时一个特征点可能对应多个匹配点。小阈值时可能没有匹配点。比值法较前两种性能更好,但也有缺陷:1)小阈值时易剔除正确匹配对,降低了匹配分数;2)大阈值时易引入错误匹配对,增加了错误率;3)得到满足高匹配分数和低错误率的匹配对阈值选择困难。为此本文对比值法作了改进,使其获得的匹配对具有高匹配分数和低错误率,同时克服阈值选择模糊的缺点。

2.2 基于相关法的特征点匹配

基于相关法的特征点匹配取决于特征点描述矢量相关性程度,其评价指标为相关系数,定义为

$$\rho_{mn} = \frac{\text{cov}(p_{s1}(m), p_{s2}(n))}{\sqrt{D(p_{s1}(m))} \sqrt{D(p_{s2}(n))}} \quad (2)$$

式中: $\text{cov}(p_{s1}(m), p_{s2}(n))$ 表示图像1中第 m 个特征点和图像2中第 n 个特征点描述矢量的协方差; $D(p_{s1}(m))$ 、 $D(p_{s2}(n))$ 分别表示图像1中第 m 个特征点和图像2中第 n 个特征点描述矢量的方差。由相关系数定义可知,当两个特征点相关性很差时,其对应的 ρ_{mn} 较小,特征点正确匹配的可能性小;反之, ρ_{mn} 较大,特征点正确匹配可能性大。因此,基于相关法特征点匹配需设置阈值。经仿真,当图像中检测到大量特征点时,对特征点进行遍历式求相关系数达不到时间优化目的,本文为此作了改进。

2.3 比值法及相关法特征点匹配性能分析

为使特征点匹配对有高匹配分数和低错误率,同时解决比值法阈值选择困难及相关法耗时问题,首先,分析了特征点遍历求相关系数和只求对应粗匹配对相关系数的耗时关系,然后,分析了单独采用比值法和相关法的匹配分数和错误率随阈值变化情况(实验图像

大小为 306×306 , 目标图像旋转 180° 。

表1对比分析了不同特征点数量比下, 遍历式求相关系数和以最近距离法得粗匹配对后求对应相关系数耗时关系。可见, 只求粗匹配对相关系数可有效解决遍历式求相关系数的耗时问题。

表1 求相关系数时间对比

Table 1 Comparison of time used to solve correlation coefficient

特征点数量比	遍历式/s	粗匹配后/s	时间相对缩短量/%
296:328	3.9451	0.0846	97.9
514:743	11.8395	0.1246	98.9
717:953	22.9698	0.1572	99.3

图2给出了比值法下匹配分数和错误率随阈值变化情况。采用SURF算法提取特征点后, 以最近距离获得516对匹配对, 采用比值法提纯匹配对, 阈值区间为 $0 \leq M \leq 1$, 间隔为0.05。由图可得: 随阈值增加, 匹配分数和错误率均有增加趋势。当阈值为0.7时, 匹配分数超过20%, 此时错误率小于10%。当阈值继续增加时, 匹配分数增幅不大, 但错误率急剧上升, 阈值达到0.85时, 错误率将近30%。可见, 采用比值法提纯匹配对时, 小阈值下匹配分数低, 大阈值下错误率高, 阈值选择随机性大。

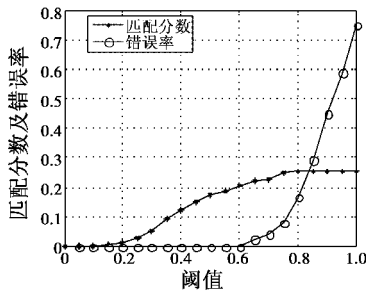


图2 比值法下匹配分数和错误率随阈值变化情况

Fig. 2 Change of matching scores and error rate along with threshold based on ratio method

图3给出相关法下匹配分数和错误率随阈值变化情况。

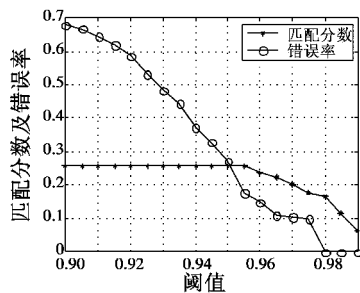


图3 相关法下匹配分数和错误率随阈值变化情况

Fig. 3 Change of matching scores and error rate along with threshold based on correlation method

