

文章编号 1004-924X(2011)10-2472-06

改进的抗全仿射尺度不变特征变换图像匹配算法

贺柏根^{1,2}, 朱明^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对现有匹配算法难以解决图像发生仿射变换特别是发生大视角变换时的有效匹配问题, 本文对匹配稳定性较好的尺度不变特征变换(SIFT)算法进行了深入研究和改进。借鉴其模拟和归一化相结合的思想对相机光轴的经度角和纬度角进行模拟并采用 SIFT 算法进行匹配。结果显示, 提出的算法不仅保留了 SIFT 原有的对仿射变换的抵抗能力, 而且对视角变换也有很好的鲁棒性, 实现了完全的抗仿射变换。实验结果表明, 与传统的 SIFT 算法相比, 本文算法对仿射变换尤其是有大视角改变时有更好的适应性。

关键词:图像处理; 尺度不变特征变换算法; 特征匹配; 仿射不变量

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111910.2472

Improved fully affine invariant SIFT-based image matching algorithm

HE Bai-gen^{1,2}, ZHU Ming^{1*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

** Corresponding author, E-mail: zhu_mingca@163.com*

Abstract: In image matching process, the affine transformation is difficult to avoid. In exiting algorithms, Scale Invariant Feature Transform(SIFT) has strong resistance to changes of scale, rotation, translation and illumination changes generated by affine transformation. However, when an image has a view angle change, especially large change, the SIFT is not satisfactory. This paper researches the principle of the SIFT and improves its matching function. The latitude and longitude of camera axis are simulated firstly, and then the images are matched by using the improved SIFT algorithm. Experiments show that the algorithm not only retains the original advantages of the SIFT algorithm, but also been robust to changes of the angle. It has achieved a complete anti-affine transformation. In conclusions, the proposed algorithm is more suitable to affine transformation, especially large angle changes, as compared with SIFT algorithm.

Key words: image processing; Scale Invariant Feature Transform(SIFT) algorithm; feature matcing; affine invariant

1 引言

图像匹配的目的是为两幅不同图像中的相似目标物建立对应关系,这是图像配准、三维重建、目标跟踪和自动定位等图像处理的基本步骤^[1]。通常,所要匹配的图像由不同视点拍摄而来。这样就带来了目标图像外观上的变形。所以,匹配建立的对应关系必须能够抵抗这些变化。

传统的基于特征点的图像匹配算法主要由两部分组成:特征点检测和描述。这些算法首先检测感兴趣的特征点和他们周围的特定区域,然后为这些区域建立一个相应的变量描述。匹配就是要为两幅图中相应特征区域的变量描述建立对应关系。所以两幅匹配图的特征点及其描述越相似越好。近些年来,涌现了很多基于特征点的图像匹配技术,主要有 Harris 角点检测、Harris-Laplace、Hessian-Laplace、different-of-Gaussian (DoG)、Harris-affine、Hessian-affine、(Maximally Stable Extremely Region, MSER) 和 (Level Line Descriptor, LLD)。这些算法中 MSER 被证明是对仿射变换抵抗力最好的,其次是 Hessian-affine 和 Harris-affine 两种^[2,4-8]。直到 2004 年,哥伦比亚大学的 David Lowe 提出了一种新的特征点提取算法尺度不变特征变换 (Scale Invariant Feature Transform, SIFT) 算法,使基于特征点的图像匹配技术有了革命性的改进。SIFT 算法采用 DoG 算法原理进行特征点检测,保证了特征点对旋转、平移和缩放的不变性;对特征点的描述则是基于梯度方向分配的原则进行,这样又很好地解决了光照和视角变化的影响^[1]。实践证明,SIFT 算法在稳定性上要优于前面任何算法^[1]。但是正如 David Lowe 在其文章中指出的,没有一种算法对仿射变换是绝对不变的^[3]。实验证明,当两幅图像视角变换特别大时,SIFT 算法就显得无能为力。

针对上述问题,本文进一步研究了 SIFT 算法,并对其进行了改进,对相机光轴的经角度和纬角度进行模拟并采用 SIFT 算法进行匹配,结果显示改进的算法对仿射变换尤其是大视角改变有

很好的适应性。

2 仿射变换形成的空间模型

如图 1 所示,侧墙、地板和顶棚各自作为整体来看,都由矩形变成了梯形,这是图像生成过程中发生了投影变换所致。但就单个墙面瓷砖来看,这些矩形则是变成了平行四边形,这是图像的仿射变换所致。



