

# 基于改进 IGG 模型的全景图像拼接缝消除算法

瞿 中 李秀丽

(重庆邮电大学计算机科学与技术学院 重庆 400065)

**摘 要** 为了提高序列图像拼接得到的全景图的质量,通常将 L-M(Levenberg-Marquardt)算法用于图像拼接中变换模型的参数优化,但 L-M 算法不能消除误匹配点对模型求解的影响。为了消除误匹配点的影响,提出了基于 IGG(Institute of Geodesy & Geophysics)函数模型的抗差 L-M 算法。首先利用 IGG 算法的迭代过程具有良好的抗粗差能力和可靠的收敛性等特点来优化变换模型,提高图像配准的精准度。然后采用自适应区域的拉普拉斯多分辨率和最优拼接缝相结合的方法对拼接结果进行融合,以消除因拼接缝及光照不均而造成的过渡不连续现象。实验结果表明,所提算法不仅有效提高了配准精度,同时还实现了无缝拼接,获得了高质量的无缝拼接全景图。

**关键词** 全景拼接, L-M 算法, IGG 方法, 参数优化, 拼接缝消除

**中图分类号** TP391.14 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.12.049

## Algorithm of Eliminating Image Stitching Line Based on Improved IGG Model

QU Zhong LI Xiu-li

(College of Computer Science & Technology, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract** In order to improve the quality of panorama obtained by image stitching, L-M(Levenberg-Marquardt) algorithm is usually applied to the parameter optimization for image mosaic of the transform model, but it cannot eliminate the influence of mismatching points of the model solution. To solve this problem, robust L-M algorithm based on IGG function model was proposed. Firstly, the iterative process of IGG algorithm has the characteristics of strong resistance to gross error and high convergence speed, which contribute to optimize transformation model and improve the accuracy of image registration. Secondly, the method of combining Laplacian multi-resolution fusion algorithm of the adaptive region and the optimal stitching line is used to eliminate transition discontinuity, which is caused by the seam and uneven illumination. The experimental results show that the improved algorithm not only effectively improves the registration accuracy, but also achieves a seamless and high quality panorama.

**Keywords** Panoramic image mosaic, L-M algorithm, IGG method, Parameter optimization, Seam-line elimination

## 1 引言

图像拼接是通过将多幅相互之间存在重叠区域的图像进行拼接而得到的一幅高质量的全景图<sup>[1]</sup>,被广泛应用于医学、航空、军事、计算机视觉等领域。常见的图像拼接方法主要有基于区域的方法和基于特征的方法<sup>[2-3]</sup>,其中,基于特征的方法主要通过图像之间的特征匹配关系建立映射变换关系,计算量较小,并且对各种变化具有鲁棒性强、灵活性好等特点。通过选用基于 SIFT(Scale-invariant Feature Transform)特征的图像拼接方法<sup>[4-5]</sup>,首先提取 SIFT 特征,然后采用基于 KD-tree(K-Dimensional tree)的 BBF(Best Bin First)算法对待配准图像进行初始匹配,并利用 RANSAC(Random Sam-

ple Consensus)算法剔除误匹配并估算参数模型。由于误匹配点会影响变换模型的真实情况,导致变换模型偏离其真实值,从而影响图像配准精确度,因此引入具有抗差能力的 IGG 函数,利用基于 IGG 函数模型的抗差 L-M 算法来优化变换模型,提高图像配准精度。

由于曝光不均等差异,拼接结果通常会出现明显的拼接缝及光照过渡不连续等现象,而图像融合技术能有效消除拼接缝,并使融合边界处自然平滑过渡。因此,采用自适应区域的拉普拉斯多分辨率融合<sup>[6-7]</sup>和最优拼接缝<sup>[8]</sup>相结合的方法进行图像融合,在保证融合效果的情况下提高无缝拼接全景图的质量。

到稿日期:2016-11-14 返修日期:2017-01-06 本文受重庆市基础与前沿计划项目(cstc2014jcyjA40033, cstc2015jcyjA40034),重庆市科委基础科学与前沿技术研究重点项目(cstc2015jcyjBX0090),重庆市教委科学技术研究项目(KJ1500410)资助。

瞿 中(1972-),男,博士,教授,CCF 会员,主要研究方向为数字图像处理、云计算与物联网、大数据分析等, E-mail: quzhong@cqupt.edu.cn; 李秀丽(1986-),女,硕士生,主要研究方向为数字图像处理。

