

文章编号 1004-924X(2012)11-2531-09

基于不变特征描述符实现星点匹配

翟 优*, 曾 峦, 熊 伟

(中国人民解放军装备学院, 北京 101416)

摘要:为了能够在星图存在旋转角度情况下,自动快速地完成星图匹配,提出了一种基于不变特征描述符的旋转不变匹配方法,将加速鲁棒特征(SURF)描述符应用于星点特征的描述和匹配。首先,对星图进行图像分割,抑制非极大值,并检测星点;然后,为计算星点分布尺度因子 s ,在半径为 $6s$ 的圆形邻域内为每个星点计算主方向,之后将 $20s \times 20s$ 的邻域与主方向对准,并在该邻域内为每个星点计算 SURF 描述符。最后,基于透视投影模型的匹配策略,提纯星点,计算匹配星图之间的变换矩阵。实验结果显示,该方法能够鲁棒地提取星点,并在图像存在旋转、平移及部分视角变化的情况下完成星图匹配,仿真实验的匹配星点的误差均在 1 pixel 以下,实拍星图实验的匹配星点的误差均在 1.5 pixel 以下,表明为每个星点建立描述符,进行匹配识别的思路是可行的。

关键词:星点检测;星点匹配;加速鲁棒特征描述符;尺度不变特征变换描述符

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122011.2531

Star matching based on invariant feature descriptor

ZHAI You*, ZENG Luan, XIONG Wei

(Academy of Equipment, the Chinese People's Liberation Army, Beijing 101416, China)

* Corresponding author, E-mail: youyou1952@sina.com

Abstract: To match automatically rotated stellar images, a rotation invariant matching method based on invariant feature descriptors was proposed, in which the Speeded Up Robust Features (SURF) was used to describe and match star features for the first time. First, a stellar image was segmented, and the non-maxima value was suppressed to extract star points in the stellar image. Then, a star distribution scale factor was calculated, the dominant orientation was obtained in a circle region with a radius of $6s$, and the $20s \times 20s$ local region was rotated to the dominant orientation. In the local region, the SURF descriptor was calculated for each star. Finally, an automatic matching strategy based on the difference between dominant orientations was proposed. By this method, the threshold was calculated automatically and the transform matrix was given. Experimental results demonstrate that the proposed method can robustly detect star features and achieve a high precision stellar image matching between images with rotation, translation and perspective change. Obtained results show that corre-

收稿日期:2012-07-10;修订日期:2012-08-15.

基金项目:省部级试验技术研究项目(No. 2009SY4110005)

spondent star errors is below 1 pixel and 1.5 pixel for simulation and real image experiments, respectively. It indicates that the method to apply SURF descriptor to star matching and recognition is feasible.

Key words: star extraction; star matching; Speed-up Robust Feature(SURF) descriptor; Scale Invariant Feature Transformation(SIFT) descriptor

1 引言

星图是以恒星为观测目标所获得的星空图片。相对于地球范围内的观测者而言,恒星可以看作是无穷远的、具有一定光谱特性的点光源。恒星在 CCD 像平面上表现为较暗背景上的点状光斑,光斑直径大小一般为 3~5 pixel^[1]。

传统的星图匹配方法主要分为两步:星点检测和星点匹配。星点检测方法的研究较多,主要通过图像处理(如图像分割、图像形态学操作)获得星点初始位置,然后亚像素定位星点位置,根据亚像素定位方法的不同,主要分为空间曲面拟合法和质心法。空间曲面拟合法主要采用一定的模型作为星点能量扩散函数,相比于质心法,精度高,计算量大。王海涌等人基于高斯规律建立了一个分段函数实现偏差精定位,提出的高斯质心定位方法^[2]具有运算简洁的优点,在某些情况下具有较高的精度,计算速度快。刘太阳等人在分析了过曝光星象及区域分布的基础上,提出了多步变权重复合的通用星点聚心法^[3];孙瑾秋等人分析了影像定位精度的主要因素,提出了一种基于能量累加的空间目标质心定位方法^[4]。李真真等人在亮背景下,提出了基于形态学运算的星点目标质心提取算法^[1]。这些方法精度都达到亚像素,有的甚至达到千分之一像素。星图匹配主要分为多边形角距匹配算法、多边形角度匹配算法和三角形匹配算法^[5]。张磊等人提出的改进的三角形识别算法,提高了三角形识别算法的识别成功率^[6-7];王海涌等人设计了一种以主星与邻星角距为识别特征的星图识别算法,对位置和噪声都有很好的鲁棒性^[8]。刘朝山等人提出了一种适用于星光制导的凸多边形算法,合理减少了匹配的星对角距数目^[9]。目前的星点匹配方法主要利用几何信息实现星点匹配。

