

基于地面特征点匹配的无人驾驶车全局定位

方 辉¹, 杨 明², 杨汝清¹

(1. 上海交通大学机器人研究所, 上海 200240; 2. 上海交通大学自动化系, 上海 200240)

摘要: 针对室外环境特点, 设计将摄像机安装在车辆底部, 提出一种基于地面特征点的地图匹配法以获取车辆定位信息. 定位方法分为两步: (1) 手动控制车辆在环境中运行, 保存 RTK (real-time kinematic)-GPS、里程计和摄像机等传感器数据, 离线自动创建地面特征点地图, 并利用一种特殊的地图组织方式来提高地图搜索和匹配效率; (2) 利用地图匹配对车辆进行定位, 其中采用一种基于 M 估计加权 ICP (iterative closest point) 算法的特征点对应和匹配参数求解方法, 并进一步采用 UKF (unscented Kalman filter) 算法融合地图匹配和航位推算的结果以提高定位鲁棒性. 实验结果表明了该方法的有效性.

关键词: 无人驾驶车辆; 全局定位; 地图匹配; ICP 算法; UKF 数据融合
中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A

Ground Feature Point Matching Based Global Localization for Driverless Vehicles

FANG Hui¹, YANG Ming², YANG Ruqing¹

(1. Research Institute of Robotics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Vehicle localization is achieved by a ground feature points based map matching approach, in which a camera is fixed downward on the bottom of the vehicle according to the outdoor environmental conditions. The proposed approach includes two steps: (1) a vehicle is manually controlled to move in an environment, recording sensor data from RTK (real-time kinematic)-GPS, odometry and camera to produce a ground feature point map automatically in an off-line manner. A special map organization is used to increase the efficiency of map search and matching. (2) vehicle localization is realized by map matching method, in which a M-estimator weighted ICP (iterative closest point) algorithm is utilized to match feature points and compute matching parameters. Furthermore, map matching result is fused with dead-reckoning by UKF (unscented Kalman filter) to achieve higher robustness. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: driverless vehicle; global localization; map matching; ICP (iterative closest point) algorithm; UKF (unscented Kalman filter) data fusion

1 引言 (Introduction)

无人驾驶车辆, 也称为智能车, 是室外轮式移动机器人在交通领域的重要应用. 在智能车的研究中, 全局定位 (即位姿估计) 是其中的一项重要内容. 可靠的定位信息是实现车辆导航的前提. 本文的研究目的是为智能车在城市环境中某些场所 (如大型广场、公园、机场等) 下的应用设计一种可靠有效的全局定位方法, 以利于提供智能化的区内交通服务.

在室外环境中, 全局定位通常借助 GPS 实现^[1]. 但是普通 GPS 系统的定位精度较差, 无法满足智能车导航的要求, 而高性能的 RTK-GPS 虽然精度较高, 但目前价格仍然较为昂贵, 如果给每辆车配备

一个 RTK-GPS 的话, 成本往往难以承受.

另一种较常用的全局定位方法是地图匹配^[2]. 这种方法将当前采集的传感器信息与已知的环境地图进行匹配以求得车辆定位信息. 同时定位和地图创建 (SLAM)^[3-4] 是一种比较流行的方法, 较多应用于预先未知的环境. 但这类方法比较适合于小范围区域, 而在大范围环境下往往得不到理想的效果. 因此本文将地图创建和定位分开, 先创建地图, 然后再将地图用于定位. 其中 RTK-GPS 只用于地图创建阶段, 之后可将所建地图共享于不同智能车以完成基于地图匹配的全局定位. 因此本方法只需要一套 RTK-GPS 系统即可, 大大节约了成本.

在地图匹配方法中另一个需要着重考虑的是环

境特征的选择. 用摄像机采集环境信息虽然具有信息量丰富、器件价格便宜等优点,但在室外环境下,它容易受光照条件的影响. 这一点很可能会影响地图匹配的有效性. 比如地图创建前后,光照条件不同会使得由图像处理所提取出的特征信息也不同,从而导致地图匹配失效. 另外,太阳在路面上的镜面反射会造成传感器过曝,建筑物和树木产生的大量阴影也会降低视觉检测的可靠性. 针对这个问题,本文设计将摄像机安装在智能车底部,如图1所示,利用车辆自身的阴影和车辆底部安装的辅助光源,在其下方形成一个光照可控的区域以保证采集图像的亮度一致性,同时也可消除周围运动物体的影响. 针对这种硬件安装方式,地图匹配采用地面特征点作为环境信息. 特征点包括特征点本身及其邻域信息. 特征点可为边缘点或角点等,邻域信息包括特征点梯度方向及邻域灰度信息. 本方法针对的应用场景,如广场、公园、机场等,其地面往往具有较明显的信息,如图2所示,一般可提取出足够的特征点用于地图匹配.