## 2 图像配准

### 2.1 SIFT 特征的提取

SIFT 特征是图像的局部特征,基于 SIFT 特征点的图像配准技术包括特征检测、特征匹配、变换模型参数的估计等。图像拼接流程如图 1 所示。

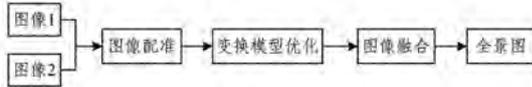


图 1 图像拼接流程图

### 2.2 RANSAC 算法

首先提取 SIFT 特征点,并利用基于 KD-Tree 结构的 BBF 算法获得待拼接图像的初始匹配特征点样本集合。然后从匹配的特征点样本集合中提取特征点之间的映射关系,采用 RANSAC 算法剔除误匹配点,并计算图像间的映射关系模型。

RANSAC 算法<sup>[9]</sup>可以通过不断迭代的方式从一组包含“局外点”的观测数据集中估计数学模型的参数。采用的变换模型矩阵如式(1)所示:

$$M = \begin{bmatrix} m_0 & m_1 & m_2 \\ m_3 & m_4 & m_5 \\ m_6 & m_7 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

两幅图像之间的投影变换关系用齐次坐标表示,如式(2)所示:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_0 & m_1 & m_2 \\ m_3 & m_4 & m_5 \\ m_6 & m_7 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$M$  为两幅图像间的单应性矩阵,表示两幅图像之间的位置变换关系, $(x', y')$  为目标图像的坐标经坐标变换后得到的新坐标, $(x, y)$  为目标图像的坐标。 $M$  的准确性直接影响图像拼接质量的好坏。

## 3 L-M 算法

RANSAC 算法得到的  $M$  矩阵是通过随机选取匹配点产生的,不是满足所有匹配点的最优解,因此利用 L-M 算法对初始单应性矩阵  $M$  进一步优化,从而得到满足所有匹配点集的最优解。

### 3.1 L-M 算法思想

L-M 算法<sup>[10]</sup>是目前应用得最广泛的求解非线性方程的迭代算法,它结合了梯度下降法和高斯-牛顿法的优点,迭代速度快且能够克服模型求解过程中的病态性,能得到模型的最优解。

高斯-牛顿法采用最小二乘估计,其误差指标函数如式(3)所示:

$$E(x) = V^T(x)V(x) \quad (3)$$

其中, $V$  为误差向量。

L-M 算法是一种改进的高斯-牛顿法,其第  $k$  次迭代的  $\Delta x$  为:

$$\Delta x = -(J^T J + \mu I)^{-1} J^T V \quad (4)$$

其中,阻尼系数  $\mu > 0$ ,为适当选取的常数; $I$  是单位矩阵; $J$  为  $E(x)$  的 Jacobian 矩阵。

### 3.2 抗差 L-M 算法

参数模型求解是非线性拟合的过程,由式(3)、式(4)可知,由于 L-M 算法采用最小二乘估计,当匹配特征点中出现误匹配时将会影响  $E(x)$  和  $\Delta x$  的值。若直接应用 L-M 算法,则会使得求解出的模型偏离其真实值,造成拼接后的图像局部或者整体出现变形。

为了消除误匹配点对模型求解的影响,采用抗差性相对较好的 IGG 函数作为误差模型的代价函数。IGG 算法<sup>[11]</sup>最早由中科院测量与地球物理研究所的周江文教授提出,其函数来源于 M 估计:

$$\rho(v) = \begin{cases} \frac{v^2}{2}, & |v| < k_0 \delta \\ |v|, & k_0 \delta < |v| < k_1 \delta \\ d, & |v| \geq k_1 \delta \end{cases} \quad (5)$$

$$p(v) = \begin{cases} 1, & |v| < k_0 \delta \\ \left(\frac{k_0}{|v|}\right) \left(\frac{k_1 - |v|}{k_1 - k_0}\right)^2, & k_0 \delta < |v| < k_1 \delta \\ 0, & |v| \geq k_1 \delta \end{cases} \quad (6)$$

其中, $|v| = |V/\delta|$ ;  $V$  为误差函数; $\delta$  为标准差;取  $k_0 = 1.5$ ,  $k_1 = 2.5$ 。式(5)、式(6)分别表示 IGG 函数模型以及权函数。

