

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.06.007

# 基于 SURF 特征的多机器人栅格地图拼接方法\*

唐宏伟<sup>1,2</sup> 孙 炜<sup>1</sup> 杨 凯<sup>3</sup> 林安平<sup>1</sup> 吕云峰<sup>1</sup> 程熙<sup>1</sup>

- (1. 湖南大学 机器人视觉感知与控制技术国家工程实验室 长沙 410082;
2. 邵阳学院 多电源地区电网运行与控制湖南省重点实验室 邵阳 422000;
3. 长沙市公安局 网络安全保卫与技术侦察支队 长沙 410007)

**摘要:**实现地图拼接是多机器人协作创建地图的一项关键技术。研究了一种基于加速鲁棒特征(SURF)的多机器人栅格地图拼接方法,该方法通过对机器人运动坐标系进行刚体变换,将栅格地图拼接问题用图像配准的最小化问题来表示并建立数学模型。首先利用一种改进的 SURF 算法从待拼接地图中提取特征,然后利用随机抽样一致性(RANSAC)算法剔除误匹配得到初始拼接参数,并将拼接参数作为 ICP 算法的初值来求解目标函数。最后分别利用公开数据集和 Turtlebot2 移动机器人进行了实验,结果表明该方法能对多机器人建立的栅格地图实现可靠拼接,鲁棒性好且精度高,拼接速度快适用于较大规模环境栅格地图拼接。

**关键词:**多移动机器人;栅格地图拼接;最小化问题;SURF 特征;ICP 算法

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Grid map merging approach of multi-robot based on SURF feature

Tang Hongwei<sup>1,2</sup> Sun Wei<sup>1</sup> Yang Kai<sup>3</sup> Lin Anping<sup>1</sup> Lv Yunfeng<sup>1</sup> Cheng Xi<sup>1</sup>

- (1. National Engineering Laboratory for Robot Visual Perception and Control Technology, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Grids Operation and Control on Multi-Power Sources Area, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China; 3. Network Security and Technical Reconnaissance Detachment, Changsha Public Security Bureau, Changsha 410007, China)

**Abstract:** Map merging is a crucial technology for cooperative mapping of multi-robot system. A multi-robot grid map merging method based on SURF (speeded up robust features) algorithm is studied. In the approach, the robot motion coordinate system is transformed into a rigid body. The mathematical model of the grid map merging problem is established as minimization problem of image registration. Firstly, an improved SURF algorithm is used to extract the features from the grid maps. Secondly, the RANSAC (random sampling consensus) algorithm is employed to eliminate the mismatch and get the initial merging parameters, and the merging parameter is used as the initial value of the ICP (iterative nearest point) algorithm to solve the objective function. Finally, the open datasets and the Turtlebot2 mobile robots are adopted for experiments. The experimental results verify that the proposed method can achieve good robustness and high accuracy in the grid map merging by multi-robots, the fast speed of map merging indicates that it is suitable for large scale environment.

**Keywords:** multiple mobile robot; grid map merging; minimization problem; SURF feature; ICP algorithm

## 1 引言

移动多机器人系统的研究引起了国内外学者越来越

多的重视,机器人想实现未知环境中探索和导航,需要先完成同步定位与地图创建(simultaneous localization and mapping, SLAM)<sup>[1]</sup>。已经提出的多种有效 SLAM 算法主要集中于单个移动机器人研究<sup>[2-6]</sup>,但随着环境规模不断

收稿日期:2017-01 Received Date: 2017-01

\* 基金项目:国家科技支撑计划(2015BAF11B01)、湖南省杰出青年基金(14JJ1011)、湖南省科技计划(2016TP1023)、湖南省教育厅科学研究(14CJ1015)资助项目

增大,严重制约了它在鲁棒性、拼接速度和精度等方面的性能,而多机器人协作 SLAM 的优势明显<sup>[7-9]</sup>。多机器人 SLAM 问题的关键是地图信息融合,把创建的局部地图拼接成全局地图也是实现多机器人系统导航的关键技术。

机器人 SLAM 算法可创建特征地图、拓扑地图和栅格地图等不同类型地图。栅格地图在表示真实环境、实现精确定位和导航等方面更有优势,多机器人栅格地图拼接问题的研究引起了广泛关注。文献[10-11]提出了一种多机器人独立探索共享室内环境的栅格地图拼接方法,该方法利用哈夫变换的一种新方法实现拼接,算法有较高的效率,但哈夫变换存在的参数离散化问题影响了地图拼接的精度。文献[12]提出了一种多机器人探索室内环境获得栅格地图并使用运动规划算法及 Quick Connect 算法来合并,但搜索全局最优解采用迭代方式,算法效率较低。文献[13]提出了一种基于曲率的地图匹配和粒子群优化栅格地图拼接方法,使用单向观察提高了灵活性,但需要进行位置估计容易出现局部极大值的风险影响拼接精度。文献[14]提出了一种多假设地图融合算法和基于粒子群优化的正弦图来解决栅格地图拼接问题,它首先从地图提取正弦图,然后从候选的正弦图和相关方向提取信息,再把相关信息经粒子群优化变换得到合并的地图。国内有些学者也在尝试利用遗传算法等方法实现栅格地图的拼接<sup>[15-19]</sup>。文献[18]提出了一种基于免疫自适应遗传算法的栅格地图融合方法,该方法将每个可能的平移旋转平面转换对应一个抗体,所需计算量大,有待进一步提高效率。文献[19]提出了一种基于视觉特征的拓扑节点匹配方法,并结合局部扫描策略实现多机器人拓扑地图拼接且取得了较好的结果,由于建立的是融合尺度不变特征变换(scale invariant feature transform, SIFT)<sup>[20]</sup>特征的分层拓扑结构,如要将此方法用于栅格地图拼接,SIFT 特征提取和匹配的实时性有待进一步提高。文献[21]提出了一种图像配准的栅格地图拼接方法,该方法也基于 SIFT 特征提取分析初始拼接参数,能可靠的实现栅格地图拼接并且精度较高,但提取 SIFT 特征相对于提取加速鲁棒特征(speeded up robust features, SURF)<sup>[22]</sup>需要较长的时间,不利于较大规模环境下的地图拼接。

本文提出了一种基于 SURF 特征的多机器人栅格地图拼接方法,首先建立图像配准最小化问题的数学模型,基于改进 SURF 算法提取特征并获得初始拼接参数,然后基于改进 ICP(iterative closest point)算法求解所建立的目标函数。