图 1 仿射变换示意图

Fig. 1 Diagram of affine transformation

基于特征点的图像匹配以区域内特征点为研究对象,主要研究图像局部,所以在此主要考虑图像的仿射变换。视角改变导致的图像仿射变换模型可由下式表示:

$$u(x, y) \rightarrow u(ax + by + e, cx + dy + f), \quad (1)$$

其中变换矩阵 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ 是一个正定矩阵。此矩阵可以做下式分解:

$$\mathbf{A} = \lambda \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad (2)$$

不妨将 \mathbf{A} 写为 $\mathbf{A} = \lambda \mathbf{R}(\phi) \mathbf{T}_t \mathbf{R}(\phi)$, 其中 $\lambda > 0$, λt 是矩阵 \mathbf{A} 的行列式值, $\phi \in [0, 180^\circ)$, $\mathbf{R}(\phi)$ 表征相机的旋转角度 ϕ 。在此将 \mathbf{T}_t 定义为斜率。这些参数的物理意义如图 2 所示, 其中 ϕ 和 $\theta = \arccos 1/t$ 是相机的视角变化形成的, ϕ 是相机旋转形成的。在这个仿射模型中假设相机在距离被测物体的无穷远处。从正对面开始, 相机的移动会使被测物体的成像产生变形。被测物法平面与相机光轴映射平面间产生角度 ϕ 将其定义为经度角。被

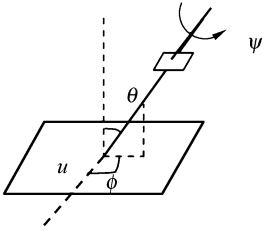


图 2 仿射变换分解图

Fig. 2 Exploded image of affine transformation

测物平面 u 的法线与光轴之间产生角度 θ 将其定义为纬度角。其中斜率参数 $t \geq 1$ 是由 $t \cos \theta = 1$ 得出。相机可绕其光轴进行旋转并产生旋转角度 ϕ 。相机相对物体前后运动可使成像放大倍数 λ 发生改变。总之,相机的移动导致了成像参数从正视角 $\lambda_0 = 1, t_0 = 1, \phi_0 = \phi_0 = 0$ 到斜视角 λ, t, ϕ, ψ 的如式(1)所示 $u(x, y) \rightarrow u(A(x, y))$ 的改变。

3 转换斜率

式(1)定义的斜率是相机视角从正视到斜视所形成的变形率,我们将其称为绝对斜率。然而,实际的图像匹配往往是在两个斜视角成像 $u_1(x, y) = u(A(x, y))$ 和 $u_2(x, y) = u(B(x, y))$ 间进行。两个斜视角度的成像 $u_1(x, y) = u(A(x, y))$ 和 $u_2(x, y) = u(B(x, y))$ 之间的转换关系可由式(1)变换得 $u_2(x, y) = BA^{-1}u_1(x, y)$ 。在此,我们定义两幅斜视角成像间的斜率变化 $T(u_1, u_2)$ 为相对斜率,两者间的旋转角变换 $\phi(u_1, u_2)$ 为相对旋转角。

图 3 所示是不同视角仿射成像示意图,从中可以看到绝对斜率和相对斜率之间的差异所在。两个绝对斜率分别为 t 和 t' 的正交角度即 $\phi = \phi' + \pi/2$ 所成的像 u_1, u_2 之间的相对斜率为 $T = tt'$ 。由此可以看出,两个绝对斜率可以产生一个较大的相对斜率。现实中绝对斜率很容易便可达到 6 甚至是 8,所以相对斜率达到 36、64 甚至更多也就不足为奇了。

在人脸识别、电视制导等需进行图像匹配算法研究的场景中,对算法考察点之一就是算法抗视角变化鲁棒性。也就是说考察算法对两幅图像成功匹配所能容忍的最大相对斜率变化 T_{\max} 。实验证明,SIFT 工作最大相对斜率变化 $T_{\max} \approx 2$, Harris-Affine 和 Hessian-Affine 最高可达到约

2.5。MSER 则可达到 5 到 10 之间。但是,后几种算法并未考虑图像尺度的变化,当图像尺度发生较大尺度变化时这些算法将失效。而 SIFT 算法却有很好的抗尺度变化能力。