基于 IGG 法的抗差估计通过等价权将抗差估计与状态估计相结合,考虑了数据实际分布与假设分布的偏差。将 IGG 估计理论用于 L-M 算法中的误差估计中,在求解迭代过程中以残差变化量作为加速因子,修正权函数,使得解有较强的抗差性,即当  $|v| < k_0 \delta$  时,匹配点为内点,赋权值为 1;当  $k_0 \delta < |v| < k_1 \delta$  时,匹配点可能是内点也可能是外点,对其进行降权处理,使权重随着匹配误差的增大而逐渐趋近于 0;当  $|v| \geq k_1 \delta$  时,匹配点为外点,权值为 0。具体方法为:

$$\bar{P} = pW \quad (7)$$

假设变权前的初始值为  $W$ ,  $p$  为通过式(6)计算出的权因子,则  $\bar{P}$  为变权后的等价权。引入权  $\bar{P}$  后,新的误差指标函数为:

$$E(x) = V^T(x)\bar{P}V(x) \quad (8)$$

得到的抗差解为:

$$\Delta x = -(J^T \bar{P} J + \mu I)^{-1} J^T \bar{P} V \quad (9)$$

改进 L-M 算法的优化步骤如下:

(1) 给定训练误差允许值  $\epsilon$  (取 2 个像素),常数  $\beta, u$  以及待优化的初始化值  $M_k$  (取  $\beta = 10, u = 0.001$ )。

(2) 利用  $M_k$  计算待拼接图像映射到参考图像上的新坐标,并计算误差指标函数  $E(M_k)$ :

$$\begin{aligned} E(M_k) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [(Y_i' - Y_i)^2 + (X_i' - X_i)^2] \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N e_i^2(M) = \frac{1}{2} V(M)^T V(M) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $(X_i, Y_i)$  为目标图像的坐标经坐标变换后得到的新坐标, $(X_i', Y_i')$  为参考图像的坐标。

(3) 利用 IGG 函数模型优化误差模型函数  $E(M_k)$ 。

(4)若  $E(M_k) < \epsilon$ , 则转到步骤(6), 否则根据式(11)继续计算  $M_{k+1}$ , 并重新计算新单应性矩阵下的误差模型函数:

$$\begin{cases} M_{k+1} = M_{k+1} + \Delta M \\ \Delta M = -(J^T P J + \mu I)^{-1} J^T P V \end{cases}, k=0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

(5)若  $E(M_{k+1}) < E(M_k)$ , 令  $k=k+1, u=u/\beta$ , 则转至步骤(2); 否则不更新未知参数,  $M_{k+1} = M_k, u=u\beta$ , 转到步骤(2)。

(6)找到最优参数, 即  $M_k$ , 退出程序。

#### 4 图像融合

##### 4.1 拉普拉斯图像融合

图像的拉普拉斯金字塔的构成是在高斯金字塔的基础上演变而来的, 因此要得到拉普拉斯金字塔, 首先需要图像进行高斯金字塔分解。

假设原图像为  $G_0$ , 将  $G_0$  作为高斯金字塔的底层, 对  $l-1$  层图像  $G_{l-1}$  进行高斯低通滤波和隔行隔列的下采样得到图像  $G_l$ :

$$G_l = Reduce(G_{l-1}) \quad (12)$$

$G_0, G_1, \dots, G_N$  构成了高斯金字塔,  $N$  为高斯金字塔顶层的层号。然后对  $G_l$  进行上采样, 利用  $G_l$  与上采样信号  $G_{l+1}$  的差得到拉普拉斯金字塔分解图像。

$$\begin{cases} LP_l = G_l - G_{l+1}^*, & 0 \leq l < N \\ LP_N = G_N, & l = N \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $N$  为拉普拉斯金字塔顶层的层号;  $LP_l$  为拉普拉斯金字塔分解的第  $l$  层图像。由  $LP_0, LP_1, \dots, LP_l, \dots, LP_N$  构成的金字塔即为拉普拉斯金字塔。

$$\begin{cases} G_N = LP_N, & l = N \\ G_l = LP_l + G_{l+1}^*, & 0 \leq l < N \end{cases} \quad (14)$$

式(14)说明, 从拉普拉斯金字塔的顶层开始逐层自上至下递推, 便可以重构原图像  $G_l$ , 最终得到原始图像。

##### 4.2 改进的拉普拉斯图像融合

为了能够消除曝光不均等差异导致的拼接结果出现拼接缝及过渡不连续等现象, 将最优拼接缝与融合算法相结合, 提出一种图像拼接缝消除方法。为了消除运动物体造成的融合鬼影, 利用动态规划的方法确定最优拼接缝。最优拼接缝是指两幅图像的重叠区中颜色强度差异最小且几何结构最相似的缝合线, 重叠区域的图像只取自一幅图像, 因此可以消除由于运动物体造成的融合鬼影。传统多分辨率融合算法对分解后的图像直接进行融合计算量大, 实时性不高。采用自适应区域进行融合, 可以减少处理时间, 提高精度。