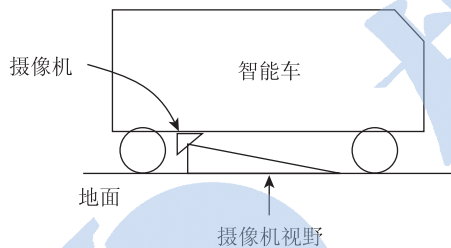


图1 摄像机安装方式
Fig.1 Camera configuration



图2 地面信息
Fig.2 Ground information

本文中地图存储采用了一种特殊的组织方式以提高地图搜索和匹配的效率. 地图匹配基于特征点之间的匹配,采用一种M估计加权ICP算法以获得可靠的特征点对应关系并进行匹配参数求解. 此外,考虑到地图匹配存在一定误差,并且环境中某些区域可能存在地面特征不充足的情况,采用UKF算法

将地图匹配结果与航位推算进行融合. 实验结果验证了本文所提方法的有效性.

2 坐标系统及车辆运动方程(Coordinate system and vehicle motion equations)

2.1 坐标系统

车辆定位信息也称为车辆位姿,用其在全局坐标系 $X_w O_w Y_w$ 下的位置和朝向表示,记为 (x, y, θ) ,如图3所示. 其中 $X_v O_v Y_v$ 表示车辆坐标系.

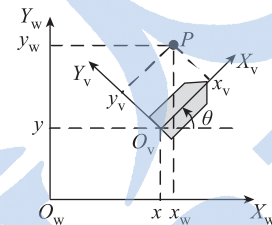


图3 坐标系统

Fig.3 Coordinates system

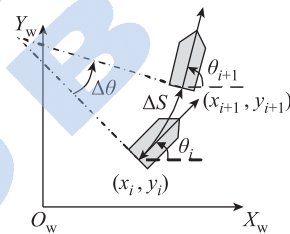


图4 车辆运动模型

Fig.4 Vehicle motion model

图3中环境特征点 P 在全局坐标系和车辆坐标系之间的关系可用下式表示:

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_v \\ y_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 (x_w, y_w) 和 (x_v, y_v) 分别为 P 点在全局坐标系下和车辆坐标系下的坐标.

2.2 车辆运动方程

本文研究中所用的无人驾驶车可通过后轮驱动电机和前轮转向电机来控制其运动. 运动过程中的位姿关系如图4所示,根据其中的几何关系可得如下方程:

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \\ \theta_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i + \Delta S \cdot \cos(\theta_i + \Delta\theta/2) \\ y_i + \Delta S \cdot \sin(\theta_i + \Delta\theta/2) \\ \theta_i + \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $\Delta S, \Delta\theta$ 分别为相邻时刻间车辆运行的距离和转角,为车辆里程值,可由安装在相应位置的光电编码器获得.

3 地面特征点地图创建 (Ground feature point mapping)

使用地图匹配法的前提是需要创建全局地图。由于摄像机安装在车底，采集的是地面信息，因此需要建立地面特征点地图。在地图创建中使用的传感器包括 RTK-GPS、里程计和摄像机。

3.1 地图组织方式

地图组织方式如表 1 所示，根据数据采集过程中所记录的时间标记将车辆位姿和对应的某一帧图像（经特征提取后）进行组合来建立地图。表中 $m_i = \{X_i, F_i\}$ 称为一个地图帧； X_i 代表车辆位姿； $F_i = \{ \text{地图帧中心位置, 特征点, 特征点梯度方向及邻域灰度信息} \}$ 表示一帧地面特征信息。地图帧中心位置是指地图帧中心在全局坐标系下的位置，用于地图搜索；特征点可为角点或边缘点等，并由摄像机标定结果将其坐标值变换到车辆坐标系下；特征点梯度方向及邻域灰度信息通过相应的图像处理获得，其中邻域范围可根据具体情况进行选择。另外，选择视频帧率随车辆运行速度的变化而变化以保证所建地图能够覆盖所需要的区域。整个地图可表示为： $m_{\text{map}} = \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_i, \dots\}$ 。

