

DOI: 10.13203/j.whugis20130151

文章编号: 1671-8860(2014)07-0867-06

# 基于彩色信息尺度不变特征的街景影像匹配

何培培<sup>1</sup> 万幼川<sup>1</sup> 高贤君<sup>1</sup> 秦家鑫<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 武汉大学遥感信息工程学院, 湖北 武汉, 430079

**摘要:** 提出了一种基于彩色信息的尺度不变特征匹配算法以实现彩色图像间的特征匹配。引入对光照变化具有一定鲁棒性的对角偏移模型, 通过模型变换求出图像各位置的彩色不变量, 并以此作为输入图像, 再采用改进的 Harris 算法提取图像的几何信息, 建立一种具有几何和颜色不变性的特征向量, 最后利用特征向量间的相关系数完成匹配。本文将该算法用于街景影像匹配中, 并对比与传统 SIFT 算法的差异, 结果表明此算法不但能够得到分布均匀密集度高的匹配点, 且耗时少, 匹配精度高, 证明了对于街景影像匹配研究的适用性。

**关键词:** 彩色不变量; 尺度不变性; 特征提取; 图像匹配; 街景影像

中图法分类号: P237.3; P234.1 文献标志码: A

随着计算机技术的迅速发展, 图像匹配技术也在不断完善, 它是立体视觉算法中最重要和最困难的部分, 也是近年来数字图像处理与计算机视觉领域关注的研究热点和前沿方向<sup>[1-2]</sup>。基于特征的匹配是目前匹配算法研究中的主流方法, 其首要任务是提取稳定的特征并对其进行描述, 因此, 尺度不变的特征点提取算法及其应用成为了图像处理领域研究中的一个热点<sup>[3-5]</sup>。

尺度空间(scale space)思想最早由 Iijima 于 1962 年提出, 后来许多学者在此基础上的研究工作使得此方法得到应用和发展。目前, 最具有代表性的尺度不变特征提取与匹配方法是 Harris-Laplacian 算法<sup>[6]</sup> 和 SIFT 算法<sup>[7]</sup>。近年来, 已有一些学者尝试加入色彩信息来实现彩色图像间的配准, 并得到了许多具有应用价值的特征匹配算法<sup>[8-11]</sup>。借鉴 CSIFT 算法, 本文提出了一种新的基于彩色信息的尺度不变特征提取与匹配算法, 该算法能够提取足够数量的具有几何与色彩不变性的特征点, 实现街景影像密集匹配。

## 1 建立彩色不变性模型

目前被广泛应用于工业中的彩色模型有 RGB 模型、HSV 模型、YUV 模型、Lab 空间等, 但是它们并不完全具有彩色不变性, 不能被应用

于彩色特征提取与匹配过程中。为求得复杂光照变化下的彩色不变量, 本文采用 Finlayson 等人<sup>[12]</sup>建立的对角偏移模型, 如式(1), 其中  $f^c$  是未知光源下的彩色图像,  $f^u$  是经过变换后的图像,  $D^{u,c}$  则是变换对角矩阵,  $o$  为图像间各通道彩色值的偏移向量。

$$f^c = D^{u,c} f^u + o \quad (1)$$

其矩阵表达式为:

$$\begin{bmatrix} R^c \\ G^c \\ B^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & & \\ & b & \\ & & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^u \\ G^u \\ B^u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

在上述彩色变化模型基础上采用一种提取彩色不变量的简单算法, 即根据式(3)将原始彩色空间各通道进行颜色归一化处理, 使特征具有不变性和均一性。

$$(R' \quad G' \quad B')^T = \left( \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \quad \frac{G - \mu_G}{\sigma_G} \quad \frac{B - \mu_B}{\sigma_B} \right)^T \quad (3)$$

式中,  $\mu_R$ 、 $\mu_G$  和  $\mu_B$  分别为 RGB 彩色空间各通道值的分布均值;  $\sigma_R$ 、 $\sigma_G$  和  $\sigma_B$  分别为 RGB 彩色空间各通道值的分布标准差。然后将变换后的 RGB 彩色空间代入对角偏移模型中, 其 3 条通道均能满足式(2), 经即此模型变换便能求解出复杂光照变化下的两幅或多幅图像的彩色不变量。本文建立的彩色模型不变性的具体推导过程如下。