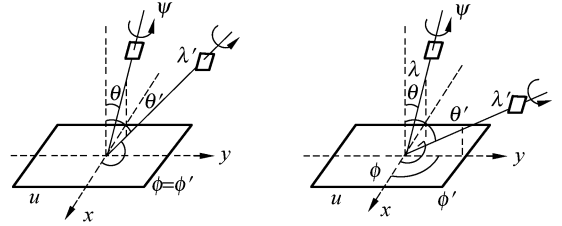


图 3 斜率区分图

Fig. 3 Diagram of distinguish between the slopes

4 算法改进及实现步骤

SIFT 算法最大成功在于其将模拟和归一化相结合的主题思想。我们知道一幅图片尺度变化应用归一化是不可能实现的,所以 SIFT 采取了对旋转和平移进行归一化,尺度变化进行模拟相结合的思想,很好地解决了仿射变换对图像匹配的影响。我们借鉴 SIFT 算法的这一成功思想对其进行改进,对视角变换形成的经度角和纬度角进行模拟,如图 4 所示。再采用 SIFT 算法进行匹配,这样既保留了 SIFT 算法的优越性,又克服了视角变换。算法实现主要步骤如下:

(1) 对每帧图像采用线性变形了模拟由于相机旋转所造成的扭曲变形。对这一变形的影响因素主要是经度 ϕ 和纬度 θ 。其中纬度 θ 在公式(2)中通过参数 $t = \left| \frac{1}{\cos \theta} \right|$ 来体现。对于数字图像来说,参数 t 的模拟是通过 t 抽样来实现的,抽样后需要进行滤波处理。本算法采用了标准差为 $c\sqrt{t^2 - 1}$ (其中 $c = 0.8$) 的高斯滤波函数来进行。

(2) 本算法对旋转和斜率值采样一定数量的经度值和纬度值来表示,所以采样时应确保其对其他值的鲁棒性。

(3) 采用适当的抗尺度、旋转和平移变化的算法对所有模拟出来的图像进行匹配。由于 SIFT 算法具有其突出的优点,本算法采用 SIFT 来进行匹配。

(4) 模拟纬度值 θ 所对应的斜率 t 的采样值可以是 $t=1, a, a^2, \dots, a^n$, 其中 $a > 1$ 。多次实验证明, 当取 $a = \sqrt{2}$ 比较合适。指数 n 最大可取到 5 以上。这样斜率取值范围可达到 1 到 32 甚至更大。

(5) 与斜率 t 采样值相对应, 经度 ϕ 也用一组采样数据 $0, b/t, \dots, kb/t$ 其中取 $b = 72^\circ$ 比较合适。整数 k 的取值要确保满足 $kb/t < 180^\circ$ 。

(6) 计算复杂度: 在对图像经度和纬度模拟的过程中, 主要是对 t 进行采样并针对每个采样图进行匹配。所以此算法的复杂度正比于 t 的采样数量。同时, 我们采用 SIFT 算法来进行匹配, 而 SIFT 算法计算时间正比于匹配图像的大小。所以, 本算法的简化可从采样数量和 SIFT 匹配算法两个方面进行。

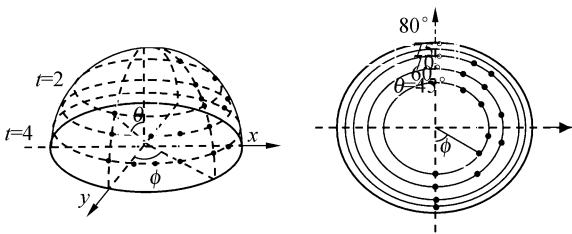
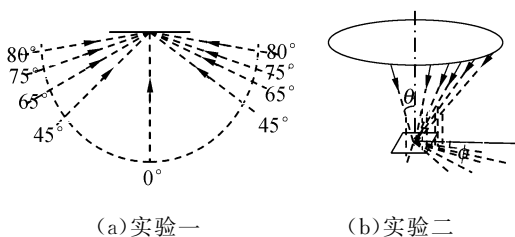


图 4 算法模型示意图

Fig. 4 Algorithm model diagram

5 实验及其结果

David Lowe 在文献[3]中已经做了阐述和论证, SIFT 算法在抗仿射和稳定性方面要优于其他诸如 Harris 等基于特征点的匹配算法。本文算法实验将与 SIFT 算法来进行比较。实验采用标准 Mikolajczyk 库中的资料图片进行。实验如图 5 所示分两部分, 实验一原理如图 5(a) 所示, 检测