星图本质上也是一种图像,但是由于星图缺少

纹理,很难匹配,目前的研究还比较少。在作者所知的范围内,目前仅文献[10]将尺度不变特征变换(SIFT)应用于星云图像匹配,首先检测 SIFT 特征,然后构建 SIFT 描述符进行匹配,所提取特征不具有明确几何意义。文献[10]是从宏观上对星图进行识别,适合于稠密星云的匹配,而本文方法是从微观的角度进行匹配,适合稀疏星点的匹配。

本文的星图匹配是指星点图像的匹配,与传统的星图匹配概念稍有不同。首先检测星点,然后为每个星点构建星点描述符,最后根据描述符进行星点的匹配识别。下面所提到的星图匹配均指星点图像匹配。基于图像的星图匹配研究具有一定意义,通过为导航星建立描述符,与在轨实拍星图的星点建立描述符进行匹配识别,只是现阶段受限于星载计算机的存储和计算能力,这种方法还有待改善,与传统方法相比实时性差。通过星图匹配可以获得不同时刻星图之间的单应矩阵,该单应矩阵反映了不同时刻相机的姿态差别,进而可以用于调整相机姿态,实现对指定空域连续监视;通过星图匹配,完成星图高精度配准,为目标检测跟踪奠定基础。此外通过对星敏感器获取星图的匹配,可以得到星敏感器在不同视点处星空图像之间的基础矩阵,而基础矩阵是基于本质矩阵^[11-12]和 Kruppa 方程^[13]等摄像机自标定方法的基础。摄像机自标定方法是解决星敏感器内外参数标定的一种可行方法。

本文对星空背景图像的匹配进行了研究,将不变特征描述符应用于星点匹配。不变特征匹配方法具有很强的鲁棒性,对于一般的图像平面旋转、尺度和光照变化具有一定不变性。很难想象将这种方法应用到星点匹配上所带来的好处。目前不变特征的匹配方法中典型方法:SIFT 算法^[14]和加速鲁棒特征(SURF)算法^[15],已在目标识别、图像拼接、三维重建等领域获得了广泛应用。该类算法主要由特征检测器和特征描述符两部分构成。SIFT 算法和 SURF 算法特征检测器

所提取特征没有明确的几何意义,不适合星点特征提取(不能提取星点),所提取的 SIFT 的特征和 SURF 特征并不是星点,不能用于星点匹配。但是该类方法的特征描述符具有很好的平面旋转及一定的尺度及光照不变性,能够很好地满足图像匹配的要求。而目前星点检测方法发展很成熟,能够比较容易地检测到星点,各种方法只是精度有所不同。因此理论上可以将星点作为特征点构建描述符,但是局部描述符不能直接应用于星图匹配,后面的实验证明了这一点。因为星点特征的局部邻域为黑色星空,图像灰度几乎不变,局部描述符是很难适应缺少纹理的图像匹配。

本文对如何构建基于星点特征的描述符进行了研究,受现有星点匹配方法的启发,提出了一种大邻域星点描述符。与局部邻域不同,大邻域的边长在几百个像素,而局部邻域边长为几十个像素。大邻域内不仅包含星点本身,还包含其他星点,所构建的描述符是一种星点与其附近星点几何及灰度模式的反映。

2 星点检测及星点描述符

2.1 星点检测

星点检测指采用图像处理的方法提取星点在图像中的位置,本文方法流程如下所示:

第一,对图像进行高斯平滑滤波,突出星点,减弱噪声点影响,高斯滤波模板的大小为 3×3 。

第二,对滤波后的星图进行图像分割,根据式(1),当图像点 (i, j) 灰度低于阈值 T 时,该点灰度取 0 值,否则保持原有灰度不变,这里 T 设为 50 (图像灰度)。

$$f(i, j) = \begin{cases} f(i, j), & f > T \\ 0, & f \leq T \end{cases} \quad (1)$$