表 1 地图组织方式
Tab.1 Map organization

地图帧	车辆位姿	地面特征
m_1	X_1	F_1
m_2	X_2	F_2
m_3	X_3	F_3
\vdots	\vdots	\vdots
m_i	X_i	F_i
\vdots	\vdots	\vdots

3.2 车辆位姿获取

在地图创建中，为解决 RTK-GPS 低输出频率以及无车辆朝向信息等缺点，采用 UKF 算法 [5] 将 RTK-GPS 信息和航位推算进行融合。系统状态方程参照式 (2) 获得（加入适当状态误差），代表车辆航位推算的结果，系统观测方程如下：

$$Z_{i+1} = \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

融合过程中，RTK-GPS 提供车辆的位置信息 (x_{i+1}^*, y_{i+1}^*) 。上式中的 v_k ($k = 1, 2$) 代表观测误差，反映 RTK-GPS 所提供的位置信息的误差大小。UKF 算法的具体过程可参考文 [5]。

4 基于地图匹配的全局定位 (Map matching based global localization)

当创建完地图后，所建地图即可共享于不同车辆以解决全局定位问题（可进一步考虑采用离线地图优化技术提高地图精度）。地图匹配如图 5 所示。A 帧代表定位过程中当前采集的图像帧经特征点提取后的数据，其对应的车辆位姿 (x, y, θ) 由式 (2) 根据前一时刻的位姿信息预估。由于所建地图已覆盖了所要求的区域，因此 A 帧必定与某一地图帧具有最大的公共区域，设这一地图帧为图中所示的 B 帧，其对应的车辆位姿为 X 。图中的灰色区域为 A 帧和 B 帧之间的公共区域，其中包含有公共特征点。由于预估的车辆位姿 (x, y, θ) 含有误差，导致在同一坐标系下 A 帧和 B 帧中的公共特征点并不重合，而是存在一定偏移（图中公共区域内的圆和三角形）。偏移量大小反映了预估车辆位姿的不准确程度。因此，如果可以求得偏移量，则可根据偏移量反过来纠正预估位姿而得到车辆位姿的准确值。本文正是根据这一思想来进行车辆定位，其中偏移量的求取采用了 M 估计加权 ICP 算法。

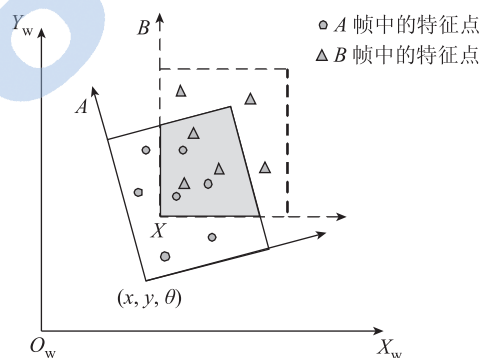


图 5 地图匹配示意图

Fig.5 Illustration of map matching

4.1 确定参考地图帧

地图匹配的第一步是从地图中搜索出一个最佳地图帧与当前图像帧进行匹配，设此地图帧为参考地图帧（即图 5 中的 B 帧）。参考地图帧应该和当前图像帧具有最大公共区域，以使得两者具有最多的公共特征点。参考地图帧确定方法为：首先根据预估的车辆位姿由式 (1) 确定当前图像帧中心点在全局坐标系下的位置，称为图像帧中心位置；然后在各地图帧中选择地图帧中心位置和图像帧中心位置最为接近的地图帧作为参考地图帧。

根据车辆预估位姿搜索参考地图帧的方法避免了在不同位置地面信息的相似性可能带来的地图搜索不确定问题。另外，由于车辆运行的连续性，对当

前参考地图帧的搜索可在上一参考地图帧某一邻域范围内进行。

4.2 特征点匹配策略

地图匹配为当前图像帧和参考地图帧之间进行的匹配, 其中的关键在于获得特征点之间的对应关系。

参考图 5, 在匹配开始前, 先根据 B 帧位姿 \mathbf{X} 和预估车辆位姿 (x, y, θ) 之间的关系, 将 B 帧变换到 (x, y, θ) 处, 记为 B^* (注意同时也需要将 B 帧中的特征点梯度方向和邻域灰度信息作相应的旋转变换)。对 A 帧中的某一特征点 P , 搜索其在 B^* 中的对应点的过程为:

1) 估计车辆预估位姿的大概误差范围, 并由这一范围确定 B^* 中的搜索区域, 这一区域内的特征点集合记为 R_1 ; 如果 R_1 为空, 则返回。

2) 假设 P 点的梯度方向为 \mathbf{a} , 则在 R_1 中进一步确定满足关系 $|\mathbf{a} - \mathbf{b}| < D$ 的特征点集合 R_2 , 其中 \mathbf{b} 为 R_1 中某一特征点的梯度方向, D 为预设阈值; 如果 R_2 为空, 则返回。

3) 在集合 R_2 中选择某一特征点 P^* 作为 P 的对应点, 满足条件: P^* 和 P 具有最相似的邻域灰度信息并且其相似度大于某一阈值。相似度计算可采用传统的灰度相关法。

4.3 基于 M 估计加权 ICP 算法的车辆定位

所要求取的偏移关系为 2 维平面内 (地平面) 的欧氏变换关系, 设其为 (t_r, t_x, t_y) , 其中 t_r 表示旋转分量, t_x, t_y 表示平移分量。本文采用 ICP 算法^[6] 求解这一偏移量。

由于存在各种误差, 由上节方法确定的对应点也可能并非真正对应点, 因此在 ICP 算法中引入 M 估计加权系数来抑制错误对应点的影响。假设共确定出 n 对对应点 $\{(P_i, P_i^*)\}$, $i = 1, \dots, n$, 则加权 ICP 算法的最小化目标函数定义为:

$$E(t_r, t_x, t_y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i (\mathbf{R} \cdot P_i + \mathbf{T} - P_i^*)^2$$

其中:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos t_r & -\sin t_r \\ \sin t_r & \cos t_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = [t_x, t_y]^T$$

λ_i 为 M 估计加权系数, 定义为:

$$\lambda_i = \begin{cases} 1, & |e_i| \leq \mu + \sigma \\ \sigma/|e_i|, & \mu + \sigma < |e_i| \leq \mu + 3\sigma \\ 0, & \mu + 3\sigma < |e_i| \end{cases}$$

其中 $|e_i|$ 为第 i 对对应点之间的距离误差, μ, σ 分别为所有对应点之间误差的均值和标准差。

目标函数可通过最小二乘原理求得闭解, 并可通过迭代获得精确解。在每一步迭代中都需要根据上一步计算结果来重新寻找特征点之间的对应关系, 其算法过程如图 6 所示。车辆预估位姿的误差相对较小, 可设偏移量的初始值为 $(0,0,0)$ 。

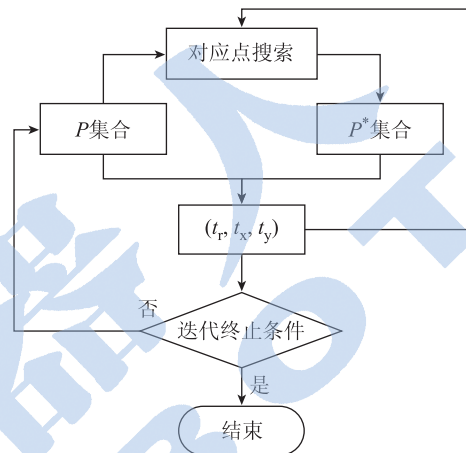


图 6 ICP 算法示意图

Fig.6 Illustration of ICP algorithm

根据精度要求控制迭代中止条件可求得匹配参数, 即偏移量 (t_r, t_x, t_y) 。根据坐标转换关系, 纠正偏移量后的车辆新位姿为:

$$\begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ \theta^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

5 UKF 融合 (UKF fusion)

在实际过程中地图匹配将会存在一定误差, 并且环境中某些区域可能存在地面特征不充足的情况, 因此采用 UKF 算法^[5] 将地图匹配与航位推算进行融合。系统状态方程参照式 (2) 获得 (加入适当状态误差), 代表车辆航位推算的结果, 系统观测方程如下:

$$\mathbf{G}_{i+1} = \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \\ \theta_{i+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix}$$

融合过程中的观测值由式 (3) 提供, 代表地图匹配的结果, 设其误差 w_h ($h = 1, 2, 3$) 为均值为 0、误差协方差为 \mathbf{W} 的高斯误差。 \mathbf{W} 可通过离线调整获得。具体 UKF 算法过程可参考文 [5]。

