

高精度高鲁棒性的轨道机器人全局定位方法

唐恒博¹, 陈卫东¹, 王景川¹, 刘 帅², 李国波², 赵洪丹²

(1. 上海交通大学自动化系系统控制与信息处理教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 吉林省电力有限公司辽源供电公司, 吉林 辽源 136200)

摘 要: 轨道机器人系统中, 电磁干扰、温度与光照变化等环境因素会严重影响其定位的精确性和可靠性. 针对上述问题, 设计了一种里程计融合定位针路标的轨道机器人全局定位系统. 提出了一种定位针路标的优化布置方法, 通过扩大各定位区段的针分布差异度, 来提高定位的鲁棒性. 针对轨道打滑、定位针失效等情况进行了仿真, 并在变电站巡检机器人上开展了实际应用. 结果表明, 本方法具有毫米级定位精度及全局定位能力, 并且能够有效应对环境干扰.

关键词: 多传感器数据融合; 轨道机器人; 全局定位; 路标

中图分类号: TP242.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2013)-05-0623-07

High-Precision and High-Robustness Global Localization for Rail Robots

TANG Hengbo¹, CHEN Weidong¹, WANG Jingchuan¹, LIU Shuai², LI Guobo², ZHAO Hongdan²

(1. Key Laboratory of System Control and Information Processing, Ministry of Education, Department of Automation,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Liaoyuan Power Co. of Jilin Electric Power Co., LTD, Liaoyuan 136200, China)

Abstract: The localization precision and reliability of a rail robot system will be negatively influenced by environmental factors like electromagnetic interference, unstable temperature and illumination. For the problems above, a global localization system for rail robots based on the fusion of odometry and landmark pins is designed. An optimal distribution method of landmark pins is also proposed to improve localization robustness by expanding the distribution difference of landmark pins in each segment. The simulation of wheel spin and landmark pin failure, together with the application results of the substation inspection robot, indicate that the localization precision is at millimeter scale while the system is capable of global localization and can deal with environmental interference.

Keywords: multi-sensor data fusion; rail robot; global localization; landmark

1 引言 (Introduction)

在物流、巡检等工业领域, 轨道机器人的应用提高了生产效率和自动化水平. 高精度高鲁棒性的定位技术是轨道机器人系统的关键技术之一, 其定位精度和可靠性直接影响轨道机器人的安全性和运行效率.

在轨道定位技术领域, 前人已经做出了很多卓有成效的工作^[1-2]. 目前, 世界上运用较为广泛的轨道定位技术有: 轨道电路系统、全球定位系统 (GPS)^[3]、速度测量定位^[4]、里程计定位、涡流传感器系统 (eddycurrentsensor system, ECS)^[5-6]、轨道特征视觉识别技术^[7]、路标检测定位系统等. 但是, 以上定位方式都有不同程度的局限性.

轨道电路系统可靠性高, 但定位精度低, 只能

作为粗略定位方法. 卫星定位系统具有全局定位能力, 但抗干扰能力弱, 在特殊地形可能存在定位死区, 并存在信号延迟导致的定位偏差. 速度测量定位系统和里程计定位系统都存在累计误差, 需要通过和其他定位方式的结合, 校正位置信息. 基于轨道特征识别技术的轨道定位系统, 通过视觉或者 ECS 涡流传感器系统等方式, 获取列车前方轨道特征信息, 识别具有特征的轨道定位区间, 从而实现全局定位. 但定位效果受限于轨道特征识别的准确率以及轨道本身的特征.

基于路标检测的定位系统具有较高的定位精度, 通常与里程计定位技术结合, 起到消除定位累积误差的作用. 路标检测系统的实现方法很多, 包括磁力路标、RFID 路标、视觉路标等等.

基金项目: 国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划资助项目 (国内研究) (2012GB102001); 国家自然科学基金资助项目 (60934006).

通讯作者: 陈卫东, wdchen@sjtu.edu.cn 收稿/录用/修回: 2012-11-08/2013-01-12/2013-04-03

磁力路标检测系统^[8],通常将磁力路标铺设在轨道行进线路上,轨道根据磁传感器检测到的磁场强度信息,判断路标位置.但是,地磁场或电磁干扰可能对磁传感器的检测造成影响.并且,磁钉在长时间使用后可能会出现消磁,影响检测效果.