收稿日期: 2013-05-17

项目来源: 国家科技支撑计划资助项目(2012BAH34B02, 2012BAJ15B04, 2011BAH12B03)。

第一作者: 何培培, 博士生, 主要从事遥感影像处理与数字摄影测量研究。E-mail: he\_pei@whu.edu.cn

假设针对同一物体或场景拍摄的两幅彩色图像存在某一彩色不变性特征点,其  $R, G, B$  等 3 通道分别为  $(R^c, G^c, B^c)$  和  $(R^u, G^u, B^u)$ , 将它们分别带入式(2), 求梯度后, 有:

$$\begin{pmatrix} R_x^c \\ G_x^c \\ B_x^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & & \\ & b & \\ & & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_x^u \\ G_x^u \\ B_x^u \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} R_y^c \\ G_y^c \\ B_y^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & & \\ & b & \\ & & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_y^u \\ G_y^u \\ B_y^u \end{pmatrix}$$

式中,  $R_x^c, G_x^c, B_x^c, R_x^u, G_x^u, B_x^u$  表示图像梯度在  $x$  方向的分量;  $R_y^c, G_y^c, B_y^c$  表示图像梯度在  $y$  方向的分量, 结合式(3)归一化后得:

$$R_x^c' = \frac{R_x^c - \mu_x^c}{\sigma_x^c} = \frac{aR_x^u - a\mu_x^u}{a\sigma_x^u} = \frac{R_x^u - \mu_x^u}{\sigma_x^u} = R_x^u'$$

同理得:

$$\begin{pmatrix} R_x^c' \\ R_y^c' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_x^u' \\ R_y^u' \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} G_x^c' \\ G_y^c' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_x^u' \\ G_y^u' \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} B_x^c' \\ B_y^c' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_x^u' \\ B_y^u' \end{pmatrix} \quad (4)$$

由式(4)可知, 彩色图像经变换后可以得到每一彩色通道的彩色不变量, 进而使特征描述子对颜色非线性与不均匀平移变换具有不变性。

## 2 彩色图像特征点检测与匹配

针对将彩色图像转化为灰度图像后进行匹配可能会出现大量误匹配点这一问题, 本文提出了

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} (R_x^2 + G_x^2 + B_x^2)/3 \\ (R_x R_y + G_x G_y + B_x B_y)/3 \end{bmatrix}$$

$$R = \det \mathbf{M} - k(\text{trace} \mathbf{M})^2 > \text{threshold} \quad (7)$$

其中, 式(7)  $\det \mathbf{M} = \prod \lambda_i$ ,  $\text{trace} \mathbf{M} = \sum \lambda_i$ , 经验值  $k$  为 0.04, 并且经实验得出此处阈值给定 0.03。

3) 分配特征点主方向。计算关键点周围的

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (8)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1}(L(x, y+1) - L(x, y-1)) / (L(x+1, y) - L(x-1, y)) \quad (9)$$

### 2.2 基于彩色描述向量的特征匹配

文献[9]提出一种直接利用彩色信息计算特征向量的 SIFT 匹配算法, 虽然一定程度上增强了对彩色物体的识别能力, 但其选择的彩色模型不能够适用于色彩复杂的街景影像, 因此, 本文采用以下方法进行特征点的颜色信息描述。首先将图像所在的坐标轴旋转到主方向上, 以确保旋转不变性, 如图 1(a)所示, 然后在每  $4 \times 4$  的小块上计算彩色不变量三通道分量的均值构成一个 3 维特征向量, 即可形成一个种子点, 如图 1(b)所示。对于  $4 \times 4$  结构的描述子, 通过对每个种子点进行高斯加权, 最终生成整个区域的 48 维特征向量。至此, 图像中每个特征点都被赋予了四种信息: 位

一种基于彩色信息的 SIFT 匹配算法, 在具有彩色不变量的基础上, 提取具有尺度不变性的特征点, 建立特征向量, 实现特征匹配。

#### 2.1 基于彩色影像的特征点检测

为了能够适应街景影像匹配需求, 本文采用基于非局部极值抑制的 Harris 算子, 提取彩色影像中角点和边缘点, 具体步骤如下。

1) 构建尺度空间。以彩色不变量为输入影像, 采用基于局部金字塔结构的 Laplacian 检测器, 其形式如式(5), 计算影像内某一像素在  $x, y$  方向上的偏导数值。

$$\sigma^2 (\partial_x^2 L(X; \sigma) + \partial_y^2 L(X; \sigma)) \quad (5)$$

式中,  $\sigma$  代表尺度因子,  $L(\cdot)$  代表不同尺度因子下的图像;  $\partial(\cdot) L(\cdot)$  表示对图像的  $x, y$  方向进行二阶微分。