需要说明的是, 如果以下任一条件满足, 则认为地图匹配结果不可靠, 需将观测误差协方差 \mathbf{W}

设置为一个较大的值：a) ICP 迭代次数达到所设置的最大值，说明迭代过程难以收敛，计算结果不可靠。b) 匹配结束后，在同一坐标系下对应特征点之间误差的均值及标准差大于某一阈值。这一情况说明匹配结果仅为局部最小值。c) 匹配结束后，所确定的对应特征点数目小于某一阈值（如 20）。对应点过少会使 ICP 算法对误差的鲁棒性不强，结果有可能受噪声影响较大。

6 实验及分析 (Experiments and analysis)

实验用车辆为一辆无人驾驶智能车，采用 Nav-Com 公司提供的 NTC2030W 系统作为 RTK-GPS 进行地图创建，它具有 $\pm 1\text{ cm}$ 的静态定位精度和 5 Hz 的输出频率，如图 7 所示。视频数据由一款安装在车辆底部的 USB 摄像头采集。里程计数据由安装在车辆后轮驱动电机和前轮转向电机上的光电编码器获得。编码器精度经 DSP 4 倍频后分别为 8000 脉冲/转和 4000 脉冲/转。较高的编码器精度可获得较准确的里程计数据，使得预估的车辆位姿也较准确，从而提高地图匹配的可靠性。车辆运行速度为 2 ~ 4 m/s。实验场景为校园内某一广场，如图 8 所示。



图 7 智能车及 RTK-GPS
Fig.7 Intelligent vehicle and RTK-GPS



图 8 实验环境
Fig.8 Experiment environment

提取地面特征是本文定位方法中的重要一步，实验中提取的特征点为 Harris 角点，其邻域信息包括梯度方向和邻域灰度信息。图 9 中左图为采集图像，右图为先将图像根据摄像机标定结果进行逆透视变换，然后再提取特征后的结果，其中“o”代表 Harris 角点，箭头方向代表梯度方向，灰度信息选择角点周围 11×11 范围的邻域像素值。

图 10 为某一图像帧和相应参考地图帧显示在同一坐标系下的情况，其中“o”代表图像帧 Harris 角点，“△”代表参考地图帧 Harris 角点。ICP 匹配算法的目的就是要求取两者公共区域内对应角点之间的偏移关系。图 11 是相应的 ICP 匹配结果，可看出该算法在目标函数以及每一个偏移分量的求取上都具有较好的收敛性。根据实验情况，ICP 算法一般迭代 10 次以内就会收敛。