RFID路标检测系统^[9],通过轨道车载读写器向轨道上的标签发射读写信号,获取标签的应答信息.由于标签中可存储大量数据信息,因此RFID路标检测系统可以通过识别不同标签实现全局定位.但RFID的定位精度较低,一般只能达到厘米级.

视觉路标检测系统^[10],将人工视觉路标放置在轨道附近.轨道通过车载摄像头获取环境图像信息,利用计算机视觉算法识别人工路标,完成定位校正.但视觉路标检测系统容易受到光线影响,识别存在较大的不确定性.

在某些恶劣或室外工作环境中,要求机器人能够工作在电磁干扰、雨雪天气、光线变化甚至夜间环境等极端工作条件中.同时,某些任务对机器人的定位精度有毫米级要求.而上述的定位技术无法适应这种特种工作条件,也不能达到高定位精度的要求.

为了适应上述的复杂工作环境以及高定位精度要求,本文提出一种基于定位针检测系统结合里程计的轨道机器人全局定位方法.利用光电传感器响应时间短及测量精度高等特点,达到毫米级的定位精度.而且,光电传感器抗干扰能力强,能够适应复杂的室外工作环境.同时,提出一种定位针布置方法,使得机器人能够高效地通过定位针间隔序列匹配,完成全局定位,使得定位方法能够应对打滑空转以及丢失定位针等异常情况.

2 轨道机器人全局定位方法 (Global localization method for rail robots)

由于打滑空转等原因,里程计定位技术存在累计误差和定位不确定性^[8].为克服定位累计误差和不确定性,本文应用多传感器数据融合技术,将里程计定位技术与定位针检测系统结合.

2.1 定位针检测系统

定位针检测系统由轨道及定位针、光电传感器、车体控制器等部分组成.

如图1所示,定位针为不透光刚性材料制成的L型件,固定安装在轨道底部.固定方式确保不影响移动车体在轨道上的正常运动.

光电传感器安装在移动车体底部,用以采集定位针信号并反馈给车体控制系统.光电传感器安装

位置根据定位针与轨道的位置关系确定,确保移动车体经过定位针时,定位针能够有效地阻断光电传感器的光学通路,同时不会与车体其他部件发生磕碰.当车体经过定位针时,车体控制器根据光电传感器光学通路的通断信号,判断是否经过定位针.

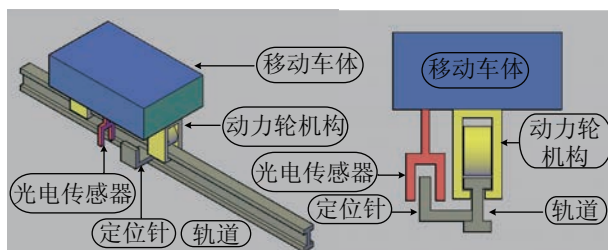


图1 轨道定位系统示意图

Fig.1 Localization system for rail vehicles

2.2 轨道机器人全局定位方法

轨道机器人全局定位方法融合了电机编码器和定位针检测系统,实现了高精度、高鲁棒性的轨道定位功能.

定位系统输入信号为当前电机编码器数值 $r_e(t)$ 和光电传感器信号 $r_o(t)$.输入信号经过里程计累加、定位针识别、局部定位校正、全局定位校正4个功能模块,最终获得移动车体位置.图2为轨道机器人全局定位方法框图.

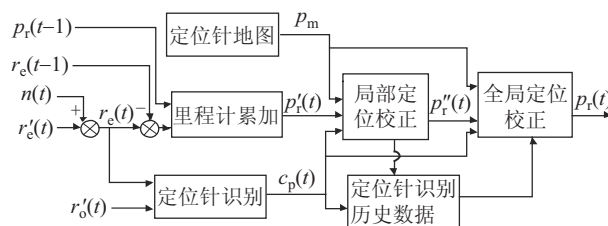


图2 轨道机器人全局定位方法方框图

Fig.2 Block diagram of global localization for rail robots

当前时刻编码器测量值 $r_e(t)$ 为真实位置对应编码器值 $r'_e(t)$ 与噪声 $n(t)$ 之和.