第三,在分割后图像上进行星点检测,满足条件 $f(i, j) > T$ 的点为候选特征点,在候选特征点的 1×1 的邻域内,进行非极大值抑制,如果 $f(i, j) = \max_{i-5 \leq i^1 \leq i+5, j-5 \leq j^1 \leq j+5} (f(i^1, j^1))$, 则点 (i, j) 即为星点。一般星点图像的直径在 $3 \sim 5$ pixel,文中 l 取为 20, 20×20 模板可以完全覆盖大部分的星点,该模板可以有效减少在一个星点图像处检测到多个星点的情况,增强检测星点的独特性。

按照上述方法对实拍星图 1 进行星点检测,图 1 所示为北斗七星的实拍星空背景图,检测结

果如图 2 所示,检测出 90% 以上的图像星点,检测星点的数目由图像分割阈值 T 及检测模板边长 l 的决定,减小阈值 T 和检测模板边长 l 可以有效增加检测到星点的数目。但是当阈值 T 和检测模板边长 l 过低时检测到的星点受噪声影响较大,独特性差。



图 1 实拍北斗七星图像

Fig. 1 Real image of big dipper



图 2 检测结果

Fig. 2 Detection result of star points

2.2 构建星点描述符

SURF 和 SIFT 特征描述符具有很好的旋转不变性,但是这些局部描述符不能直接应用于星空背景图像的描述匹配。局部描述符的邻域通常较小,一般描述符在边长约为几十个像素的正方形邻域内计算。例如 SURF 描述符的邻域为 $20s \times 20s$ 的正方形邻域, s 为 SURF 特征点的尺度因子,一般在 $1.6 \sim 6.4$ 之间取值,此时 SURF 描述符的邻域大小为 $32 \times 32 \sim 128 \times 128$, 这样尺寸的邻域对于具有丰富纹理图像的匹配中已经很大,进一步增大邻域尺寸,描述符的匹配性能就会下降。但是对于星点匹配而言,该邻域不够大。由

图 3 可知,小邻域只包含了星点本身或者为数不多的其它星点,而星图通常具有上百,甚至上千的星点,这些星点从局部邻域来看,十分相似,很难有效地区分。星点 A 与星点 B 在小邻域十分相似,很难有效区分,但是从更大的邻域来看二者是不同的,大邻域能够包含较多的星点,这些星点足以形成用于构建星点描述符所需的纹理特征,因此星点描述符的邻域必须是大邻域。

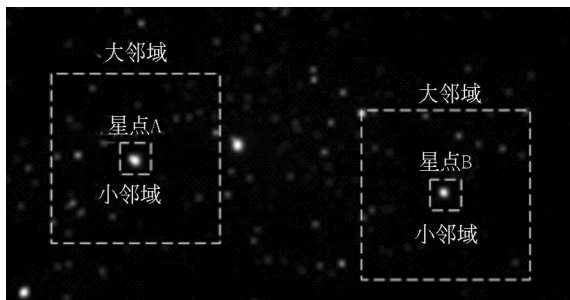
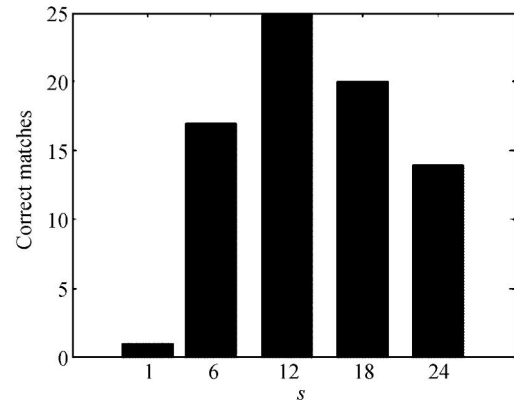


图 3 大邻域与小邻域的区别

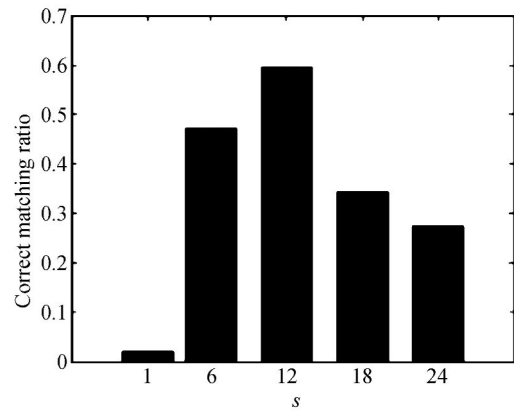
Fig. 3 Difference of large region and local region