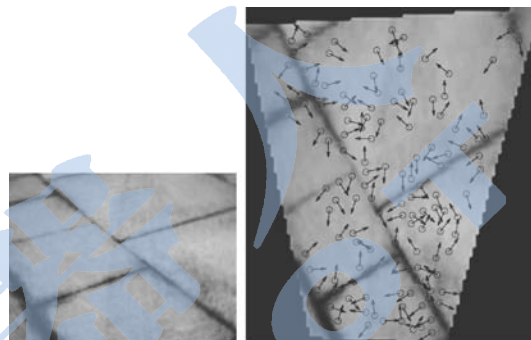


图 9 特征点提取

Fig.9 Feature point extraction

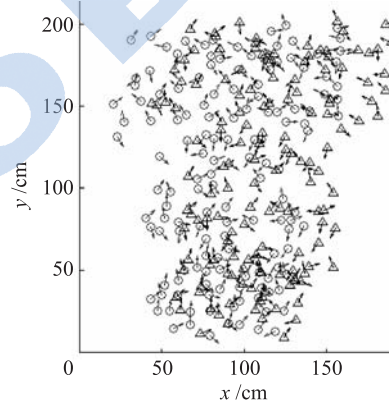


图 10 图像帧和参考地图帧

Fig.10 Image frame and reference map frame

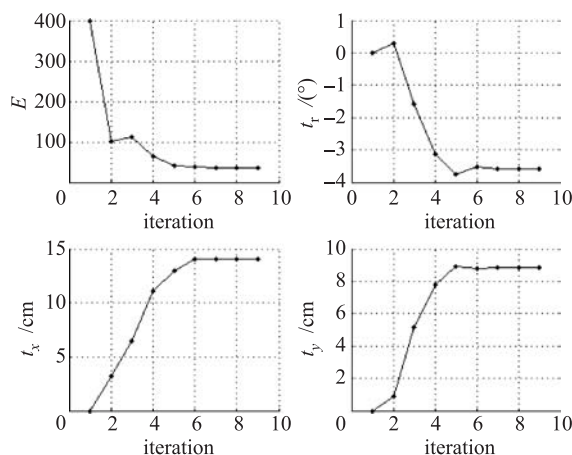


图 11 ICP 算法结果

Fig.11 Results of ICP algorithm

接下来讨论定位实验的结果。首先手动驾驶智

能车在场景中运行并保存相应的传感器数据以建立地面特征点地图,然后再让智能车在场景中行驶以测试本文所提的定位方法.其中真实值(ground truth)由RTK-GPS融合里程计信息确定.定位结果如图12所示.从中可以看出,虽然仅基于地图匹配的方法也可较好地跟踪车辆位姿,但特征提取以及地图匹配本身的误差使得结果并不理想,而进一步采用UKF融合算法后,定位轨迹非常平滑,取得了很好的效果.表2是定位误差统计分析结果,进一步说明了本文定位方法具有较高的精度.

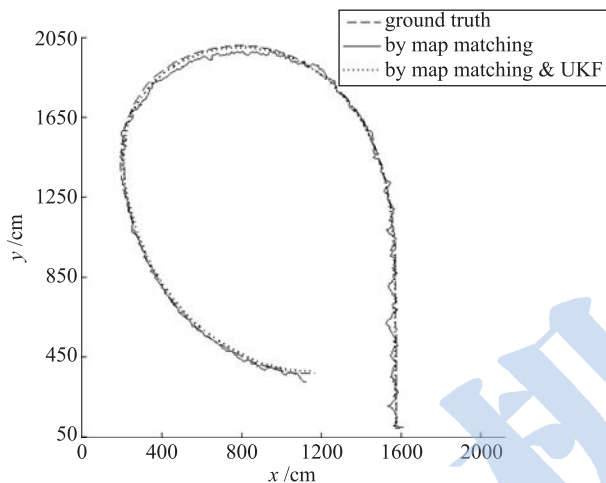


图12 定位结果

Fig.12 Localization result

表2 定位误差统计分析

Tab.2 Statistical analysis of localization error

车辆位姿	x/cm		y/cm		$\theta/(^\circ)$	
	均值	方差	均值	方差	均值	方差
定位误差	8.10	6.02	8.70	5.69	-0.21	0.88

7 结论 (Conclusion)

本文研究目的是为无人驾驶车在某些场所(如大型广场、公园、机场等)中的应用设计一种有效的全局定位方法,以利于提供智能化的区内交通服务.

本文针对室外环境特点,设计将摄像机安装在车辆底部,提出了一种基于地面特征点的地图匹配方法来获取车辆定位信息.实验结果证明了所提方法具有较高的可靠性和精度.并且RTK-GPS只用于

地图创建阶段,之后即可将所建地图共享于其它车辆以完成定位,因此大大节约了成本.

地图匹配中非常重要的一点是对车辆位姿的预估.其作用主要有两个:1)在地图搜索中获得较好的参考地图帧;2)在基于ICP算法的地图匹配中提供较准确的匹配初值,以保证ICP算法快速收敛到全局最小值点.车辆位姿预估值由(2)式获得,其中使用了里程计信息,因此需采用具有较高精度的编码器以获得较准确的车辆里程值.另外,匹配中采用的地面特征点可根据具体场景选择不同的兴趣点.如对于地面具有明显网格信息的场景,可选择边缘点作为特征点.

今后的研究重点是考虑融合其它传感器,如激光雷达等,以进一步提高定位方法的鲁棒性.

参考文献 (References)

- [1] Panzneri S, Pascucci F, Ulivi G. An outdoor navigation system using GPS and inertial platform[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(2): 134-142.
- [2] Lee D, Chung W, Kim M. A reliable position estimation method of the service robot by map matching[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 2830-2835.
- [3] Se S, Lowe D, Little J. Mobile robot localization and mapping with uncertainty using scale-invariant visual landmarks[J]. International Journal of Robotics Research, 2002, 21(8): 735-758.
- [4] Gresetti G, Tipaldi G D, Stachniss C, et al. Fast and accurate SLAM with Rao-Blackwellized particle filters[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2007, 55(1): 30-38.
- [5] Van der Merwe R, Wan E A. The square-root unscented Kalman filter for state and parameter-estimation[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 3461-3464.
- [6] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.

作者简介:

方 辉 (1982-), 男, 博士生. 研究领域: 移动机器人环境感知、定位和导航.

杨 明 (1975-), 男, 博士后, 副教授. 研究领域: 计算机视觉, 移动机器人及智能车导航.

杨汝清 (1944-2009), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人系统与控制, 机电一体化系统总体设计, 特种机器人设计.