里程计累加模块计算公式如下:

$$p'_r(t) = k_m(r_e(t) - r_e(t-1)) + p_r(t-1) \quad (1)$$

其中 k_m 为传动参数, $p'_r(t-1)$ 为上一时刻移动车体位置.里程计累加模块计算获得当前时刻未校正移动车体位置 $p'_r(t)$.

定位针识别模块根据光电传感器信号融合编码器数值,获得障碍物轮廓信息.通过与定位针轮廓模板进行匹配,得到定位针匹配结果 $c_o(t)$,它是布尔量,结果为真时表示检测到定位针.

定位针地图保存轨道上所有定位针位置信息的1维数组,公式表达如下:

$$\mathbf{p}_m = [p_m(1), p_m(2), \dots, p_m(i), \dots, p_m(q)]^T \quad (2)$$

其中 \mathbf{p}_m 为定位针位置信息数组, $p_m(i)$ 为第 i 号定位针的位置, q 为全轨道定位针个数.

局部定位校正模块计算获得局部校正后当前移动车体位置 $p_r'(t)$, 计算公式如下:

$$\Delta p_{\min} = |p_m(i_m) - p_r'(t)| = \min_{i \in [1, q]} |p_m(i) - p_r'(t)| \quad (3)$$

若满足:

$$c_p(t) = 1 \cap \Delta p_{\min} < t_m \quad (4)$$

其中 t_m 为局部校正阈值, 则 $p_r''(t) = p_m(i_m)$, 否则 $p_r''(t) = p_r'(t)$.

全局定位校正模块根据定位针识别历史数据 \mathbf{D} 与定位针位置信息数组 \mathbf{P}_m 进行全局匹配, 修正 $p_r''(t)$ 获得最终移动车体位置 $p_r(t)$.

其中定位针识别历史数据 \mathbf{D} 满足如下公式:

$$\mathbf{D} = [d(1), d(2), \dots, d(j), \dots, d(m)]^T \quad (5)$$

其中, $d(j)$ 为最近检测到的第 j 号定位针与第 $j+1$ 号定位针的间距, m 为定位区间中定位针个数.

全局定位方法计算公式如下:

$$f_m(i, \mathbf{D}, \mathbf{P}_m) = \sqrt{\sum_{j=1}^{m-1} (p_m(i-j+1) - p_m(i-j) - d(j))^2} \quad (6)$$

其中, $f_m(i, \mathbf{D}, \mathbf{P}_m)$ 表示定位针识别历史数据 \mathbf{D} 与第 i 号定位针的全局匹配结果, 计算结果越小表示匹配度越高.

匹配度计算公式如下:

$$\begin{aligned} f_{m1} &= \min_{i \in [m, q]} f_m(i, \mathbf{D}, \mathbf{P}_m) = f_m(i_{m1}, \mathbf{D}, \mathbf{P}_m) \\ f_{m2} &= \min_{i \in [m, q] \cap i \neq i_{m1}} f_m(i, \mathbf{D}, \mathbf{P}_m) = f_m(i_{m2}, \mathbf{D}, \mathbf{P}_m) \end{aligned} \quad (7)$$

f_{m1} 和 f_{m2} 分别表示最优匹配结果及次优匹配结果, i_{m1} 和 i_{m2} 分别表示最优匹配和次优匹配的定位针序号.

若满足:

$$f_{m1} \leq t_1 \cap f_{m2} \geq t_2 \cap c_p(t) = 1 \quad (8)$$

则 $p_r(t) = p_m(i_{m1})$, 否则 $p_r(t) = p_r''(t)$. 其中 t_1 和 t_2 分别为最优匹配阈值和次优匹配阈值.

3 定位针布置算法 (Distribution method for landmark pins)

由于全局定位效果较大程度取决于定位针分布, 为了提高全局定位能力, 需要一种合理的定位针布置方法, 使得轨道定位区间之间的差异度满足要求.

3.1 定位区间差异度

定位区间由数个相邻的定位针及定位针间的轨道组成, 作为全局定位的匹配单元. 为保证全局定位效率, 降低误识别率, 定位区间之间需要满足一定的差异度.

定位区间之间差异度的物理意义定义为: 针对两个定位区间, 序号分别为 i_1 和 i_2 , 当定位区间 i_1 实际被检测到时, 根据观测值获得当前定位区间估计仍为定位区间 i_1 的概率期望.