同样以SURF算法提取特征点后, 根据最近距离得516对匹配对, 采用相关法提纯匹配对, 阈值区间为 $0.9 \leq \rho \leq 1$, 间隔为0.005。可见, 随阈值增加, 错误率减小明显, 当阈值高于0.97时, 错误率低于10%。因此, 选取大阈值可以有效减小错误率。

2.4 融合方法

根据上述分析, 本文对比值法和相关法进行融合, 具体思路如下。

1) 通过最近距离法得粗匹配对, 同时求取粗匹配对的相关系数, 以解决特征点遍历式求相关系数的耗时问题。

2) 采用融合阈值的策略。

比值法和相关法阈值摒弃单个固定值的设置方式, 而是将比值法阈值与相关法阈值融合、划区间。当比值法阈值设置较小时(本文取0.7), 单独采用比值法能够较好避免引入错误匹配对。比值法阈值增加时, 对其进行相应相关法阈值约束, 即, 比值法阈值较大时, 采用的相关法阈值也较大, 这样就可以剔除错误匹配对, 同时提取不符合比值法要求但满足高相关性匹配对, 以提高匹配对匹配分数并降低错误率。

阈值区间划分如图4所示, 其中斜线部分为匹配对参数满足精匹配要求的区域。由图可知:

1) 斜线区域呈梯形, 与比值法和相关法时只有一个矩形区域相比, 范围更广、阈值更灵活;

2) 随比值法阈值增加, 相关法阈值也相应增大。由此, 当两图像中特征点最近和次近距离比值较大但有较高相关性时匹配对将被保留, 以提高匹配分数、降低错误率。

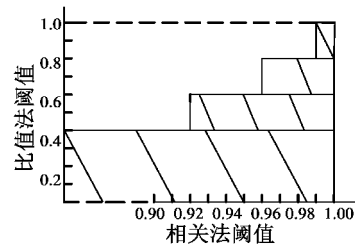


图4 融合法阈值区间划分示意图

Fig. 4 Threshold interval division of fusion method

3 仿真实验与结果分析

仿真图像大小为 326×400 , 对目标图像相对基准图像发生不同角度旋转以及目标图像受不同强度高斯噪声干扰的性能进行了算法验证, 同时经仿真证明, 比值法性能比相关法好, 因此本文只对融合法和比值法作对比分析。评价指标为匹配分数和错误率。融合法阈值区间划分为

$$\left\{ \begin{array}{ll} M \leq 0.7 & \\ 0.7 < M \leq 0.75, & \rho \geq 0.9 \\ 0.75 < M \leq 0.8, & \rho \geq 0.94 \\ 0.8 < M \leq 0.82, & \rho \geq 0.95 \\ 0.82 < M \leq 0.85, & \rho \geq 0.97 \\ 0.85 < M \leq 0.9, & \rho \geq 0.98 \\ M > 0.9, & \rho \geq 0.985 \end{array} \right. \quad (3)$$

具体步骤如下：

- 1) 利用 SURF 提取目标图和基准图中的特征点；
- 2) 以最近距离得特征点粗匹配对,并求取特征点最近和次近距离比值；
- 3) 求粗匹配对相关系数；
- 4) 对比值法阈值和相关系数法阈值进行区间划分,以此作为匹配对提纯依据；
- 5) 根据特征点最近距离和次近距离比值,以及所得到粗匹配对的相关系数判定匹配对是否满足精匹配要求,不满足的将被剔除；
- 6) 对比分析两种方法下的匹配分数和错误率。

3.1 噪声干扰下性能分析

仿真选取零均值高斯噪声,比值法和融合法均在相同噪声方差下进行了 100 组实验,实验结果为 100 次实验数据的算术平均,图 5 给出了两方法在噪声方差为 0.08 时特征点匹配结果,噪声干扰下的数据分析详细结果如表 2 所示。

表 2 不同噪声方差下比值法与融合法性能对比

Table 2 Performance comparisons of ratio method and fusion method with different noise variance

噪声方差	阈值区间	比值法		融合法	
		匹配分数/%	错误率/%	匹配分数/%	错误率/%
0.01	0.5~0.6	19.05~28.70	0		
	0.6~0.7	28.70~37.20	0	44.57	0
	0.7~0.8	37.20~43.29	0		
0.03	0.5~0.6	5.49~8.84	0		
	0.6~0.7	8.84~17.53	0	24.57	0
	0.7~0.8	17.53~23.78	0~1.27		
0.05	0.5~0.6	2.29~4.88	0		
	0.6~0.7	4.88~9.30	0	14.63	0
	0.7~0.8	9.30~13.26	0~3.33		
0.08	0.5~0.6	1.83~3.35	0		
	0.6~0.7	3.35~5.49	0	9.91	2.52
	0.7~0.8	5.49~8.69	0~5.26		