2) 确定特征点位置。综合考虑灰度图像  $I$  与彩色图像 RGB 间的变换关系式<sup>[13]</sup>  $I = (R+G+B)/3$ , 类似于灰度图像的 Harris 算子<sup>[14]</sup>中构建自相关矩阵  $M$ , 得到彩色图像的分析矩阵  $M$  表达式(6), 并假设  $M$  矩阵的特征矢量为  $\lambda_i$ , 定义一个特征点判断式(7), 计算  $R$  响应值。判断  $R$  值, 若  $R > 0$  且大于给定阈值, 则标记为角点; 若  $R < 0$ , 构建 Hessian 矩阵, 按照 Canny 扇区划分原理进行边缘提取。

$$\begin{pmatrix} (R_x R_y + G_x G_y + B_x B_y)/3 \\ (R_y^2 + G_y^2 + B_y^2)/3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$R = \det \mathbf{M} - k(\text{trace} \mathbf{M})^2 > \text{threshold} \quad (7)$$

梯度大小和方向, 按照 SIFT 描述子选取特征点主方向的原则, 为每一关键点分配主方向, 梯度大小和方向的计算可采用式(8)、式(9):

置信息、尺度信息、主方向信息和 48 维特征向量。



(a) 颜色描述向量采样点 (b) 构建颜色描述向量

图 1 构建彩色描述子

Fig. 1 Constructing Color Descriptor

分别对两幅图像进行特征检测后, 便可进行匹配, 考虑到影响匹配结果的两个最主要因素——相似性度量函数与搜索策略, 本文所做改

进是采用相关系数代替 SIFT 算法中的欧氏距离作为相似性度量函数,并在全局搜索时加入主方向约束条件。主要由于提取的大量边缘点灰度分布比较近似,欧氏距离匹配时容易出现错误匹配,而相关系数是基于灰度匹配中最常用的相似度测度,准确性高且对影像辐射畸变具有良好的鲁棒性。具体操作是:在进行特征点搜索时,首先判断左右两幅影像中特征点的主方向绝对差值

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{i,j} I'_{i,j} - \frac{1}{n \times n} \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{i,j} \right) \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I'_{i,j} \right)}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{i,j}^2 - \frac{1}{n \times n} \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{i,j} \right)^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I'_{i,j}^2 - \frac{1}{n \times n} \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I'_{i,j} \right)^2 \right]}} \quad (10)$$

式中,  $I_{i,j}$  为基准影像中特征点直方图分量;  $I'_{i,j}$  为参考影像中特征点直方图分量,  $n$  等于 48。

### 3 实验分析

本文采用来自天津市街景影像数据库的影像数据,分别针对具有光照变化(图 2(a))、模糊变化(图 2(b))及视角变化(图 2(c))的图像组合进行测试。由于篇幅有限,每组影像只给出了变化差距最大的两幅,实际测试中每组包括 20~30 幅影像。

#### 3.1 本文算法性能测试

影像匹配处理过程中,一般采用匹配数量、匹配时间以及匹配正确率评价算法的性能。 $P$  表示匹配后的正确率,其值越大,表明匹配后的正确点所占比重越大,匹配越准确。利用不同情况下的测试影像,分别对比改进 CSIFT、改进 SIFT 与 SIFT 算法的匹配效果,并对实验加以分析。

$$P = \frac{\text{正确匹配点数}}{\text{正确匹配点数} + \text{错误匹配点数}} \times 100\%$$

##### 3.1.1 光照变化测试

利用图 2 中(a)组具有光照变化的影像组,分别测试 SIFT 与改进 CSIFT 算法特征匹配性能,实验结果如图 3 和表 1 所示,其中,图 3 表示两幅影像匹配结果,红色点代表匹配后的特征点对,表 1 列出了两种匹配算法的平均值(特征提取点对、匹配时间以及匹配正确率)。

表 1 两种算法匹配性能对比

Tab. 1 Comparing Matching Performance of SIFT and the Proposed Method

特征点/个		匹配数	匹配率	时间
图 3(a)	图 3(b)	/个	/%	/s
SIFT	2 144	2 121	665	87.2
改进后	3 066	2 960	1 290	95.7