定义符号如下:

x_i : 表示第 i 号定位针的性质参数, 此处代表与之前定位针的位置间隔;

$\mathbf{X}_a = [x_1, x_2, \dots, x_q]^T$: 表示全轨道定位针分布向量, 元素为定位针性质参数;

$\mathbf{X}_i = [x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m-1}]^T$: 表示第 i 号定位区间的参数向量, 元素为定位区间中的定位针性质参数;

\mathbf{X}_r : 表示真实定位区间参数向量;

\mathbf{X}_o : 表示观测定位区间参数向量;

\mathbf{X}_c : 表示计算定位区间参数向量;

$f(\mathbf{X}_o, \mathbf{X}_r)$: 表示真实定位区间参数向量为 \mathbf{X}_r 时, 观测定位区间向量 \mathbf{X}_o 的概率密度函数.

则, 定位区间 \mathbf{X}_{i_1} 和定位区间 \mathbf{X}_{i_2} 间的差异度 $G(\mathbf{X}_{i_1}, \mathbf{X}_{i_2})$ 的函数表达式为

$$\begin{aligned} G(\mathbf{X}_{i_1}, \mathbf{X}_{i_2}) &= P(\mathbf{X}_c = \mathbf{X}_{i_1} | \mathbf{X}_r = \mathbf{X}_{i_1}) \\ &= \int \frac{f^2(\mathbf{X}_o, \mathbf{X}_{i_1})}{f(\mathbf{X}_o, \mathbf{X}_{i_1}) + f(\mathbf{X}_o, \mathbf{X}_{i_2})} d\mathbf{X}_o \end{aligned} \quad (9)$$

假设定位针参数向量的测量值符合以真实值为期望、标准差为 σ 的多维独立正态分布. 显然, 概率密度函数仅与测量值和真实值之差相关.

在该条件下, 可以证明 $G(\mathbf{X}_{i_1}, \mathbf{X}_{i_2})$ 仅与 $|\mathbf{X}_{i_1} - \mathbf{X}_{i_2}|$ 正相关.

在定位针布置算法中, 为保证全局定位的有效性, 要求任意定位区间两两之间差异度均满足要求. 在定位针布置问题中, 只关心最小的定位区间差异度, 作为定位针布置的评价函数.

所以, 定义全轨道定位区间差异度为

$$G(\mathbf{X}_a) = \min_{i_1 \neq i_2} |\mathbf{X}_{i_1} - \mathbf{X}_{i_2}| \quad (10)$$

3.2 定位针布置优化问题

在定位针间距满足限制条件的前提下, 布置全轨道定位针, 使全轨道定位区间差异度最大. 问题

的公式表达如下:

$$\begin{aligned} \max \mathbf{G}(\mathbf{X}_a) &= \max(\min_{i_1 \neq i_2} |\mathbf{X}_{i_1} - \mathbf{X}_{i_2}|) \\ \mathbf{X}_a &= [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_q]^T \\ x_i &\in [x_{\min}, x_{\max}] \end{aligned} \quad (11)$$

由于问题的维度高,且评价函数驻点多,用传统的多维问题优化算法计算量非常大,难以获取有效解。

为降低问题求解难度,对布置问题进行了一定简化,加入限制条件如下:

$$\begin{aligned} x_i &\in A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \\ a_i &\in [x_{\min}, x_{\max}] \end{aligned} \quad (12)$$

3.3 定位针布置算法

本文提出一种基于启发式算法^[11]的定位针布置方法,以确保轨道各定位区间之间存在一定的差异度。

算法根据已生成的定位针布置序列,排除不满足全轨道定位区间差异度要求的定位区间选项,选择合适的定位区间选项接续在当前定位针布置序列最后,并重复这一过程直到不存在满足要求的定位区间选项。

布置算法具体过程如下:

① 确定定位针间隔选项集合:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$$

② 确定定位区间中定位针个数 m , 全轨道定位针个数 q 。

③ 列出所有可能定位区间选项,并构成定位区间库,公式表达如下:

$$\mathbf{X}_{\text{rm}} = \{\mathbf{X}_{\text{rm},1}, \mathbf{X}_{\text{rm},2}, \dots, \mathbf{X}_{\text{rm},r}\}$$