## 2 多机器人栅格地图拼接

### 2.1 栅格地图拼接问题

本文以多机器人协作方式建立主从结构的多机器人

拼接系统。移动机器人先选定平面参考坐标系再进行地图创建,各机器人单独进行局部地图的创建更新。当从机器人遇到主机器人时,将从机器人局部地图坐标系进行旋转平移等处理,得到相对于主机器人当前运动坐标系的位姿,进一步再实现地图拼接。

多机器人地图的拼接,以某台机器人为主机器人,其他从机器人所创建的栅格地图分别与主机器人的栅格地图进行拼接,关键是要能实现两两机器人之间的栅格地图拼接,所以本文以二台机器人所创建的栅格地图拼接为研究重点。不同机器人在同一环境下分别创建了两幅栅格局部地图  $G$  和  $W$ , 设  $W$  为主机器人所创建的参考地图,机器人创建地图时有一定的重叠区域。机器人运动坐标系变换主要包括旋转和平移,在进行地图拼接时,计算两幅地图之间的刚体变换参数  $T = \{\mathbf{R}, t\}$ , 其中  $\mathbf{R}$  是由旋转角  $\theta$  所确定的二维旋转变换矩阵,  $t$  为二维平移变换列向量。地图拼接转化为数学问题实质上是要计算出精确的拼接参数  $T = \{\mathbf{R}, t\}$ , 能够较好的将经过坐标变换的地图  $T(G)$  与地图  $W$  的重叠区域匹配起来。由计算得到的拼接参数  $T = \{\mathbf{R}, t\}$  通过特征融合方法将地图  $T(G)$  与地图  $W$  进行融合实现地图拼接,最终获得规模更大的地图。

地图拼接的核心就是实现两幅或多幅重叠图像间的配准。本文根据图像配准的理论,首先建立栅格地图拼接问题的数学模型,提出了基于 SURF 特征提取初值分析法,得到最优的地图拼接初始参数,并将此分析结果作为改进 ICP 算法求解目标函数最小化时的输入,得到刚体变换参数,最后对栅格地图进行融合获得栅格地图拼接结果。

### 2.2 数学模型

当机器人在构建栅格地图时环境被划分为同分辨率的二维栅格,计算机把这些栅格以矩阵的形式存储,每个矩阵元素对应一个栅格,环境中的一个栅格对应为栅格地图中的每个像素。2.1 节已假设不同机器人所构建的存在重叠区域二维栅格地图  $G$  和  $W$ 。从待拼接的栅格地图中利用边缘提取算法分别提取边缘像素点集  $G = \{\mathbf{g}_i\}_{i=1}^{N_g}$  和  $W = \{\mathbf{w}_i\}_{i=1}^{N_w}$ ,  $\mathbf{g}_i$  和  $\mathbf{w}_i$  为向量,  $N_g$  和  $N_w$  分别表示边缘像素点集  $G$  和  $W$  的元素个数。地图  $G$  中和地图  $W$  重叠区域的边缘像素点集用  $G_e$  表示,设它为  $G$  的子集,重叠百分比用  $\varepsilon$  来表示。地图拼接问题可看作是图像配准问题,计算求得刚体变换  $T = \{\mathbf{R}, t\}$ , 使得经变换处理后的点集  $T(G)$  能很好地与点集  $W$  匹配,进而将栅格地图拼接问题表示为最小化问题,如下式:

$$\begin{aligned} \min_{\substack{\mathbf{R}, t, \varepsilon, G_e \\ f(i) \in \{1, 2, \dots, N_w\}}} & \frac{1}{|G_e| (\varepsilon)^{1+\lambda}} \sum_p \|\mathbf{R}\mathbf{g}_i + t - \mathbf{w}_{f(i)}\|^2 \\ \text{s. t.} & \mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}_{2 \times 2}, \Delta(\mathbf{R}) = 1 \\ & \varepsilon \in [\varepsilon_{\min}, 1], G_e \subseteq G, |G_e| = \varepsilon |G| \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为控制参数,  $|\cdot|$  代表集合中元素个数, 最小重叠百分比用  $\varepsilon_{\min}$  表示。可采用改进的 ICP 算法求解式(1)中的刚体变换, 该算法需要较好的特征提取初始拼接参数  $(R_0, t_0)$ <sup>[21]</sup>, 本文提出了一种基于改进 SURF 算法和随机抽样一致性 (RANSAC) 算法获得有效初始拼接参数的方法。

### 2.3 基于 SURF 特征提取的初始拼接参数分析

SURF 算法是一种加速的 SIFT 算法<sup>[22]</sup>, 本文提出

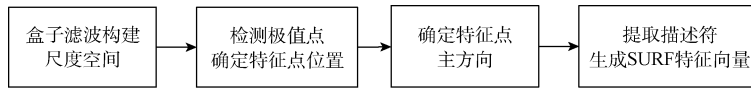


图1 改进的 SURF 算法步骤

Fig.1 The steps of improved SURF algorithm

#### 2.3.1 构建尺度空间

由于 SURF 算法利用了盒子滤波和积分图像, 其计算耗时与图像尺寸无关, 故在特征检测时 SURF 算法比 SIFT 算法效率更高, SURF 算法就是利用该性质加速了原图像与盒子滤波的卷积运算。SURF 算法的尺度空间金字塔最底层利用一个大小为  $9 \times 9$  的盒子滤波, 盒子滤波大小变换最少 6 个像素步长, 第 2 层最小为  $15 \times 15$ 。当前大小的盒子滤波对应高斯尺度值的计算公式如下:

$$\sigma_{\text{approx}} = \frac{1.2}{9}N \quad (2)$$

当前盒子滤波尺寸用  $N$  表示, 图 2 所示构建了 4 度 4 层的尺度空间, 各层中盒子滤波器的大小变化分别为 6、12、24、48。

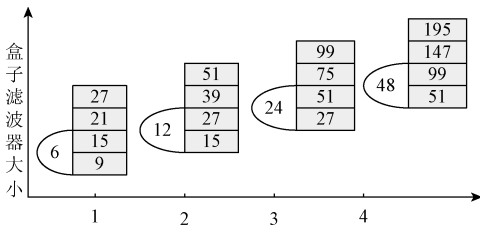


图2 滤波器尺寸分布

Fig.2 Distribution of filter size

#### 2.3.2 检测极值点, 确定特征点位置

为了寻找尺度空间中的极值点, 本文采用快速 Hessian 矩阵实现, 为确保在二维图像空间和尺度空间均检测到极值点, 每个检测点与它同尺度的 8 个相邻点及上下相邻尺度对应的 26 个点比较。用多尺度空间函数  $D_{xx}$ 、 $D_{xy}$ 、 $D_{yy}$  表示简化后的 Hessian 行列式如式(3)所示, 如果该点行列式的值  $\Delta(H_{\text{approx}})$  为正则认为是局部极值点。

$$\Delta(H_{\text{approx}}) = D_{xx}D_{yy} - (\omega D_{xy})^2 \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为加权系数 (本文取  $\omega = 0.9$ )<sup>[22]</sup>。找到候选极