本文在构建星点描述符时,适当增大特征点邻域的边长,将 SURF 描述符用于星点描述。在这个邻域内,不应仅仅包含星点本身,还应包含此星点外的其它星点,大邻域描述符本质上是星点灰度分布的位置方向直方图。

将图 1 所示星图旋转 60° , 然后与图 1 进行匹配,不断增大尺度因子 s (星点邻域为 $20s \times 20s$), 正确匹配的星点数目随尺度因子 s 变化的情况如图 4 所示。可以看出当尺度因子为 1 时,只有一个正确匹配对,并且正确匹配率很低,随着尺度因子的增大,正确匹配对数和正确匹配率也不断上升;当尺度因子为 12 时,正确匹配对数和正确匹配率达到极大值。之后尺度因子再增大,正确匹配对数和正确匹配率均逐渐减小。这说明适度增大描述符的邻域可以增强描述符的独特性,但是不能无限增大,过大邻域时描述符的独特性就会随之减弱。可以这样理解,局部描述符之所以对纹理丰富的图像具有较好的性能,是因为从局部来看,其具有丰富独特的纹理特征。因为星图与纹理图像相比具有稀疏的特性,在纹理图像中合适的局部描述符的邻域必须放大,才能够在星图中包含足够的用于匹配的独特的信息。



(a)正确匹配对数
(a)Correct matches



(b)正确匹配率
(b)Correct matching ratio

图 4 尺度因子逐步变化时的匹配结果

Fig. 4 Matching results with different scale factors

一般而言,增大邻域会增加描述符的计算时间,但是 SURF 采用积分图像的概念,极大地加快了描述符的构建时间,使得描述符的构建速度与描述符的尺寸无关。SURF 描述符与 SIFT 描述符相比性能相近^[16],但是由于采用了积分图像的概念,其计算速度比 SIFT 快得多,并且描述符的维数(64 维)为 SIFT 的一半。因此采用 SURF 描述符进行星点描述,星点描述符的邻域虽然增大,但是其计算时间并不会增加,SURF 算法及积分图像的描述详见文献[13]。本文的构建大邻域星点描述符的思路同样适用于 SIFT 描述符,但是采用 SIFT 描述符时,计算速度会很慢。

本文星点描述符构建过程如下所示。

(1)估计星点分布尺度因子 s 。该尺度因子与计算机视觉中尺度空间的概念不同,它反映了

星点分布稀疏程度,反映了星点某个邻域内所包含其它星点的数目。本文用星点之间欧式距离来描述星点分布尺度因子的大小。统计星点与星点之间的在图像上的欧式距离直方图,取直方图下降到峰值 80% 处的欧式距离 d ,以 $s=3 * d$ 作为星点分布尺度因子。通常对于一般宽视场的星图, s 在 15~25 之间取值。

(2) 确定星点主方向,与 SURF 描述符的方法相同。在半径 $6s$ 的邻域内计算主方向,在此圆形邻域内,包含的星点数目约为几十颗。在这个大邻域内的主方向,能够有效地反应该星点与其他星点的分布,是一种方向性描述。

(3) 构建星点描述符,这里采用 SURF 描述符^[15],以星点为特征点,以星点主方向为参考方向,将边长为 $20s$ 的正方形特征区域旋转,与主方向对准,将该区域划分成 4×4 的子区域,在每一个子区域内的沿主方向的水平、垂直方向,计算 Haar 小波响应,分别记做 d_x 和 d_y ,并进行高斯加权,减弱外围噪声点的影响;然后将每个子区域的水平和垂直方向的 Haar 小波响应及其绝对值累加,形成 4 维描述向量 $(\sum d_x, \sum d_y, \sum |d_x|, \sum |d_y|)$,因此对每一特征点,则形成 $4 \times (4 \times 4) = 64$ 维的描述向量,再进行向量的归一化,从而增强对光照变化的鲁棒性。

在大邻域内,远离星点的图像点灰度值一般为 0,其 Haar 小波响应的值也为 0,而在星点附近的图像点其灰度和 Haar 小波响应不为 0,因此在大邻域内必须包含足够多的星点,才能够形成对星点的独特描述。星点描述符以主方向为起点将大邻域内的其它星点灰度信息按其本身的位置、方向进行了分配统计,包含了其他星点的位置和灰度信息。由星点描述符的构建过程可知,虽然该描述符并没有直接利用星点之间的几何分布特征(角度、距离等),但是这种几何分布特征可以由描述符来反映。