(a) 实验一

(b) 实验二

(a) Experiment I

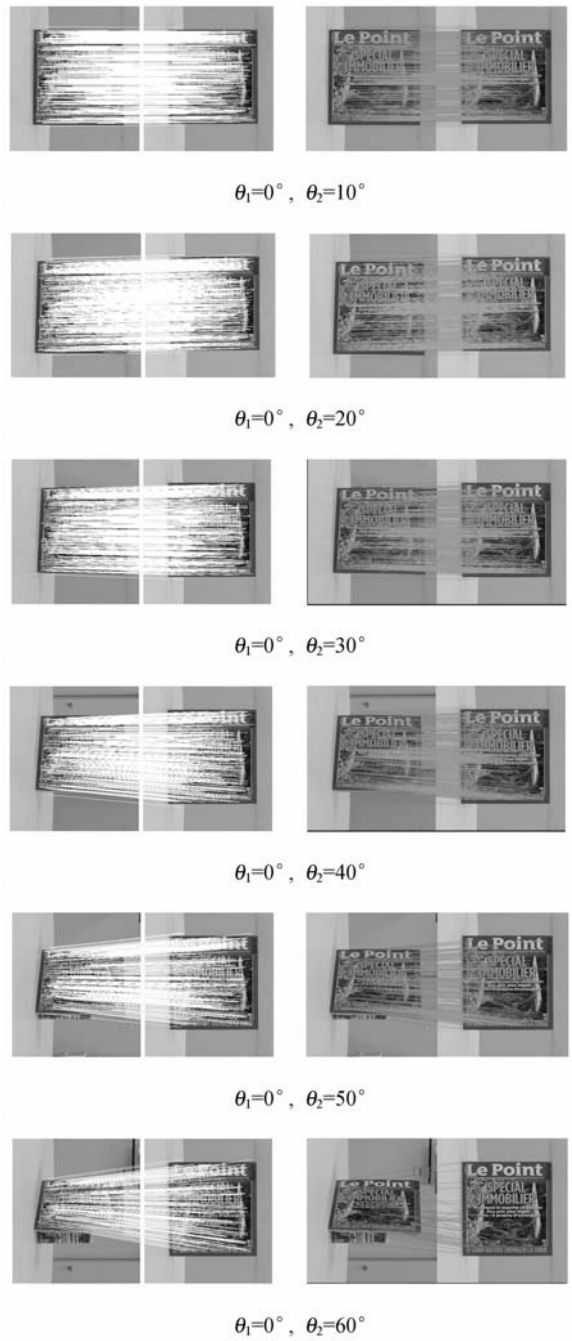
(b) Experiment II

图 5 实验过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental procedure

算法对绝对斜率的鲁棒性取经度角 $\phi_1 = \phi_2 = 0^\circ$, 纬度角目标图像取 $\theta_1 = 0^\circ$, 源图像 θ_2 从 10 度到 80 度变换; 实验二原理如图 5(b) 所示, 检测算法对相对斜率的鲁棒性取绝对斜率 $t_1 = t_2 = 4$, 目标图像经度角 $\phi_1 = 0^\circ$, 源图像 ϕ_2 取 10 到 90 度进行实验。