测试结论如下。

1) 从图 3 可以看出,改进算法能够得到分布

$T(\text{abs}(O_l - O_r))$  是否小于给定的阈值  $T_0$ ,当小于给定阈值时,再按照如下公式计算每一特征点 48 维描述子相关系数  $\rho$ ,若两特征点的相关系数  $\rho$  大于阈值  $T_1$ ,则认为两点匹配。通过实验,综合考虑匹配正确率与两阈值设置的关系,本文分别设定  $T_0 = 0.1$ ,  $T_1 = 0.88$ ,在实验分析中将对比改进 SIFT 算法与原 SIFT 算法的匹配性能,证明改进算法的优越性。

密集且合理的匹配点对,特别是对建筑物的匹配结果明显优于 SIFT 匹配算法。

2) 由表 1 可知,针对具有光照变化的街景影像组,改进后算法能够大幅提高图像匹配正确率,减少匹配时间,更适合应用于街景影像匹配处理。

3) 分析其原因,对于光照越暗的影像,转换为灰度图像后,灰度的区分越不明显,SIFT 算法则越容易产生误匹配,其采用 128 维特征向量进行匹配,增加计算量,降低匹配速度;而本文算法不仅加入 RGB 彩色信息,并且减少特征向量维数,因此提高了算法的整体性能。

##### 3.1.2 模糊测试

针对图 2(b)影像组进行 SIFT 与本文改进匹配算法测试,采用每间隔两帧的图像作为一组立体像对,依次对比 18 组影像的匹配准确率。结果如图 4 所示,其中纵坐标表示匹配正确率,横坐标选取的 18 组影像对。

测试结论如下。

1) 由图 4 可知,随着图像逐渐模糊时,两种算法的匹配准确率曲线均呈现平稳下降趋势,但改进后算法的匹配正确率大多保持在 90% 以上,匹配结果具有较强的可靠性。

2) 测试结果表明,本文改进算法的匹配正确率平均为 91.4%,而 SIFT 的平均正确率则为 85.9%,整体高出 5.5%,且随着图像模糊程度的变化波动较小,具有很好的鲁棒性。

##### 3.1.3 视角变化测试

为了能够产生一定程度的视角变化,本组实验数据选择随着车载传感器路口转弯所拍摄的影像,且设置前后间隔三帧为一组立体像对,分别进行 SIFT 与改进 CSIFT 算法测试,其结果如图 5。

测试结论如下。

1) 由图 5 可知,SIFT 算法针对建筑物边缘以及灰度变化较小区域存在一定的错误匹配(如

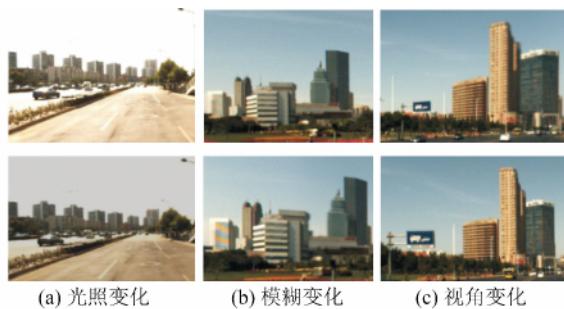


图 2 测试图像组

Fig. 2 Image Group of Testing

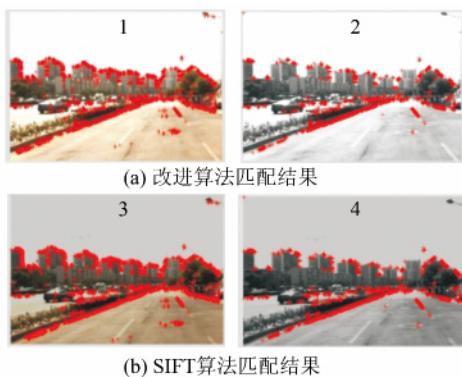


图 3 基于光照变化下的两种算法匹配结果

Fig. 3 Matching Result of SIFT and the Proposed Method in Term of Illumination Changes