自适应区域的拉普拉斯融合步骤如下:

(1)利用动态规划的方法找到最优拼接缝, 在拼接缝附近, 间距  $\Delta x$  (如式(15))以自适应的方式确定, 选择过渡融合区域。

$$\Delta x = w - T * \sqrt{W * H} \quad (15)$$

其中,  $w$  为重叠区域的宽度,  $W$  和  $H$  为拼接得到的图像的宽和高, 通过多次实验得到, 当  $T \in (0.03, 0.08)$  时可以保证融合效果。

(2)对过渡区域  $R_1$  和  $R_2$  (见图2)分别进行金字塔分解和重构(见式(13)和式(14)), 并按照一定的融合规则进行融合,

得到过渡区域的融合图像  $R_L$ 。

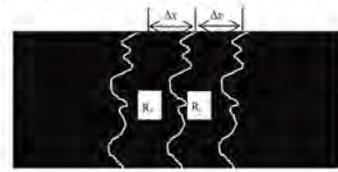


图2 确定过渡区域

(3)对融合得到的过渡区域图像按如下规则进行融合, 得到最终的图像。融合规则如下:

1)对于靠近最优拼接缝的区域, 拉普拉斯金字塔融合系数  $w_L$  以  $0 \rightarrow 1$  的趋势递增。

2)对于越远离最优拼接缝的区域, 源图像的系数  $w_S$  以  $0 \rightarrow 1$  的趋势递增, 尽可能地保留原始图像信息。

两幅图像的融合可表示为:

$$R(x, y) = w_L R_L(x, y) + w_S R_S(x, y) \quad (16)$$

其中,  $R_L$  为拉普拉斯金字塔融合图像,  $R_S$  为源图像,  $w_L + w_S = 1$ 。

(4)得到最终融合结果。运用本方法对过渡区域进行融合, 得到的结果如图3所示。

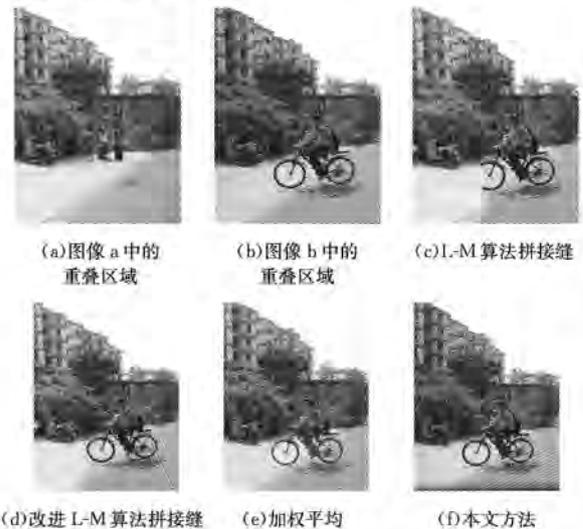


图3 融合后消除拼接线的结果

对图3中有运动目标的两幅图像图3(a)和图3(b)提取重叠区域, 并进行融合。图3(c)和图3(d)分别为L-M算法改进前、后的拼接缝; 图3(e)为运用传统加权平均进行融合得到的融合图像, 有模糊现象; 而图3(f)将拼接线寻优和多分辨率方法相结合, 有效地去除了拼接缝。

#### 5 实验结果与分析

##### 5.1 实验结果

利用本文算法对多个场景进行图像拼接实验, 实验软件和硬件环境如下: CPU: Intel (R) Core (TM) i3-390M 2.67GHz; OS: Windows 7; Library: OpenCV2.4.9。图4(a)和图5(a)分别给出了6幅原始图像序列和8幅原始图像序列, 图4(b)和图5(b)为原始拼接, 图4(c)和图5(c)为改进的L-M算法调整后得到的全景图, 图4(d)和图5(d)为消除拼接缝后得到的全景图。