实验一结果如图 6 所示: 左侧对应点用白线连接的是本文改进算法匹配结果图, 右侧用黑线连接对应点的是 SIFT 匹配结果。



$\theta_1=0^\circ, \theta_2=10^\circ$

$\theta_1=0^\circ, \theta_2=20^\circ$

$\theta_1=0^\circ, \theta_2=30^\circ$

$\theta_1=0^\circ, \theta_2=40^\circ$

$\theta_1=0^\circ, \theta_2=50^\circ$

$\theta_1=0^\circ, \theta_2=60^\circ$

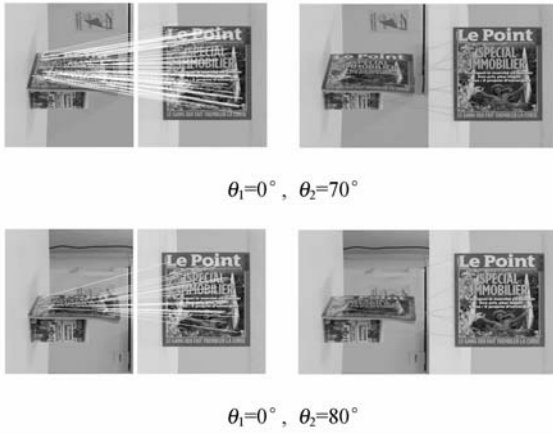


图 6 实验一结果图

Fig. 6 Result images of experiment I

由图 6 可以看出,当纬度角 $\theta < 50^\circ$ 本文算法和 SIFT 算法都很好地完成了匹配,但当 θ 继续增大时,本文所提算法的优越性就显得特别突出了,当绝对斜率角度大于 60° 时, SIFT 算法基本失效,而本文算法却依旧稳定,甚至绝对斜率角度达到 80° 时仍能很好地匹配。其正确匹配结果见表 1。

表 1 实验一结果对比

Tab. 1 Result comparison of experiment I

θ_2/t	SIFT	本文算法
$50^\circ/1.6$	253	428
$60^\circ/2.0$	16	265
$70^\circ/2.9$	1	192
$80^\circ/5.8$	0	103

实验二源图像经度角 ϕ_2 从 10° 到 90° 变换,实验结果如图 7 所示。同样,白色连线的为本文算法匹配结果,黑线连线的为 SIFT 算法匹配过程。

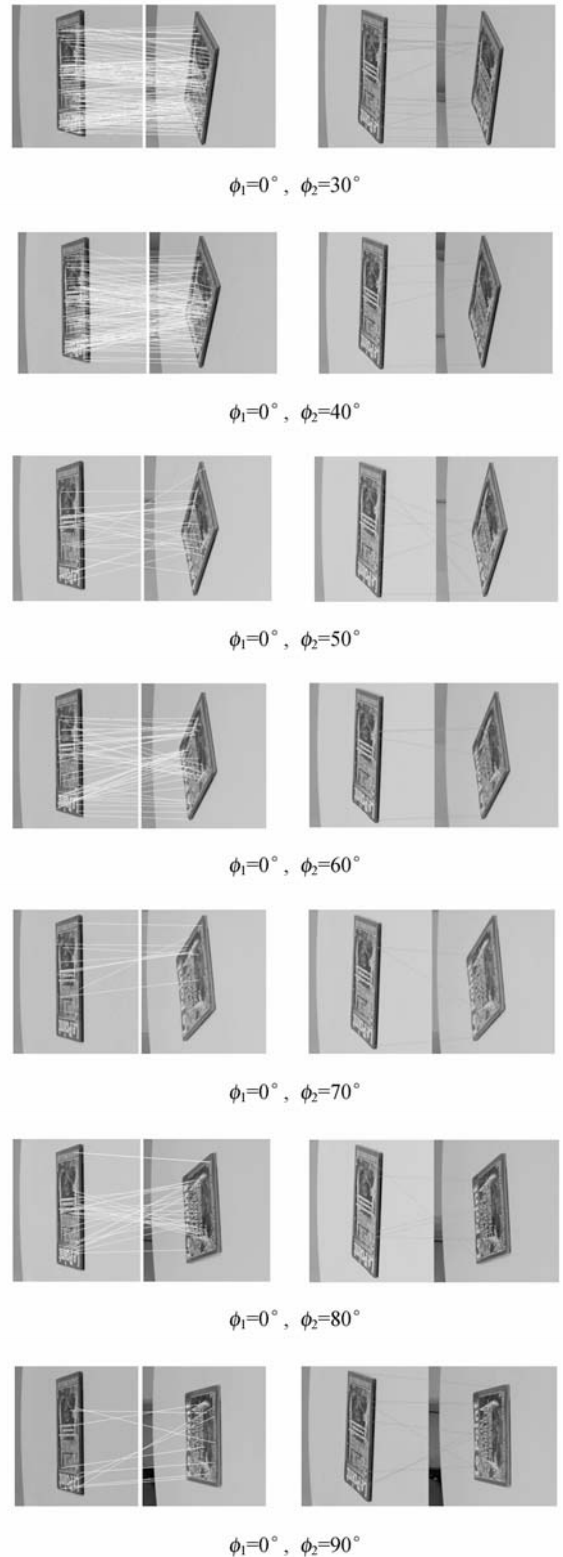
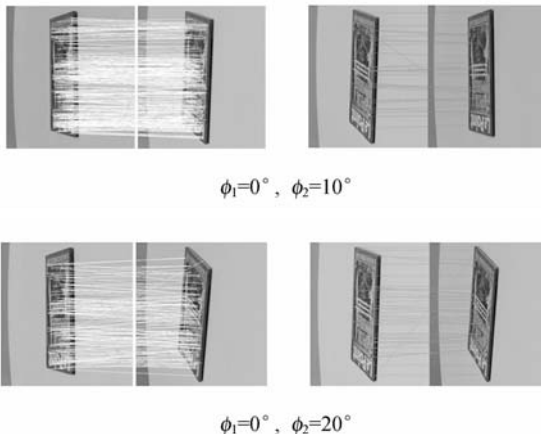