一种基于改进 SURF 特征的初始拼接参数分析方法, 首先采用 Harris 算子提取特征点, 再利用 SURF 算法生成 64 维特征向量, 然后采用 RANSAC 算法<sup>[23]</sup>来剔除误匹配提纯特征对, 得到有效的特征对和最优的初始拼接参数。

改进 SURF 算法利用积分图像、盒子滤波和 Haar 小波加速算法, 对尺度、噪声、光照及视角差异等复杂变化均具有稳定的鲁棒性。其实现步骤如图 1 所示。

值点并记录其位置和尺寸, 同时还要利用极值点邻域像素插值找到图像空间和尺度空间中的亚像素精度特征点, 消除低对比度的极值点以确定特征点的位置。SURF 耗时主要在构建尺度空间检测特征点和特征描述符上, 本文使用 Harris 算法检测特征点来提高特征检测速度和稳定性。

#### 2.3.3 确定特征点主方向

要使特征点具有旋转不变等特性, 需为特征点确定一个主方向, 同时利用 Haar 小波提高鲁棒性。首先以特征点为中心, 以  $6\delta$  ( $\delta$  为特征点所在的尺度值) 为半径作圆, 计算圆形区域内的点在  $x$  和  $y$  方向上为  $4\delta$  的 Haar 小波响应, 并用高斯模板对得到的响应结果做加权使其更符合实际。以特征点为中心、圆心角为  $60^\circ$  的扇形区域为单位, 以  $5^\circ$  为步长遍历整个响应图像, 可得 6 个扇形区域。每个扇形区域内累加计算  $x$  和  $y$  方向上的 haar 小波响应值生成一个新矢量, 将新矢量中模值最大矢量的方向作为该特征点的主方向, 如图 3 所示。

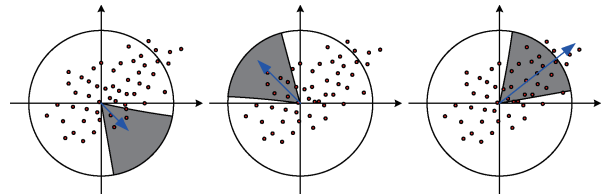


图3 主方向确定示意图

Fig.3 Schematic diagram of the main direction confirmation

#### 2.3.4 生成特征点描述符

为确保旋转不变性将坐标轴旋转至 SURF 特征点主方向, 沿着主方向以特征点为中心构造一个  $20\delta$  为边长的正方形窗口, 将该区域均匀的分成 16 个子块, 在每个子区域内用  $2\delta$  的 Haar 小波模板以  $5 \times 5$  大小为 1 个小块间隔采样, 计算每个小块中检测点相对于主方向  $x$  和  $y$  轴方向的响应值  $d_x$  和  $d_y$ , 把每个小块中的 25 个采样点

的响应值及其绝对值进行累加,就形成了该子区域的1个4维向量描述子 $v = (\sum d_x, \sum d_y, \sum |d_x|, \sum |d_y|)$ ,如图4所示。经过上述过程的处理,每个特征点就得到1个64维描述向量,将特征向量归一化后可去除亮度变化的影响,最终得到SURF特征的向量描述符。

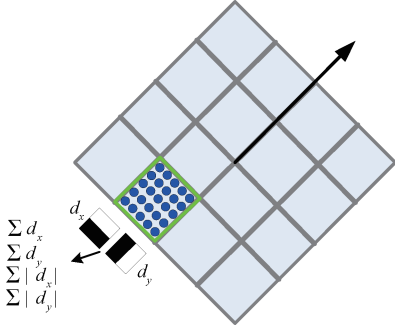


图4 SURF特征点生成示意图

Fig. 4 Schematic diagram of SURF feature points generation

### 2.3.5 获得最优的初始拼接参数

受传感器噪声和SLAM算法精度等影响,待拼接的栅格地图提取SURF特征后,所建立的对对应关系包含一些错误的特征匹配对,本文采用RANSAC算法来提纯特征对,得到有效特征对和最优初始拼接参数。

栅格地图 $G$ 和栅格地图 $W$ 提取并建立了 $N$ 组SURF特征对 $\{P_{i,G}, P_{i,W}\}_{i=1}^N$ ,其中 $P_{i,G}$ 和 $P_{i,W}$ 分别表示地图 $G$ 和 $W$ 的第 $i$ 组特征,它们在栅格地图的位置分别用 $p_{i,G}$ 和 $p_{i,W}$ 表示。如果 $T = \{R, t\}$ 为拼接参数的近似解,且 $\{P_{i,G}, P_{i,W}\}_{i=1}^N$ 为一组有效的特征对,也就是它们对应于二维坐标中的同一位置,则 $\|R p_{i,G} + t - p_{i,W}\|_2 \approx 0$ 。

1)从SURF特征对中随机选取两组特征如 $\{P_{i,G}, P_{i,W}\}_{i=n,m}$ 计算最新的刚体变换结果,获得一组新的待拼接参数 $T_s = \{R_s, t_s\}$ ,设变量 $s$ 初值为0,本文 $s$ 取值为45。2)计算 $d_i = \|R_s p_{i,G} + t_s - p_{i,W}\|_2$ ,根据设定的阈值 $d_m$ ,统计 $d_i \leq d_m$ 的SURF特征对的组数。重复以上步骤至 $s$ 到所设最大值,利用所找到的 $N$ 个有效SURF特征对计算获得最优的初始拼接参数 $T_{best}$ 。

### 2.4 基于改进ICP算法获得最优解

本文提出了一种改进的ICP算法,由上节算法得到初始拼接参数作为该算法的初值,可保证迭代最近点算法获得最优解。

#### 2.4.1 建立点对关系

由前一次迭代获得的刚体变换 $(R_{k-1}, t_{k-1})$ ,建立点集之间点的对应关系:

$$f_k(i) = \arg \min_{j \in \{1,2,\dots,N_g\}} \|R_{k-1} \mathbf{g}_i + t_{k-1} - \mathbf{w}_j\|_2 \quad i = 1, 2, \dots, N_g \quad (4)$$