3 星点匹配

当完成星点检测并构建星点描述符后,可以采用特征匹配方法中常用的匹配策略剔除误匹配。本文采用文献[17]和文献[18]提出的鲁棒匹配策略剔除错误匹配的星点。采用该方法主要是

为了说明本文为每个星点建立描述符的方法可以有效地描述星点。

该方法首先采用最邻近匹配策略,剔除明显的误匹配。为尽可能多地保留正确匹配的对数,初始匹配阈值为 0.8,得到初始匹配集合。然后根据星点特征的主方向差的统计直方图进一步剔除误匹配星点。最后取匹配阈值最小的 8 个匹配对,采用直接线性变换法计算单应矩阵,用该矩阵对初始匹配集合中的所有特征变换到参考图像,如果特征点的变换坐标与实际坐标之间的距离值小于 $k\sigma$ 时,认为是正确匹配对,将该点保留;否则,将该点剔除。得到正确的匹配对集合。

4 实验结果

为了验证本文星点匹配方法的可行性,进行星图匹配实验,分为仿真实验和实拍图像实验。

4.1 仿真实验

仿真实验中所选图片均为实拍星图^[19],如图 5 所示。图(a)为天鹅座疏散星团(M29),大小为 576×864 ,图(b)为双子座的疏散星团(M35),大小为 600×800 ,图(c)为长蛇座的疏散星团(M48),大小为 624×900 ,图(d)为麒麟座的疏散星团(M50),大小为 600×900 。疏散星团指由数百颗甚至上千颗由较弱引力联系的恒星组成的天体。图 5(a)~(d)所示星图的星点致密程度逐渐增加,具有一定代表性。

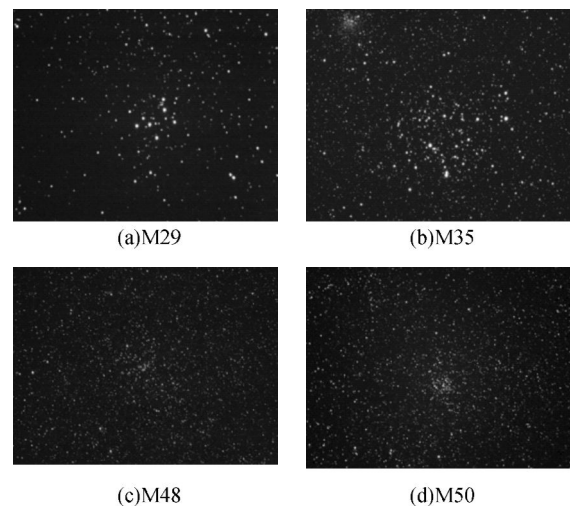


图 5 实拍星空背景图片

Fig. 5 Real stellar images

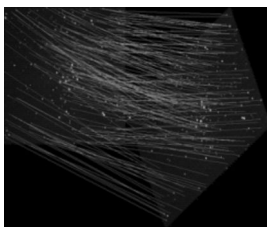
实验方法:通过对图 5 所示的实拍星图分别旋转 30, 60, 90 及 180°后与原图进行匹配,采用本文匹配策略剔除误匹配,并计算匹配图像对之间的透视投影变换矩阵。因为星图相似性极强,很难通过人工判读检验匹配星对是否为正确对应星点。将原图像星点根据计算得到的变换矩阵 M 进行变换,比较变换后星点与旋转后图像的星点位置的差别,以欧式距离作为度量,距离越小说明变换矩阵估计的精度越高。

四幅图片及其旋转后的图片检测到的星点数目如表 1 所示,星点数目与图像本身的星点分布疏密程度有关,同时也与星点检测时的图像分割阈值及在进行非极大值抑制时的模板大小及阈值有关,表 1 的实验结果是在本文给定的条件下取得的。

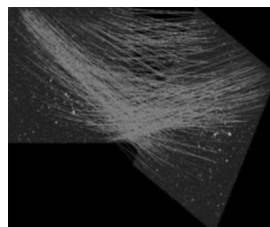
表 1 根据本文方法检测到的星点数目

Tab. 1 Extracted star features by proposed method

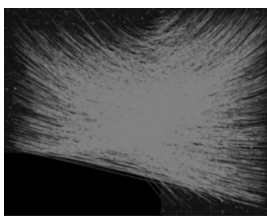
星点数目	原图	30°	60°	90°	180°
M29	1183	1208	1207	1230	1209
M35	2633	2797	2790	2741	2709
M48	3180	3222	3257	3159	3170
M50	2921	2940	2973	2911	2902