图 7 实验二结果图

Fig. 7 Result images of experiment II

实验结果可以看出,当图像存在较大纬度角时,本文算法优越性更为明显。如图 7 所示,当纬度角

大于 40° 时, SIFT 算法基本失效, 而本文算法抵抗效果可达 90° , 实验二中正确匹配点对数如表 2 所示。

表 2 实验二实验结果对比

Tab. 2 Result comparison of experiment II

ϕ_2/T	SIFT	本文算法
$10^\circ/1.9$	319	1148
$20^\circ/3.3$	45	580
$30^\circ/5.3$	10	492
$40^\circ/7.7$	2	528
$50^\circ/10.2$	4	88
$60^\circ/12.4$	1	204
$70^\circ/14.3$	1	36
$80^\circ/15.6$	0	96
$90^\circ/16$	0	20

参考文献:

- [1] FAUGERAS O. *Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint* [M]. Boston: MIT Press, 1993.
- [2] MIKOLAJCZYK K, TUYTELAARS T, SCHMID C, et al.. A comparison of affine region detectors [J]. *Int. J. Comput. Vis.*, 2005, 65: 43-72.
- [3] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant key points [J]. *IJCV*, 2004, 60 (2): 91-110.
- [4] MOREL J M, YU G. ASIFT: A new framework for fully affine invariant image comparison [J]. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2009, 2(2): 438-468.
- [5] FAN Q, BARNARD K, AMIR A, et al.. Matching slides to presentation videos using SIFT and scene background matching [C]. *Proceedings of the 8th ACM International Workshop on Multimedia Information Retrieval*, 2006: 239-248.

作者简介:



贺柏根(1983—),男,山西平遥人,博士研究生,2007年于吉林大学获得学士学位,主要从事模式识别、景象匹配、视频跟踪方面的研究。E-mail: hebaigen@sohu.com

6 结 论

本文针对图像发生仿射变换特别是发生较大视角变化时,现有图像匹配算法难以进行有效匹配的问题,对 SIFT 算法进行深入研究。借鉴该算法模拟和归一化相结合的思想对视角变化产生的相机光轴经度角和纬度角进行模拟,并采用 SIFT 算法进行匹配。实验证明,当图像相对斜率大于 2.5 时, SIFT 算法将失效,但本文所提算法对图像相对斜率的抵抗可以达到 36 甚至更多,可以看出本文所提算法对图像的仿射变换有更强的抵抗能力。

- [6] KIM J, SEITZ S, AGRAWALA M. Video-based document tracking: Unifying your physical and electronic desktops [C]. *Proceedings of the 17th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2004: 99-107.
 - [7] VACCHETTI L, LEPETIT V, FUA P. Stable real-time 3D tracking using online and offline information [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2004, 26: 1385-1391.
 - [8] BAY H, TUYTELAARS T, VAN GOOL L. Surf: Speeded up robust features [C]. *Computer Vision-ECCV 2006, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg*, 2006: 404-417.
 - [9] 纪华, 吴元昊, 孙宏海, 等. 结合全局信息的 SIFT 特征匹配算法 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17 (2): 439-444.
- JI H, WU Y H, SUN H H, et al.. SIFT feature matching algorithm with global information [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17 (2): 439-444. (in Chinese)

导师简介:



朱明(1964—),男,江西南昌人,研究员,博士生导师,1985年于南京航空航天大学获得学士学位,1991年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事从事视频图像处理、自动目标识别技术及成像目标跟踪方面的研究。E-mail: zhu_mingca@163.com