由此可见:1) 不同噪声方差下,比值法的特征点匹配分数及错误率均随阈值增大而增加,但噪声方差越大,增加幅度越小;2) 比值法提纯匹配对时,弱噪声下(方差小于 0.03),阈值设 0.8 时有高匹配分数,且错误率较低。强噪声下(方差为 0.08),虽然在阈值为 0.8 时匹配分数比小阈值时高,但错误率较大,为 5.26%;3) 不同噪声方差下,融合法比比值法具有更高的匹配分数

和低错误率,其中,噪声方差为 0.08 时,融合法匹配分数为 9.91%,错误率为 2.52%,比比值法阈值为 0.08 时匹配分数相对增加 14.04%,错误率相对减小 52.09%。

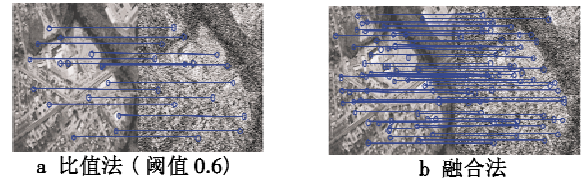


图 5 高斯噪声下特征点匹配图

Fig. 5 Matching image of feature points in Gaussian noise

可见比值法提纯匹配对时,相同的阈值区间在不同噪声方差下的匹配分数和错误率不同。强噪声时匹配分数低,错误率高,为降低错误率需减小阈值;弱噪声时,虽不同阈值下均能保证低错误率,但为获得高匹配分数需要增加阈值。因此对噪声无先验知识时,要获得高匹配分数和低错误率,阈值选择困难。采用融合法时不受阈值选择多样性限制,而且与比值法相比,在相同匹配分数下错误率更低,能够满足匹配对提纯要求。

3.2 图像旋转下性能分析

仿真时目标图相对基准图旋转 180°,图 6 为两方法下特征点匹配结果,表 3 给出了数据对比分析情况。

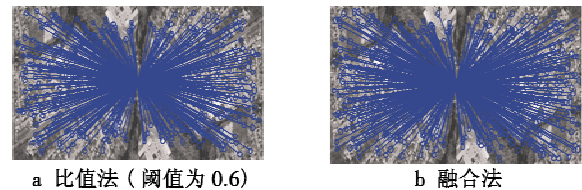


图 6 图像旋转 180°时特征点匹配图

Fig. 6 Matching image of feature points with rotating of 180°

表 3 图像旋转下比值法与融合法性能对比

Table 3 Performance comparisons of ratio method and fusion method in the rotated image

阈值区间	比值法		融合法	
	匹配分数/%	错误率/%	匹配分数/%	错误率/%
0.4~0.5	19.66~26.98	0		
0.5~0.6	26.98~32.62	0		
0.6~0.7	32.62~37.04	0	42.38	0.36
0.7~0.8	37.04~41.31	0~1.85		
0.8~0.9	41.31~47.71	1.85~27.21		
0.9~1	47.71	27.21~52.29		

由此可见:1) 采用比值法时,小阈值匹配分数低,大阈值错误率高;阈值区间在 0.7~0.8 内特征点匹配性能相对较好,但选择同时满足高匹配分数和低错误率的阈值比较困难;2) 融合法具有较高匹配分数和低的错误率;3) 融合法与比值法相比,其匹配分数落在阈值为 0.8~0.9 内,但错误率比该区间最小值相对减小 80.54%,其错误率在 0.7~0.8 内,但匹配分数相比

(下转第 56 页)

度。另外,在电阻阵外壳上还安装了加热元件,通过控制加热元件的工作状态来改变电阻阵与热沉的热交换速度,从而加强了系统对电阻阵温度的实时控制。

2) 测量。由于电阻阵的表观温度可以降到 150 K 以下,辐射能量很小,因此需要研制类似 GIRS 的系统对电阻阵的辐射进行标定。

4 结 论

从以上介绍可以看出,KVACC 的研发思路非常清晰,采用了模块化设计,具有强大的可扩展性。国内冷舱系统的研制可以借鉴国外的发展路线,充分考虑系统可拓展性。在技术条件和资金条件受限的情况下,先搭建起具备基本测试功能的冷舱系统,然后依托相关技术的发展逐步进行系统功能的升级。