为加快ICP算法速度,可采用基于k-d tree的最近邻

搜索算法,将 $\mathbf{g}_i$ 与对应点 $\mathbf{w}_{f_k(i)}$ 之间的欧氏距离 $d_{i,f_k(i)}$ 保留,建立点对关系 $\{i, f_k(i)\}_{i=1}^{N_g}$ 。

#### 2.4.2 计算 $\varepsilon_k$ 并更新 $G_{\varepsilon_k}$

根据当前建立的点对关系,计算重叠百分比 $\varepsilon_k$ ,并更新相应的子集 $G_{\varepsilon_k}$ :

$$(\varepsilon_k, G_{\varepsilon_k}) = \arg \min_{\substack{p_i \in P_g \\ \varepsilon_m < \varepsilon \leq 1}} \frac{\sum_{p_i \in P_g} \|R_{k-1} \mathbf{g}_i + t_{k-1} - \mathbf{w}_{f_k(i)}\|_2^2}{|G_g| \varepsilon^{1+\lambda}} \quad (5)$$

根据所保留的欧氏距离 $d_{i,f_k(i)}$ 按升序方式对所有的点对 $\{i, f_k(i)\}_{i=1}^{N_g}$ 进行排序,累加遍历排序后的点对并计算式(4)中的目标函数值,确定最小目标函数值所对应点对在队列中的位置标号 $C_k$ ,用来计算待拼接栅格地图当前最优重叠百分比 $\varepsilon_k = (C_k/N_g)$ ,并使用前 $C_k$ 个点更新子集 $G_{\varepsilon_k}$ ,得以求解出式(5)。

#### 2.4.3 计算刚体变换结果

利用更新后的子集 $G_{\varepsilon_k}$ ,计算最新的刚体变换结果 $(R_k, t_k)$ :

$$(R_k, t_k) = \arg \min_{R, t} \sum_{\mathbf{g}_i \in G_{\varepsilon_k}} \|R \mathbf{g}_i + t - \mathbf{w}_{f_k(i)}\|_2^2 \quad (6)$$

采用简单的最小二乘法计算式(6)。设 $\mathbf{g}_i = (x_i, y_i)^T$ ,  $\mathbf{w}_{f_k(i)} = (x'_i, y'_i)^T$ ,  $N'_g = |G_{\varepsilon_k}|$ ,利用式(6)右边项分别对参数 $(\theta, t_x, t_y)$ 求偏导数,则可获得3个方程,联立上述3个方程求解,即可获得当前最新的刚体变换结果。

以上步骤可重复执行,直到 $|\xi_k - \xi_{k-1}| < \xi$ 或迭代次数 $k$ 到达指定的最大次数 $K$ 则停止迭代,其中 $\xi_k = \sum_{\mathbf{g}_i \in G_{\varepsilon_k}} \|R_k \mathbf{g}_i + t_k - \mathbf{w}_{f_k(i)}\|_2^2 / |G_{\varepsilon_k}| (\varepsilon_k)^{1+\lambda}$ ,可得精确的刚体变换结果 $(\varepsilon_k, R_k, t_k)$ 。该改进ICP算法仍用了原始ICP算法的迭代思想和原理,因此可证明该算法也具有局部收敛性<sup>[21]</sup>。

### 2.5 特征地图融合

由SURF算法和RANSAC算法得出拼接参数后,将地图 $G$ 进行相应的旋转和平移,得到变换后的地图 $T(G)$ 。如果直接将变换后的地图 $T(G)$ 叠加到地图 $W$ 上,可能会出现部分遮挡的情况,则拼接结果难免有误。因此,为了拼接地图的完整性,需要对变换后的地图 $T(G)$ 和 $W$ 进行融合。地图融合前,首先定义一幅用于存放待拼接地图融合结果的空白地图 $L$ ,由地图 $T(G)$ 和 $W$ 直接叠加结果确定地图 $L$ 的尺寸,然后选定基准点,将地图 $W$ 的坐标原点与该点对齐,逐个遍历并确定地图 $L$ 中每个像素的像素值,最后可获得栅格地图的精确拼接结果。

## 3 实验结果

### 3.1 公开数据集实验

本文利用国外学者提供的Ubrement-cartesium和

Fr079 公开数据集对该方法进行测试,验证所提方法的可行性和有效性,并与基于 SIFT 和 SURF 图像配准的方法进行对比。另外,实验时将所选数据集分成两部分用来模拟多移动机器人协作创建栅格地图,并采用文献[24]中的 SLAM 算法创建了用来拼接的栅格地图。所有程序均运行在内存为 4 GB,主频为 3.4 GHz 的 Win7 操作系统电脑上。

图 5 所示分别为 Fr079 和 Ubremen-cartesium 公开数据集生成的待拼接栅格地图,每个数据集生成的 2 张地

图都有重叠。为了验证本文初值分析方法可靠性,可对地图施加不同的旋转角,通过验证得知旋转角的大小不影响栅格地图拼接结果。通过本文方法分别对图 5 所示的两组待拼接栅格地图进行实验,在进行实验时式(1)中控制参数  $\lambda$  取经验值为 2,两种数据集栅格地图用本文所提方法的拼接实验结果如图 6 所示。本文还对 UCMerced 中 2 幅有重叠地图用本文所提算法进行了实验,拼接实验结果如图 7 所示。由实验结果图可知本文所提方法实现地图拼接的效果良好。