(a)6 幅原始图像序列



(b)最优拼接缝图像



(c)L-M 调整



(d)融合后得到的全景图

图 4 6 幅场景序列图像拼接结果



(a)8 幅原始图像序列



(b)最优拼接缝图像



(c)L-M 调整



(d)融合后得到的全景图

图 5 8 幅场景序列图像拼接结果

### 5.2 结果分析

对图 4(a)和图 5(a)所示的实验场景中的多幅图像进行拼接,使用基于 IGG 函数的 L-M 算法进行优化,分别对矩阵 M 更新 3 次和 5 次。匹配误差和对比数据如表 1 所列。由表 1 可知,改进的 L-M 算法确实有效地降低了拼接匹配误差,提高了图像配准精度,运用改进的 L-M 算法进行优化后,平均误差最多减少了 61%。图 6 给出了 L-M 算法的时间比较结果,结果表明改进 L-M 算法的时间效率更高,并且随着图像的增多,改进算法的时间效率越高。

表 1 L-M 算法改进前、后的误差对比

图像处理过程	L-M 匹配误差和/%	改进 L-M 的匹配误差和/%	
图 4(a)	(2)和(3)	75.66	67.78
	(3)和(4)	66.08	39.30
	(5)和(6)	128.13	92.24
图 5(a)	(1)和(2)	32.36	26.35
	(2)和(3)	74.69	60.16
	(3)和(4)	58.49	46.43
	(4)和(5)	43.68	34.76
(6)和(7)	17.88	12.87	

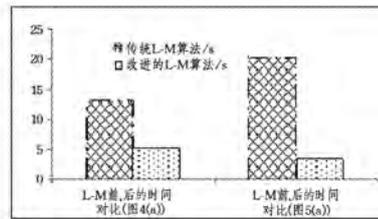


图 6 L-M 算法改进前、后的时间对比

使用熵、标准差和平均梯度对图 3 中两种融合方法的融合结果进行评价。其中,熵反映图像信息的丰富程度,熵值越大,融合效果越好;标准差反映灰度级的离散分布情况,标准差越大,图像空间的分辨率越高;平均梯度体现了图像的清晰度,清晰度值越大表示图像越清晰。融合后的图像结果对比如表 2 所列。

表 2 融合结果对比

	熵	标准差	平均梯度
加权平均	7.1751	81.2767	9.1771
本文算法	7.534	83.1671	16.8893

表 2 中的数据表明,本文算法的融合效果较好,其对图 4(a)和图 5(a)中的原始图像进行融合后得到的全景图像图 4(d)和图 5(d)在尽可能保证原始图像信息的情况下,使拼接缝得到了消除。

**结束语** 在图像拼接过程中,将 L-M 算法应用于图像拼接变换矩阵的参数优化中;针对 L-M 算法不具备抗差能力的问题,将抗差函数运用到 L-M 算法中,运用改进的 L-M 算法优化变换模型,提高了图像配准的精度。针对拼接缝及曝光不均产生的过渡不连续现象,采用自适应区域的拉普拉斯多分辨率融合和最优拼接线相结合的方法进行图像融合。实验结果表明,所提算法有效提高了配准精度且实现了无缝拼接,最终获得了高质量的全景图。

### 参 考 文 献

[1] HUANG C M, LIN S W, CHEN J H. Efficient Image Stitching

- of Continuous Image Sequence With Image and Seam Selections [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(10): 5910-5918.
- [2] KUPER B, NETANYAHU N S, SHIMSHONI I. An Efficient SIFT Based Mode Seeking Algorithm for Sub-Pixel Registration of Remotely Sensed Images [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2015, 12(2): 379-383.
- [3] ZHANG D, YU C G. Image Mosaic Technology Based on Feature Point Match [J]. *Computer Systems & Applications*, 2016, 25(3): 107-112. (in Chinese)  
张东, 余朝刚. 基于特征点的图像拼接方法 [J]. *计算机系统应用*, 2016, 25(3): 107-112.
- [4] BROWN M, LOWE D G. Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2007, 74(1): 59-73.
- [5] PAUL S, PATI U C. Remote Sensing Optical Image Registration Using Modified Uniform Robust SIFT [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2016, 13(9): 1300-1304.
- [6] CHIA W C, YEONG L S, CH'NG S I, et al. The effect of rainfall on feature points extraction and image stitching [C] // 2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering (ISEEE). IEEE, 2014: 1382-1386.
- [7] SHEN J, ZHAO Y, YAN S, et al. Exposure fusion using boosting Laplacian pyramid [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2014, 44(9): 1579-1590.
- [8] QU Z, QIAO G Y, LIN S P. A Fast Image Stitching Algorithm Eliminates Seam line and Ghosting [J]. *Computer Science*, 2015, 42(3): 280-283. (in Chinese)  
瞿中, 乔高元, 林嗣鹏. 一种消除图像拼接缝和鬼影的快速拼接算法 [J]. *计算机科学*, 2015, 42(3): 280-283.
- [9] WAINE M, ROSSA C, SLOBODA R, et al. 3D shape visualization of curved needles in tissue from 2D ultrasound images using RANSAC [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2015: 4723-4728.
- [10] WANG T J, CHENG L Z. Image mosaic via improved Levenberg-Marquardt algorithm [J]. *Journal of Computer Application*, 2009, 29(10): 2693-2694. (in Chinese)  
王腾蛟, 成礼智. 基于 Levenberg-Marquardt 改进算法的图像拼接 [J]. *计算机应用*, 2009, 29(10): 2693-2694.
- [11] MO C K, CHEN S X, HAO W U, et al. A Robust Estimation Based 3D Passive Locating Algorithm [J]. *Electronics Optics & Control*, 2015, 22(2): 22-26.