参 考 文 献

- [1] FLYNN D S, MARLOW S A. Development of a 2-color projection system for the KHILS Vacuum Cold Chamber (KVACC) [C]//SPIE, 2000, 4027:236-247.
- [2] LOWRY H S, BREEDEN M F, CRIDER D H, et al. Projection technologies for imaging sensor calibration, charac-

terization, and HWIL testing at AEDC [C]//SPIE, 2010, 7663:766303-1-766303-12.

- [3] HAYES A G, DOWNS G, GABRIELSON A, et al. The seeker experimental system at MIT Lincoln laboratory [C]//SPIE, 2006, 6208:602809-1-620809-11.
- [4] ARENDT J W, BINDUGA G E. Broadband zoom collimator for installation on a flight motion simulator at the KHILS facility [C]//SPIE 2009, 5408:66-75.
- [5] MURRER R L, THOMPSON JR R A. Developments at the kinetic-kill vehicle hardware-in-the-loop simulator (KHILS) facility [C]//SPIE, 1999, 31-47.
- [6] BASTOW M, SAYLOR D. Scene generators/ projectors and optical sensor interface issues [C]// SPIE, 2003, 1967:89-98.
- [7] GLATTKE E W, THOMPSON R A, MARLOW S A. KVACC cryogenic complex scene test capability for 1 and 2-color sensors [C]//SPIE, 2006, 6208:62080A-1-62080A-12.
- [8] LIPPERT J R, TIMMS V G. Capability and integration test of the KHILS Vacuum Cryogenic Chamber (KVACC) [C]//SPIE, 1996, 2741:150-156.
- [9] THOMPSON R A, HERALD W L, BERGIN T P, et al. Advances in cryo-vacuum test capabilities for dual-band sensors at the kinetic kill vehicle hardware-in-the loop simulation (KHILS) facility [C]//SPIE, 2004, 5408:107-117.

(上接第 43 页)

该区间最大值相对增加 2.59%。因此,融合法提纯匹配对的性能比比值法好,而且克服了比值法阈值选择模糊的缺点。

4 结 束 语

为满足 UCAV 认知导航对特征点匹配对高匹配分数和低误匹配率要求,本文在研究 SURF 算法特征点提取基础上,提出了一种特征点匹配融合方法。该方法将比值法和相关法相结合,以最近距离为标准获得粗匹配对,采用融合的阈值区间作为匹配对提纯依据。实验结果表明,该方法下匹配对有较高匹配分数和低的错误率,同时克服了比值法无先验知识时阈值选择不明确的缺点,避免了遍历式求相关系数时的耗时问题,是一种有效的特征点匹配方法。

参 考 文 献

- [1] 吴德伟,邵能建,戚君宜. 基于认知理论的 UCAV 智能导航研究新进展 [J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2011, 12(4):52-57.
- [2] 邵能建,吴德伟,戚君宜. 基于改进 SIFT 的高鲁棒性特征点提取方法 [J]. 航空学报, 2012, 33(12):2313-2321.
- [3] BAY H, TUVTELLARS T, GOOL L V. SURF: Speeded up robust feature [C]//Proceedings of the European Confe-

rence on Computer Vision. Graz, Austria: University of Liubljana, 2006:404-417.

- [4] 王永明,王贵锦. 图像局部不变性特征与描述 [M]. 北京:国防工业出版社, 2010.
- [5] TORR P H S, ZISSERMAN A. MELSAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2000, 78(1):138-156.
- [6] FISCHLER M, BOLLES R. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1981, 24(6):381-395.
- [7] MUNAWAR A, QAISAR A, EJAZ A, et al. Autonomous target detection using segmented correlation method and tracking via mean shift algorithm [C]//IEEE International Conference on Mechatronics, 2011-5-17-19:1-6.
- [8] VIOLA P, JONES M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple feature [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2001, 1:I-511-I-518.
- [9] SIMARD P, BOTTOU L, HAFFINER P, et al. Boxlets: Fast convolution algorithm for signal processing and neural networks [C]//Advances in Neural Information Processing Systems, 1999, 11:571-577.
- [10] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. A performance evaluation of local descriptors [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10):1615-1630.