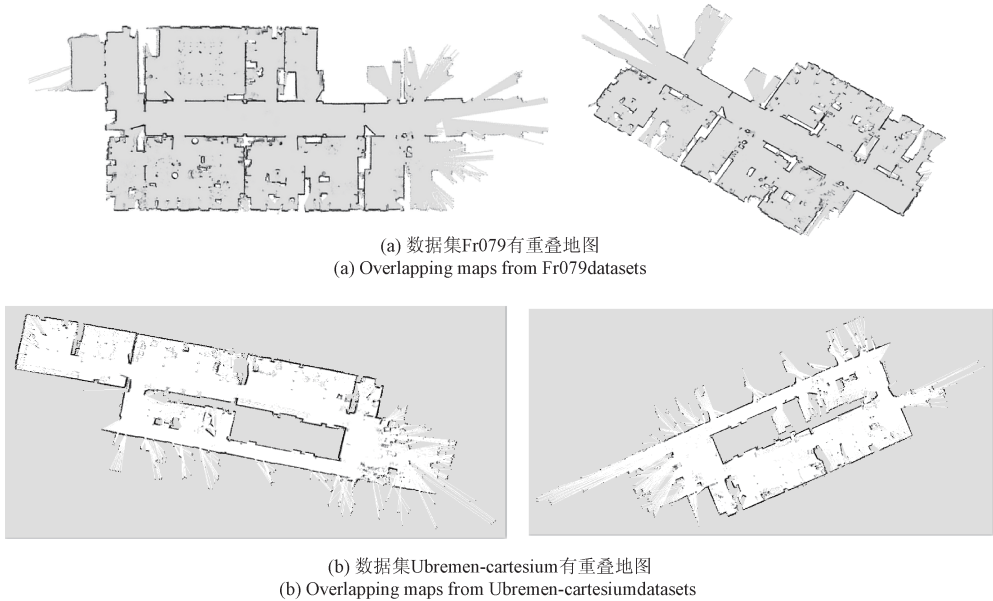


图 5 两组待拼接的栅格地图  
Fig. 5 Two sets of grid maps used to merge

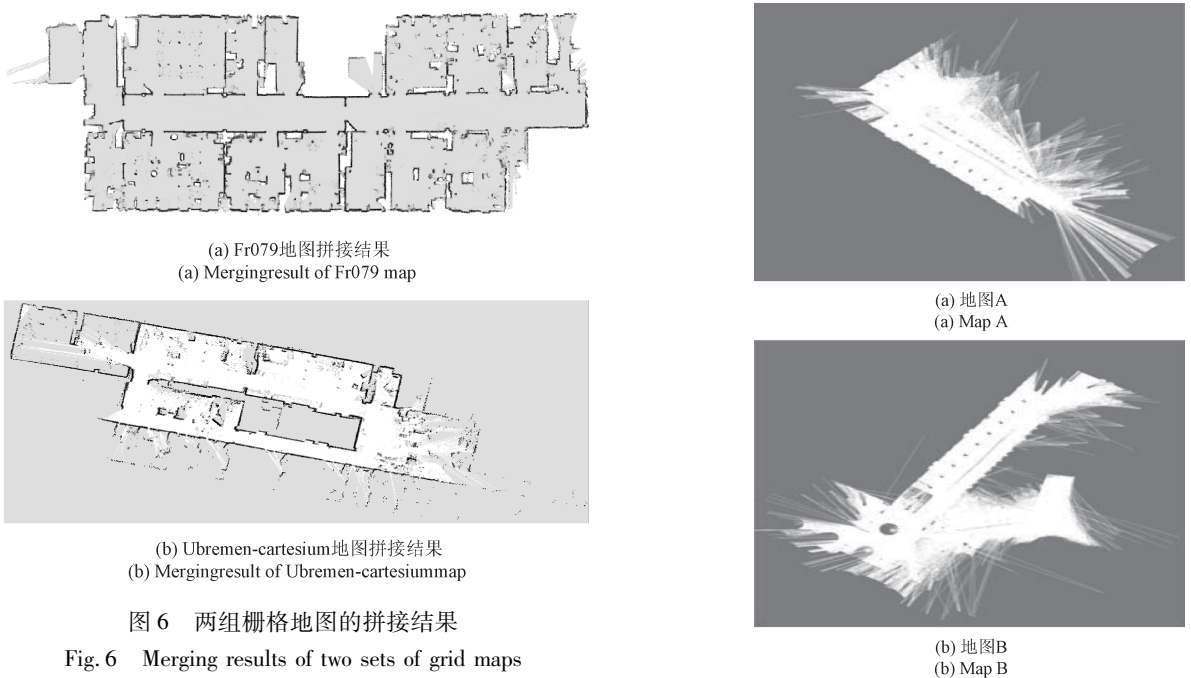
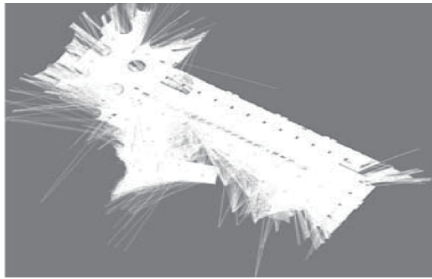


图 6 两组栅格地图的拼接结果  
Fig. 6 Merging results of two sets of grid maps



(c) 地图拼接结果  
(c) Result of map merging

图 7 UCMerced 地图拼接结果

Fig. 7 Merging result of UCMerced map

表 1 和 2 记录了基于 SIFT、SURF 和本文算法得到的特征点数、匹配对数、检测时间及完成拼接所需要的总时间,在进行本实验时此 3 种方法的匹配阈值都设为 0.7。从表中可知,基于 SURF 的图像配准得到的特征点数、匹配点数较基于 SIFT 算法有所减少,运算速度较快,由本文算法得到的特征点数、匹配点数则进一步减少,速度更快。从实验结果可知本文所提出的改进 SURF 算法采用了 Harris 算子提高了特征检测速度,同时去除了一些无用的特征点减少了匹配点数,整个图像拼接时间进一步减少,在保证正确匹配的情况下运算速度也得到了提高,可适用于较大规模环境地图的拼接。图 8 和图 9 分别为 Fr079 和 Ubremen-cartesium 数据集地图匹配结果对比图,图中特征之间的对应关系用连线代表,但有些关系中有一些是虚假或者是错误的特征对,很明显图 8(a) 和 (b) 特征对应关系中有不少误匹配情况,如图 8(c) 所示

基于本文方法大大减少了误匹配数量,但 1、2 号特征对所在的地方不存在重叠区域,这 2 个特征所属的对应关系是错误的,同样在图 9 中也存在此种情况,在后期处理时可以根据本文方法利用 RANSAC 算法分析初始拼接参数,剔除无效的特征对得到有效的特征对,如果待拼接地图中有一些无关信息(如噪声)也可通过本文方法进行处理,将新得到拼接参数作为 ICP 算法的初始值,最终通过融合方法获得精确的栅格地图拼接结果,同时对尺度、光照及视角差异等复杂变化也具有较好的鲁棒性。