(a)M29旋转30°后的星点匹配结果
(a)Matching results when M29 rotated 30°



(b)M35旋转60°后的星点匹配结果
(b)Matching results when M35 rotated 60°



(c)M48旋转90°后的星点匹配结果
(c)Matching results when M48 rotated 90°



(d)M50旋转180°后的星点匹配结果
(d)Matching results when M50 rotated 180°

图 6 部分星图匹配结果

Fig. 6 Simulated image matching results

图 6 所示为本文方法的部分匹配结果,详细实验结果见表 2。表 2 所示匹配对数为本文方法剔除误匹配后的结果,所选测试图片的星点匹配对数都很高。

表 2 本文方法匹配实验结果

Tab. 2 Matching results by proposed method

匹配数目	30°	60°	90°	180°
M29	176	147	222	274
M35	255	245	417	458
M48	275	293	481	524
M50	238	247	457	499

表 3 所示为误差小于 1.5/1 pixel 的匹配对数目。对比表 2 和表 3 的实验结果可知,94.88% 以上匹配对的误差小于 1.5 pixel,82.95% 以上的匹配对的误差小于 1 pixel,表明大邻域的 SURF 描述符能够描述星点特征,用来进行星图的匹配识别。

表 3 误差小于 1.5/1 pixel 的对数

Tab. 3 Matches with error less than 1.5/1 pixel

匹配数目	30°	60°	90°	180°
M29	170/146	141/129	215/211	269/256
M35	242/220	242/226	405/385	456/426
M48	273/242	278/250	481/471	524/511
M50	238/221	244/231	457/444	499/490

表 4 所示为将原图进行变换后与待匹配图像的匹配星点之间的误差均值。所有匹配图像的误差均值均小于 1 pixel,最大误差为 0.774 1 pixel,最小误差为 0.054 0 pixel。误差均值在 30°和 60°时较大,在 90°和 180°时较小。在 30~60°匹配对数少和精度差是因为特征描述符主方向存在一定的定位误差,该定位误差与 30~60°的旋转角度接近。此外本文星点提取算法没有精确到亚像素,剔除该定位误差因素后,误差均值将进一步减少,可知本文的 M 矩阵估精度是很高的。

表 4 本文方法误差

Tab. 4 Errors by proposed method

error	30°	60°	90°	180°
M29	0.530 8	0.579 4	0.208 2	0.183 6
M35	0.774 1	0.573 0	0.329 6	0.182 3
M48	0.599 0	0.613 7	0.054 0	0.114 2
M50	0.524 4	0.597 4	0.078 0	0.0841

由于误匹配的存在,使得误差最大值有的甚至达到了 1.5 pixel 以上,但是由前面分析可知,94.88%以上匹配对的误差小于1.5 pixel,如果以 1.5 pixel 为判别阈值,则本文方法提取的正确匹配星点对数在 94%以上。

4.2 实拍图像实验

实拍星图如图 7 所示,其中图(a)和图(b)为对应星图,图(c)和图(d)为对应星图,两对匹配星图存在一定的旋转及平移变化,为分别在两个不同的时刻对不同空域进行拍摄的星空背景图像,图像大小为 2 048×2 048,曝光时间大于 1 s。由于曝光时间长,因此由星图可知,星点并不是斑状分布,而是长条形分布,但是用本文星点检测方法同样可以进行星点检测,只是精度有所降低。

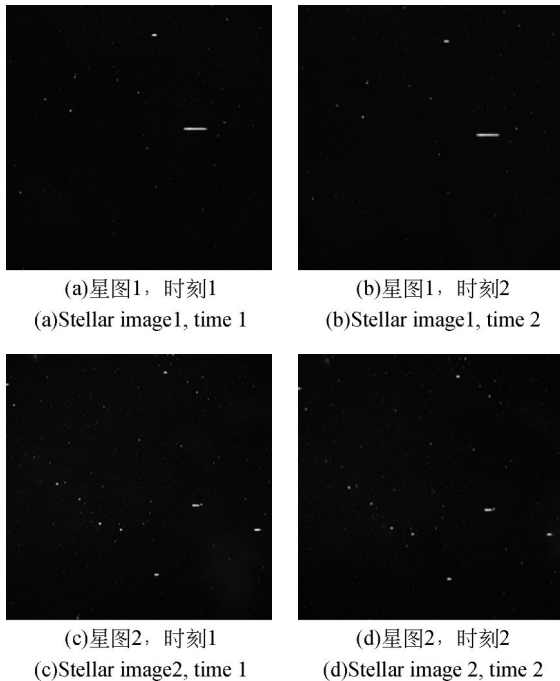


图 7 实拍星图

Fig. 7 Real stellar images

8 为星图 1 的匹配结果,最终匹配星点数目为 85,误差均值为 1.482 5;图(b)为星图 2 的匹配结果,最终匹配星点数目为 154,误差均值为 1.466 4。