(上接第 248 页)

### 参考文献

- [1] BENEVENUTO F, RODRIGUES T, CHA M, et al. Characterizing user behavior in online social networks [C] // Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement Conference. ACM, 2009: 49-62.
- [2] SCELLATO S, NOULAS A, MASCOLO C. Exploiting place features in link prediction on location-based social networks [C] // ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. ACM, 2011: 1046-1054.
- [3] BAO J, ZHENG Y, WILKIE D, et al. Recommendations in location-based social networks: a survey [J]. *GeoInformatica*, 2015, 19(3): 525-565.
- [4] FERENC G, YE M, LEE W C. Location recommendation for out-of-town users in location-based social networks [C] // ACM International Conference on Conference on Information & Knowledge Management. 2013: 721-726.
- [5] ZHANG J D, CHOW C Y. CoRe: Exploiting the personalized influence of two-dimensional geographic coordinates for location recommendations [J]. *Information Sciences*, 2015, 293: 163-181.
- [6] YE M, YIN P, LEE W C. Location recommendation for location-based social networks [C] // Proceedings of the 18th SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. ACM, 2010: 458-461.
- [7] JAMALI M, ESTER M. A matrix factorization technique with trust propagation for recommendation in social networks [C] // ACM Conference on Recommender Systems, Recsys 2010. Barcelona, Spain, 2010: 1055-1066.
- [8] CAVERLEE J, LIU L, WEBB S. The social trust framework for trusted social information management: architecture and algorithms [J]. *Information Sciences An International Journal*, 2010, 180(1): 95-112.
- [9] GHIOCA D. Hierarchical geographical modeling of user locations from social media posts [C] // International Conference on World Wide Web. 2013: 25-36.
- [10] GAO M, JIN C Q, QIAN W N, et al. Real-time and personalized recommendation on microblogging systems [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2014, 37(4): 963-975. (in Chinese)  
高明, 金澈清, 钱卫宁, 等. 面向微博系统的实时个性化推荐 [J]. *计算机学报*, 2014, 37(4): 963-975.
- [11] CHENG C, YANG H, KING I, et al. Fused matrix factorization with geographical and social influence in location-based social networks [C] // Proc of the 26th AAAI Conf on Artificial Intelligence (AAAI'12). Menlo Park, CA: AAAI, 2012: 211-276.
- [12] ZHAO G, QIAN X, KANG C. Service Rating Prediction by Exploring Social Mobile Users' Geographic Locations [J]. *IEEE Transactions on Big Data*, 2017(99): 67-78.
- [13] FERENC G, YE M, LEE W C. Location recommendation for out-of-town users in location-based social networks [C] // Proceedings of the 22nd ACM International Conference on Information & Knowledge Management. ACM, 2013: 721-726.
- [14] DEL PRETE L, CAPRA L. differRS: A Mobile Recommender Service [C] // Eleventh International Conference on Mobile Data Management, MDM 2010. Kanas City, Missouri, USA, 2010: 21-26.
- [15] MNIH A, SALAKHUTDINOV R. Probabilistic matrix factorization [C] // International Conference on Machine Learning. 2012: 880-887.
- [16] LEE D D, SEUNG H S. Learning the parts of objects by non-negativ matrix factorization [J]. *Nature*, 1999, 401 ( 6755 ): 788-791.
- [17] YE M, YIN P, LEE W C, et al. Exploiting geographical influence for collaborative point-of-interest recommendation [C] // International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. ACM, 2011: 325-334.