通过公开数据集实验可知,本文所提出的栅格地图拼接方法能可靠的完成栅格地图拼接,并具有较快的运行速度和较高的精度,方法有效可行。

表 1 Fr079 数据集地图匹配数据统计

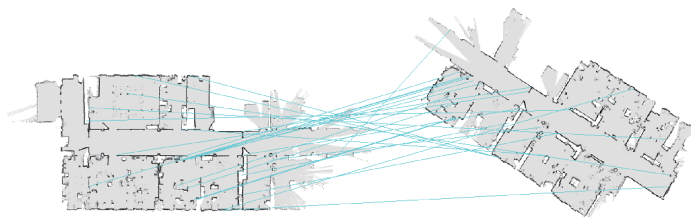
Table 1 Data statistics of Fr079 datasets map matching

算法	特征点数	匹配点数	检测时间/s	总时间/s
基于 SIFT	450	30	2.075	5.002
基于 SURF	441	27	0.985	3.226
本文算法	424	12	0.356	2.092

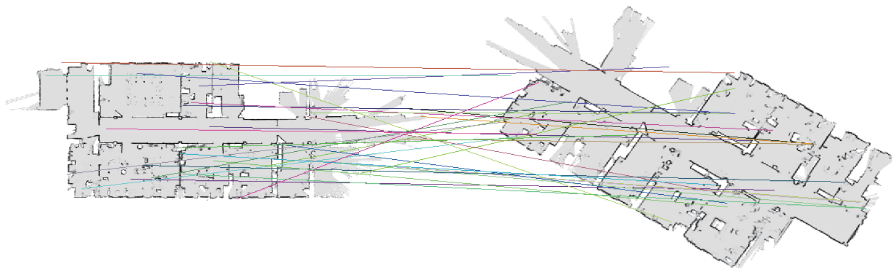
表 2 Ubremen-cartesium 数据集地图匹配数据统计

Table 2 Data statistics of Ubremen-cartesium datasets map matching

算法	特征点数	匹配点数	检测时间/s	总时间/s
基于 SIFT	543	34	2.582	5.811
基于 SURF	536	26	1.212	4.137
本文算法	521	15	0.432	2.326



(a) 基于 SIFT 算法  
(a) Based on SIFT algorithm



(b) 基于 SURF 算法  
(b) Based on SURF algorithm

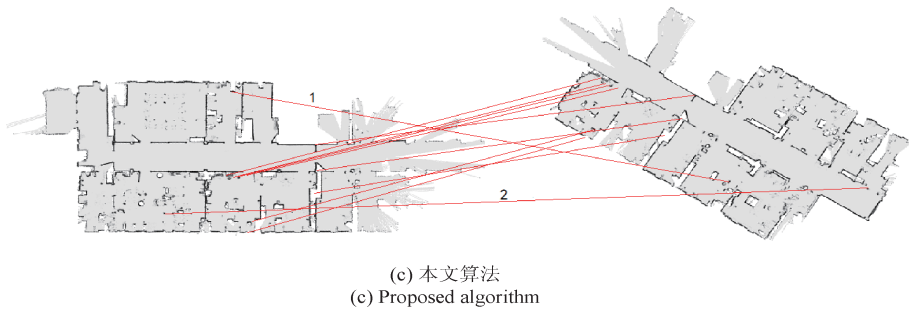
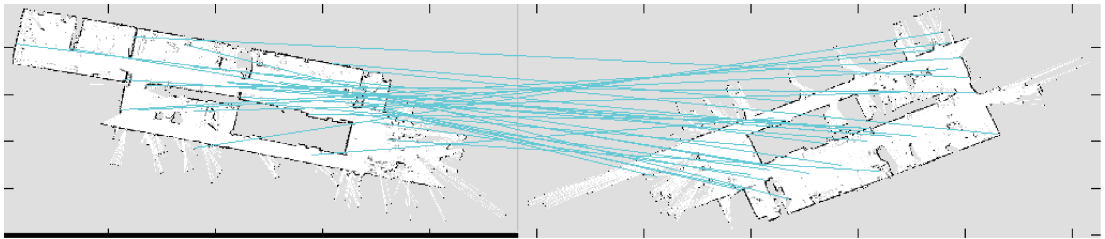
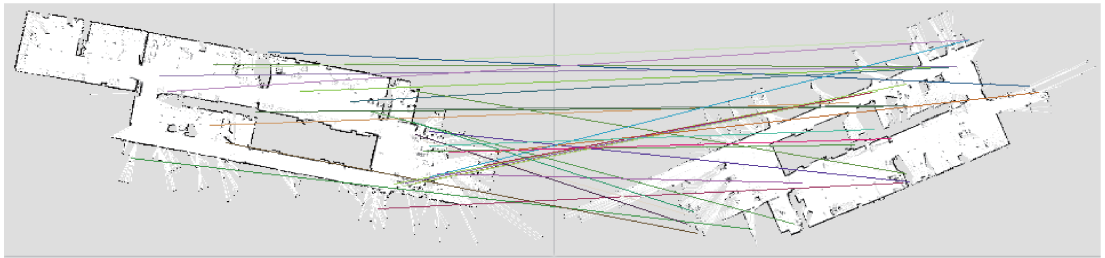


图 8 Fr079 数据集地图匹配结果对比

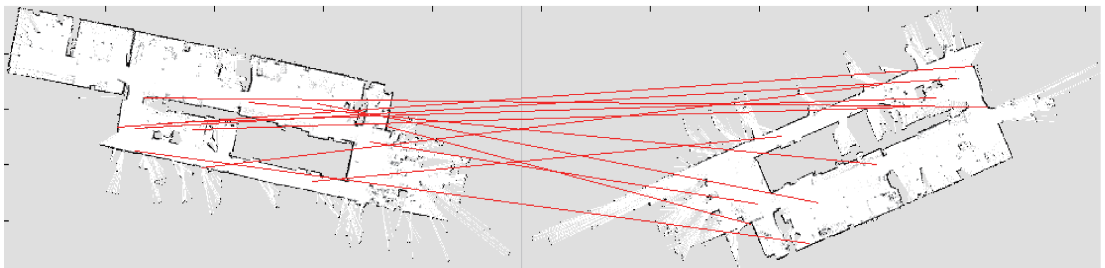
Fig. 8 Comparison of Fr079 datasets map matching results