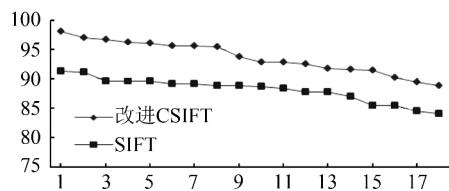


图 4 两种算法模糊性能测试

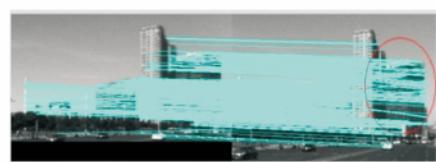
Fig. 4 Blurry Performance Testing of SIFT and the Proposed Method

图 5(a)), 改进后算法则在初匹配时能够克服 SIFT 匹配算法的不足, 使得匹配结果得到改善, 得到分布均匀的正确匹配点对(如图 5(b))。

2) 由图 5(c)两种算法的准确度曲线可知, 两种匹配算法的整体性能较差, 且最大匹配正确率都未达到 90%, 随着视觉的变化, 两者均呈下降趋势, 但是改进 CSIFT 算法曲线比较缓和, 没有较大波动, 总体算法性能比较稳定。

### 3.2 两种算法综合匹配对比

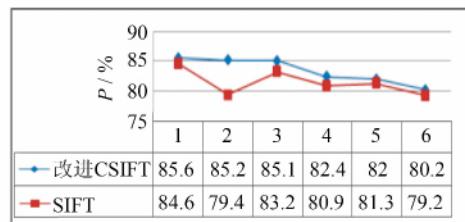
针对不同情况下的街景影像组, 分别分析对比了 SIFT 算法、改进 SIFT 算法以及改进 CSIFT 算法的匹配效果和性能, 验证了改进 SIFT 与改进 CSIFT 较之 SIFT 算法针对街景影像匹配具有一定的优越性, 其 3 种算法匹配对比结果如表 2。



(a) SIFT 最终匹配结果



(b) 改进 CSIFT 算法最终匹配结果



(c) 两种算法匹配正确率对比结果

Fig. 5 Comparison of Changed Perspective Matching Results of SIFT and the Proposed Method

表 2 3 种算法整体匹配结果对比表

Tab. 2 Comparison of Results with Three Matching Algorithms

实验数据	算法时间/s			匹配正确率/%		
	SIFT	改进 SIFT	改进 CSIFT	SIFT	改进 SIFT	改进 CSIFT
Pic(a)	102	86.4	76	87.2	94.5	95.7
Pic(b)	51.2	45	38.3	88.7	92.6	95.3
Pic(c)	93.3	72	51	81.1	82.4	83.7

综上, 基于彩色信息的 SIFT 算法针对不同类型的街景影像能够较好的实现光照变化、模糊变化以及视角变化等条件下的正确匹配, 且得到分布均匀的密集特征点对, 为影像配准、融合等后续处理提供条件。在假定特征提取、特征描述均相同的情况下, 采用相关系数和加入主方向约束的改进 SIFT 算法虽然在匹配时间及正确率方面略逊于改进 CSIFT 算法, 但是较之 SIFT 更适合于街景影像匹配处理。

## 4 结语

由于彩色图像包含大量的彩色信息, 为了提高图像匹配算法的识别效果, 本文提出的基于彩色信息的尺度不变影像匹配算法能够取得较为理想的结果, 经过实验分析, 得出如下结论。