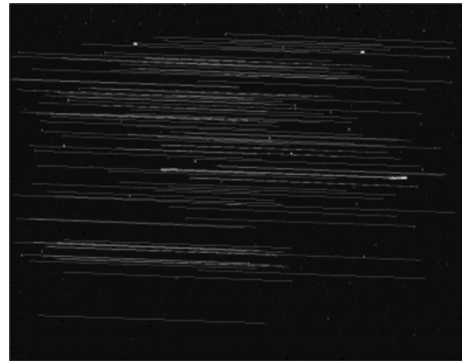


图 8 星图 1 的星点匹配结果

Fig. 8 Matching results of stellar image pair 1

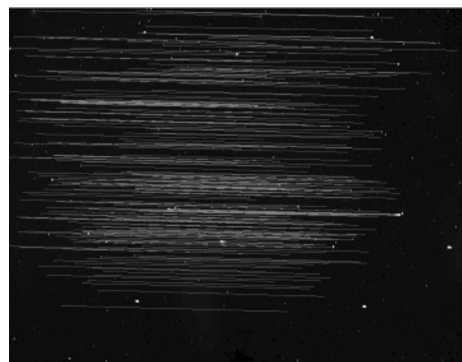


图 9 星图 2 的星点匹配结果

Fig. 9 Matching results of stellar image pair 2

实拍星图匹配星点误差较大主要是因为实拍星图曝光时间长,引起星点不是呈光斑状分布,而是长条形分布,导致星点检测精度较低,但是实拍星图的误差均值仍小于 1.5 pixel,剔除该因素后可知本文星点匹配的精度可以进一步提高。

以上结果说明,本文算法具有很强的鲁棒性,在测试星图在图像存在较大旋转的情况下,也能够提取足够多的匹配星点,同时由仿真实验和实拍图像实验的匹配星点误差均值可知,本文匹配策略能够有效地剔除错误星点。

5 结 论

本文提出了一种鲁棒的星点检测及旋转不变星点匹配方法,获得了很好的效果。仿真实验和实拍图片的实验结果表明该方法能够鲁棒地提取

实拍星图匹配结果如图 8、图 9 所示,其中图

星点,在仿真图像存在较大平面旋转的情况下,能够鲁棒地完成星图匹配,94.88%以上的匹配星点的误差在 1.5 pixel 以下,由该方法提取的匹配星点估计的变换矩阵的精度在 1 pixel 以下,在实拍星图存在一定平移及旋转变化的情况下,匹配星点的误差均值仍小于 1.5 pixel,表明本文基于不变特征描述符的星点匹配方法能够有效地实现星点匹配。本文为星图匹配提供了一套完整的算法流程,该方法可以直接运用于恒星跟踪。创新点在于提出检测星点特征,将 SURF 和 SIFT 类特

征描述符应用于星点特征的描述和匹配,提出了大邻域星点描述符的概念,解决了特征描述符很难应用于星空背景匹配的难题,实现了旋转不变的星图匹配,为后续基于特征描述符的星点匹配识别算法研究提供了一套可行的思路。与文献[10]的方法相比,本文方法能够用于稀疏星点的匹配识别,而文献[10]的方法是作为稠密的星云匹配识别,二者是不同的。不足之处在于星点检测方法的精度不高,没有精度到亚像素,下一步研究重点将针对星点亚像素定位方法。

参考文献:

- [1] 李真真,魏宏刚. 亮背景下形态学星点目标提取算法[J]. 光电工程, 2011, 38(12): 23-27.
LI ZH ZH, WEI H G. The algorithm of star extraction based on mathematical morphology in the bright-background [J]. 2011, 38(12): 23-27. (in Chinese)
- [2] 王海涌,费峥红,王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1672-1677.
WANG H Y, FEI ZH H, WANG X L. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1672-1677. (in Chinese)
- [3] 刘太阳,王仕成,刘志国. 多步变权重复合的通用星点聚心[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2494-2499.
LIU T Y, WANG SH CH, LIU ZH G. Universal star centroiding with stepping variant weighting integration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2494-2499. (in Chinese)
- [4] 孙瑾秋,周军. 基于能量累加的空间目标星像质心定位[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 3043-3048.
SUN J Q, ZHOU J. Centroid location for space targets based on energy accumulation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 3043-3048. (in Chinese)
- [5] 海峰,袁家虎,毛羽国. 快速星图匹配算法的研究[J]. 光电工程, 1998, 25(6): 70-74.
HAI F, YUAN J H, MAO Y G. Research on rapid star map matching algorithm [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, 25(6): 70-74. (in Chinese)
- [6] 张磊,魏忠慧,等. 快速全天自主星图识别[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4): 909-915.
ZHANG L, WEI ZHONG H, *et al.*. Fast all-sky autonomous star identification [J]. *Opt. Electronic Eng.*, 2009, 17(4): 909-915. (in Chinese)
- [7] 张磊,何昕,等. 三角形星图识别算法的改进[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 458-463.
ZHANG L, HE X, *et al.*. Modification of triangle identification algorithm [J]. *Opt. Electronic Eng.*, 2010, 18(2): 458-463. (in Chinese)
- [8] 王海涌,费峥红,张超. 改进的基于主星的星图识别算法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 220-224.
WANG H Y, FEI H, ZHANG CH. An improved star pattern identification algorithm based on main star [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 220-224. (in Chinese)
- [9] 刘朝山,马瑞萍. 星图匹配制导中的关键技术[J]. 宇航学报, 2006, 27(1): 31-35.
LIU CH SH, MAR R P. Star pattern matching for celestial guidance [J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(1): 31-35. (in Chinese)
- [10] JAVIER R, PATRICIO L, PABLO Z. Applying SIFT Descriptors to Stellar Image Matching [C]. CIARP 2008, LNCS 5197, 2008: 618-625.
- [11] LIU R, ZHANG H. Stereo cameras self-calibration based on SIFT [C]. *Proc of International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. 2009: 352-355.
- [12] 江泽涛,吴文欢. 基于本质矩阵的摄像机自标定方法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(4): 565-569.
JIANG Z T, WU W H. An essential matrix-based camera self-calibration method [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2010, 15(4): 565-569. (in Chinese)

- Chinese)
- [13] 雷成,胡占义.一种新的基于 Kruppa 方程的摄像机自标定方法[J].计算机学报,2003,26(5):587-597.
- LEI CH, HU ZH Y, *et al.*. A novel camera self-calibration technique based on the Kruppa equations[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2003, 26(5): 587-597. (in Chinese)
- [14] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004:91-110.
- [15] HERBERT B, ANDREAS E, TINNE T, *et al.*. Speeded up robust features [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008,110(3):346-359.
- [16] LUO J, OUBONG G. A comparison of SIFT, PCA-SIFT, and SURF [J]. *International Journal of Image Processing (IJIP)*, 2009, 3(4): 143-152.
- [17] ZHAI Y, ZENG L. A SIFT matching algorithm based on adaptive contrast threshold [C]. *Proceedings of 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks*, 2011: 1934-1937.
- [18] 曾 峦,翟优. 基于透视投影模型的 SIFT 匹配方法 [C]. *Proceedings of The 3rd International Conference on Computational Intelligence and Industrial Application*, 2010:272-276.
- [19] <http://www.astronomyphotos.com/index.htm>[OL].

作者简介:



翟 优(1986—),男,河北正定人,博士研究生,2009 年于北京航空航天大学获得工学学士学位,2012 年于中国人民解放军装备学院获得理学硕士学位,主要从事图像处理及计算机视觉方向的研究。E-mail: youyou1952@sina.com



曾 峦(1963—),男,广东梅县人,教授,博士生导师,1983 年于国防科技大学获得工学学士学位,2007 年和 2012 年于哈尔滨工业大学分别获得工学硕士和博士学位,主要从事图像处理及光电测量方向的研究。E-mail: zengluan@sina.com

导师简介:



熊 伟(1971—),男,新疆库尔勒人,研究员,博士生导师,1992 年于国防科技大学获得工学学士学位,1998 年和 2005 年于中国人民解放军装备学院分别获得工学硕士和博士学位,主要从事信息系统设计及系统集成方向的研究。E-mail: 13331094335@189.cn