(a) 基于SIFT算法  
(a) Based on SIFT algorithm



(b) 基于SURF算法  
(b) Based on SURF algorithm



(c) 本文算法  
(c) Proposed algorithm

图 9 Ubremen-cartesium 数据集地图匹配结果对比

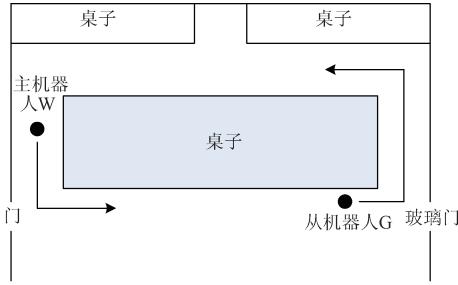
Fig. 9 Comparison of Ubremen-cartesium datasets map matching results

### 3.2 移动机器人实验

在现有的实验条件下采用 Turtlebot2 移动机器人,移动底座 Kobuki 的最大移动速度为 0.7 m/s,最大角速度为 180°/s。采用 ThinkPad E450C,内存为 4 G 的笔记本电脑作为移动机器人的控制器。本实验在 Ubuntu14.04 版本中采用 ROS (robot operating system) 机器人操作系统

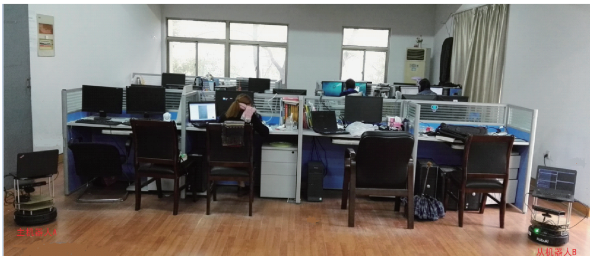
indigo14.04 版本,ROS 提供的 gmapping 包是用来生成地图的,它是对著名的开源 OpenSlam 包在 ROS 框架下的一个实现。这个包提供了对激光设备的 SLAM,根据激光设备的输入和姿态数据从而建立一个基于网格的 2D 地图,本实验中 turtlebot2 可以利用 kinect 传感器的深度信息模拟激光数据进行二维栅格地图的创建。

图 10(a)所示为多机器人实验场景示意图,图中的箭头方向为实验时移动机器人按逆时针移动的方向,图 10(b)所示为实验真实场景。图 10(b)为 2 台 Turtlebot2 移动机器人,设其中 1 台为主机器人命名为机器人 A,它所创建的栅格地图命名为 map\_W 如图 11(a)所示,另一台为从机器人命名为机器人 B,它所创建的栅格地图命名为 map\_G 如图 11(b)所示。图 10(c)所示为机器人正在创建 SLAM 栅格地图,笔记本电脑屏幕中间为 RViz 可视化界面显示正在创建栅格地图。在同一个实验环境下利用 2 台移动机器人分别建立栅格地图,从机器人所创建的栅格地图发送到主机器人并与主机器人创建的地图进行拼接,得到拼接结果如图 11(c)所示。需要注意的是机器人的移动速度不能太快,否则容易丢失深度信息导致所创建的栅格地图不准确。如果是 3 台或 3 台以上的机器人进行地图拼接时需要分别与主机器人进行地图拼接最后建立好全局地图。



(a) 实验场景示意图

(a) Schematic diagram of the experimental scene



(b) 实验真实场景

(b) The experimental real scene



(c) 移动机器人正在创建栅格地图

(c) The mobile robot creating a grid map

图 10 移动机器人创建栅格地图实验

Fig. 10 The experiment of creating grip map of mobile robot



(a) 机器人A所创建栅格地图map\_W

(a) Grid map W is created by robot A



(b) 机器人B所创建栅格地图map\_G

(b) Grid map G is created by robot B



(c) 机器人栅格地图拼接结果

(c) Merging result of grid map by robot

图 11 机器人栅格地图拼接实验结果

Fig. 11 Experimental result of grid map merging by robot

## 4 结 论

本文提出了一种基于 SURF 特征的多机器人栅格地图拼接方法,利用图像配准问题建立最小化问题的数学模型,并用改进 ICP 算法求解目标函数,初始拼接参数采用 SURF 特征和 RANSAC 算法分析求解,同时本文将 SURF 与 Harris 算法的优点相结合进行了改进,提高了算法效率以更适用于在机器人控制器上进行运算处理。本文分别进行了公开数据集实验和移动机器人 Turtlebot2 实验,实验结果表明,该方法可将两幅局部栅格地图拼接成一幅全局栅格地图,拼接效果好、速度较快和精度较



高。该算法在保持 SIFT 特征提取高鲁棒性的同时加快了检测速度,可用于较大规模环境栅格地图拼接,同时对机器人控制系统主机配置要求较低,具有较高的可靠性和实用性。利用本方法还可实现三幅及多幅地图的拼接,还可用于处理非栅格地图的拼接问题,比如无人机图像拼接。本文研究的是二维栅格地图拼接问题,后续在完善本文方法的基础上重点研究三维点云地图拼接方法。