1) 采用改进 Harris 检测算子进行彩色图像

特征检测。为了更好的兼顾图像的几何信息与颜色信息,本文直接针对彩色图像进行特征检测,提取分布均匀的角点与边缘点。

2) 为了验证本文算法对于街景影像的适用性,分别针对有光照变化、模糊变化及视角变化的图像进行特征提取与匹配,并分析其性能,取得了较SIFT算子更加稳定和精确的结果。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Zuxun, Zhang Jianqing. Digital Photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 1997:1-6(张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1997:1-6)
- [2] Wan Youchuan, Liu Liangming, Zhang Yongjun. Development of Photogrammetry and Remote Sensing in China[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2007(1):1-4(万幼川, 刘良明, 张永军. 我国摄影测量与遥感发展探讨[J]. 测绘通报, 2007(1):1-4)
- [3] Li Fangfang, Jia Yonghong, Xiao Benlin. A Multi-sensor Image Registration Algorithm Based on Line Features and SIFT Points[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(2):233-236(李芳芳, 贾永红, 肖本林. 利用线特征和SIFT点特征进行多源遥感影像配准[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(2):233-236)
- [4] Wan Xue, Zhang Zuxun, Wan Youchuan. An Improved Algorithm Used in Automatic Matching for Low-altitude Aerial Image[C]. The XXII ISPRS Congress, Melbourne, 2012
- [5] Tang Yonghe, Tao Huamin, Lu Huanzhang, et al. A Fast Image Matching Algorithm Based on Harris Operator[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(4):406-409(唐永鹤, 陶华敏, 卢焕章, 等. 一种基于Harris算子的快速图像匹配算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(4):406-409)
- [6] Mikolajczyk K, Schmid C. Indexing Based on Scale Invariant Interest Points[C]. Proceedings of the 8th International Conference on Computer Vision, Vancouver, 2001
- [7] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale Invariant Keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110
- [8] Van de Sande K E A, Snoek C G M. Evaluation of Color Descriptors for Object and Scene Recognition [C]. Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference, New York, 2008
- [9] Gao Jian, Huang Xinhua, Peng Gang, et al. Color-based Scale Invariant Feature Detection Applied in Robot vision [C]. Proceedings of the 5th International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition, Wuhan, 2007
- [10] Gao Jian, Huang Xinhua, Peng Gang, et al. Simplified SIFT Feature Point Detecting Method[J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(7): 2213-2215(高健, 黄心汉, 彭刚, 等. 一种简化的SIFT图像特征点提取算法[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(7):2213-2215)
- [11] Xiong Yan, Gong Huajun, Shen Yeqing. Feature Point Detection Based on Color Image[J]. *Computer Technology and Development*, 2007, 17(4):128-130(熊琰, 龚华军, 沈晔青. 一种快速有效的彩色图像边缘检测方法[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(4):128-130)
- [12] Finlayson G D, Hordley S D, Xu Ruixia. Convex Programming Colour Constancy with a Diagonal-offset Model[C]. IEEE International Conference on Image Processing, Genova, 2005
- [13] Gonzalez C R, Woods E R. Digital Image Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008:237-238
- [14] Harris C, Stephens M J. A Combined Corner and Edge Detector[C]. The 4th Alvey Vision Conference, Manchester, 1988

## Street View Images Matching Algorithm Based on Color Scale-invariant Feature Transform

HE Peipei<sup>1</sup> WAN Youchuan<sup>1</sup> GAO Xianjun<sup>1</sup> QIN Jiaxin<sup>1</sup>

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Image feature extraction and matching will be done after color image is transformed into gray may cause color information loss and lead to wrong matching. In order to solve problem, this paper presents a method color-based scale-invariant feature transform to realize feature image matching.

Then, feature points are extracted by using improved Harris algorithm. Neighbor information around these points is described using color invariant value as input information. Finally, the points between two images are matched using correlation coefficient. To demonstrate the feasibility of approach, experiments with groups of street view images compared with the traditional SIFT algorithm, show that the proposed algorithm can not only intensively match points, higher matching correct rate speed validity.

**Key words:** color invariant; scale invariant; feature extraction; image matching; street view images

**First author:** HE Peipei, PhD candidate, specializes in the processing of remote sensing image and digital photogrammetry. E-mail: hepeipei@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Key Technology Research and Development Program of China, Nos. 2012BAH34B02, 2012BAJ15B04, 2011BAH12B03.

(上接第 766 页)

behavior reasoning of building components into account, the model extends the semantic classification AVGE-based, BIM/IFC information-supported and semantic analysis oriented 3D building information model is proposed for facilitating indoor fire emergency evacuation. By taking the dynamic behavior reasoning of building components into account, the model extends the semantic classification oriented to indoor fire and considers “fire compartments-building components -building entrances” as a basis of the 3D topological representation for identifying escape spaces avoiding dangerous area. Experimental analysis proves the model has a potential to provide effective support for dynamic indoor fire emergency evacuation.

**Key words:** 3D building information model; indoor fire emergency; intelligent building components; dynamic emergency evacuation

**First author:** ZHU Qing, PhD, professor. His research interest include 3D dynamic GIS. E-mail: zhuq66@263.net

**Corresponding author:** HU Mingyuan, PhD, associate researcher. E-mail: humingyuan@gmail.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41101370, 41371388; the National High Technology Research and Development Program of China (863), Nos. 2012AA121401, 2013AA122301; the Open Research Fund of Key Laboratory of Disaster Reduction and Emergency Response Engineering of the Ministry of Civil Affairs, No. LDRERE20120302.