## 参考文献

- [ 1 ] 戴雪梅,郎朗,陈孟元. 强跟踪平方根容积分卡尔曼滤波 SLAM 算法[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(10): 1493-1499.
- DAI X M, LANG L, CHEN M Y. Strong tracking square-root cubature Kalman filter based on SLAM algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2015,29(10):1493-1499.
- [ 2 ] MUR-ARTAL R, MONTIEL J M, TARDOS J D. ORB-SLAM: A versatile and accurate monocular SLAM system[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(5): 1147-1163.
- [ 3 ] 梁明杰, 闵华清, 罗荣华. 基于图优化的同时定位与地图创建综述[J]. 机器人,2013,35(4):500-512.
- LIANG M J, MIN H Q, LUO R H. Graph-based SLAM: A survey[J]. Robot,2013,35(4):500-512.
- [ 4 ] 付梦印, 吕宪伟, 刘彤, 等. 基于 RGB-D 数据的实时 SLAM 算法[J]. 机器人,2015,37(6):683-692.
- FU M Y, LV X W, LIU T, et al. Real-time SLAM algorithm based on RGB-D data [ J ]. Robot, 2015, 37(6):683-692.
- [ 5 ] 祝继华, 郑南宁, 袁泽剑, 等. 基于中心差分粒子滤波的 SLAM 算法 [ J ]. 自动化学报, 2010, 6 ( 3 ): 249-257.
- ZHU J H, ZHENG N N, YUAN Z J, et al. A SLAM algorithm based on central difference particle filter [ J ]. Acta Automatica Sinica,2010, 36(2): 249-257.
- [ 6 ] 朱奇光, 张朋珍, 李昊立, 等. 基于全局和局部特征融合的图像匹配算法研究 [ J ]. 仪器仪表学报,2016, 37(1):170-176.
- ZHU Q G, ZHANG P ZH, LI H L, et al. Investigation on the image matching algorithm based on global and local feature fusion [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016,37(1):170-176.
- [ 7 ] 李朕阳, 郎朗, 陈孟元. 基于 SR-CKF 的相对方位多机器人协同定位算法 [ J ]. 电子测量与仪器学报,2016, 30(7): 1107-1113.
- LI ZH Y, LANG L, CHEN M Y. Relative position cooperative localization algorithm of multi-robot based on SR-CKF [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2016,30(7):1107-1113.
- [ 8 ] GOUVEIA B D, PORTUGAL D, SILVA D, et al. Computation sharing in distributed robotic systems: A case study on SLAM [ J ]. IEEE Transactions on Automation Science And Engineering, 2015, 12 ( 2 ): 410-422.
- [ 9 ] HOLLINGER G A., YERRAMALLI S, SINGH S, et al. Distributed data fusion for multirobot search [ J ]. IEEE Transactions on Robotics. 2015,31(1):55-66.
- [ 10 ] CARPIN S. Fast and accurate map merging for multi-robot systems [ J ]. Autonomous Robots, 2008, 25 ( 3 ): 305-316.
- [ 11 ] SAEEDI S, PAULL L, TRENTINI M, et al. Map merging using hough peak matching [ C ]. Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012: 4683-4688.
- [ 12 ] GORKEM E, CARPIN S. Anytime merging of appearance-based maps [ J ]. Auton Robot,2014, 36(3):241-256.
- [ 13 ] LEE H C, CHAO Y J, LEE B H. Accurate map merging with virtual emphasis for multi-robot systems [ J ]. Electronics Letters, 2013,49(15):1213-1214.
- [ 14 ] LEE H C, ROH B S, LEE B H. Multi-hypothesis map merging with sinogrm-based PSO for multi-robot systems [ J ]. Electronics Letters, 2016, 52 ( 14 ): 1213-1214.
- [ 15 ] 孙荣川, 马书根, 李斌, 等. 基于分治法的同步定位与环境采样地图创建 [ J ]. 自动化学报, 2010, 36(12): 1697-1705.
- SUN R CH, MA SH G, LI B, et al. Simultaneous localization and sampled environment mapping based on a divide-and-conquer ideology [ J ]. Acta Automatica Sinica, 2010,36(2): 1697-1705.
- [ 16 ] 刘利枚, 蔡自兴. 多机器人地图融合方法研究 [ J ]. 小型微型计算机系统,2012, 33(9): 1934-1937.
- LIU L M, CAI Z X. Study on map merging for multi-robots [ J ]. Journal of Chinese Computer Systems, 2012, 33(9): 1934-1937.
- [ 17 ] 潘薇, 蔡自兴, 陈白帆. 复杂环境下多机器人协作构建地图的方法 [ J ]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(1): 143-148.
- PAN W, CAI Z X, CHEN B F. An approach to cooperative multi-robot map building in complex environments [ J ]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition,2010,42(1):143-148.
- [ 18 ] 马昕, 宋锐, 郭睿, 等. 基于免疫自适应遗传算法的机器人栅格地图融合 [ J ]. 控制理论与应用, 2009, 26(9):1004-1008.

- MA X, SONG R, GUO R, et al. Immune adaptive genetic algorithm for occupancy grid maps merging[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(9): 1005-1008.
- [19] 贾松敏, 李雨晨, 王可, 等. RTM 框架下基于分层拓扑结构的多机器人系统地图拼接[J]. 机器人, 2013, 35(3): 292-298.
- JIA S M, LI Y CH, WANG K, et al. Map merging for multi-robot systems based on hierarchical topology structure under RTM framework [J]. Robot, 2013, 35(3): 292-298.
- [20] 朱奇光, 王佳, 张朋珍, 等. 基于高斯矩改进 SURF 算法的机器人定位研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2451-2457.
- ZHU Q G, WANG J, ZHANG P ZH, et al. Research on mobile robot localization based on Gaussian moment improved SURF algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11): 2451-2457.
- [21] 祝继华, 周颐, 王晓春, 等. 基于图像配准的栅格地图拼接方法[J]. 自动化学报, 2015, 41(2): 285-294.
- ZHU J H, ZHOU Y, WANG X CH, et al. Grid map merging approach based on image registration [J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(2): 285-294.
- [22] 潘梅, 李磊民. 基于改进 Harris-SURF 的无人机图像快速拼接[J]. 微型机与应用, 2014, 33(15): 43-46.
- PAN M, LI L M. Fast UAV image mosaic based on improved Harris-SURF [J]. Microcomputer & its Applications, 2014, 33(15): 43-46.
- [23] LEBEDA K, MATAS J, CHUM O. Fixing the locally optimized RANSAC[C]. Proceedings of the 23rd British Machine Vision Conference, 2012: 1-11.
- [24] 祝继华, 郑南宁, 袁泽剑, 等. 基于 ICP 算法和粒子滤波的未知环境地图创建[J]. 自动化学报, 2009, 35(8): 1107-1113.
- ZHU J H, ZHENG N N, YUAN Z J, et al. A SLAM approach by combining ICP algorithm and particle filter[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(8): 1107-1113.

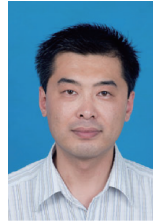
### 作者简介



**唐宏伟**, 2006 年于湖南工业大学获得学士学位, 2009 年于辽宁科技大学获得硕士学位, 现为湖南大学博士生、邵阳学院讲师, 主要研究方向为多机器人 SLAM 与导航技术。

E-mail: thwei2008@126.com

**Tang Hongwei** received B. Sc. from Hunan University of Technology in 2006, and M. Sc. from University of Science and Technology Liaoning in 2009, respectively. Now he is a Ph. D. candidate in Hunan University and a lecturer in Shaoyang University. His main research interest includes multi-robot SLAM and navigation technology.



**孙伟**, 分别在 1996 年、1999 年、2003 年于湖南大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为湖南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为机器人智能控制、机器人视觉伺服和鲁棒控制。

E-mail: david-sun@126.com

**Sun Wei** received B. Sc., M. Sc., and Ph. D. all from Hunan University in 1997, 1999 and 2003, respectively. Now he is professor and Ph. D. supervisor in Hunan University. His main research interest includes robot intelligent control, robot visual servoing and robust control.