其中:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{\text{rm},s} &= [x_{\text{rm}}(s,1), x_{\text{rm}}(s,2), \dots, x_{\text{rm}}(s,m)]^T \\ x_{\text{rm}}(s,i) &\in A \\ r &= n^m \end{aligned} \quad (13)$$

④ 给出全轨道定位区间差异度阈值 t 。

⑤ 确定初始定位区间

$$\mathbf{X}_a = \mathbf{X}_1 = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$$

⑥ 排除 \mathbf{X}_{rm} 中不符合 t 要求的定位区间选项,更新 \mathbf{X}_{rm} 。

⑦ 从 \mathbf{X}_{rm} 中选择 $\mathbf{X}_{\text{rm},s}$ 满足条件如下:

$$\begin{aligned} x_{\text{rm}}(s,1) &= x_{i+1} \\ \text{a) } x_{\text{rm}}(s,2) &= x_{i+2} \end{aligned} \quad (14)$$

...

$$\begin{aligned} x_{\text{rm}}(s,m-1) &= x_{i+m-1} \\ \text{b) } \max p &= k_1 p_1 + k_2 p_2 \end{aligned} \quad (15)$$

其中: p 为定位区间选择优先级, p_1 为新增定位区间排除的定位区间选项个数, p_2 为新增定位区间后满足条件 a) 的定位区间个数, $k_1 < 0$ 、 $k_2 > 0$ 为优先级比例系数,表示两个优先级参数在定位区间选择中所占比例。

⑧ 若存在满足条件选择,则将定位区间 $\mathbf{X}_{\text{rm},s}$ 最后一项接续于序列末尾,从而更新 \mathbf{X}_a , 返回⑥;若不存在满足条件的选项,结束。

⑨ 若最终生成序列 \mathbf{X}_a 的元素个数 $q' < q$, 则减小 t , 重复①~⑧;若 $q' > q$, 则截取前 q 项作为最终的全轨道定位针分布向量 \mathbf{X}_a , 并依此布置定位针。

算法生成的定位针布置并不是最优解,但作为一个次优可行解,能达到实际应用要求。相比随机生成的定位针布置,算法生成的布置对全局定位效果有大幅提升,效果在仿真和实验中均予以证实。

4 仿真与结果分析 (Simulation and analysis)

为证明定位针位置布置方法的有效性,对不同定位针分布下轨道定位方法的全局定位进行仿真,并对结果进行分析。

4.1 仿真环境

仿真硬件平台为 Lenovo G460 笔记本电脑,处理器型号为 I5-480M 2.67 GHz,内存容量 2 GB。操作系统为 Windows 7。

仿真程序基于 LabVIEW2011 图形化编程系统编写。程序模拟轨道机器人实际工作环境,实时获取机器人运行过程中包括编码器信号、里程计值、速度、测得定位针位置等数据,并通过文中轨道定位方法计算车体位置及全局匹配结果。

为使仿真更加接近于实际,在编码器数据中加入 1% 的随机噪声与 1% 的传动参数误差,并且将所有传感器信息更新周期设置为 30 ms。

4.2 全局定位仿真

仿真对比了 4 组不同定位针分布方式下,机器人行驶全程的全局定位效果。其中,优化组为通过定位针布置方法生成的定位针分布;另 3 组为对比组,定位针分布随机生成。

优化组定位针布置方法参数如下:

轨道定位针总数 $q = 40$;
 定位区间中定位针个数 $m = 3$;
 全轨道定位区间差异度阈值 $t = 1$;
 优先级比例系数 $k_1 = -1, k_2 = 2$;
 定位针间隔选项 $x_i \in \{5, 5.5, 6, \dots, 10\}$;
 初始定位区间 $\mathbf{X}_1 = [9, 9, 9]^T$.

优化组定位针分布方式, 轨道总长度为 302 m.
 3 组随机组定位针分布方式, 轨道总长度均在 300 m ~ 310 m 之间, 定位针数量均在 40 ~ 45, 定位针间距均为 5 m ~ 10 m.

由于全局定位结果取决于全局匹配最优结果和次优结果, 仿真统计模拟移动车体行驶全程经过各定位针后的最优及次优匹配结果, 并进行分析.

4.3 全局定位仿真结果及分析

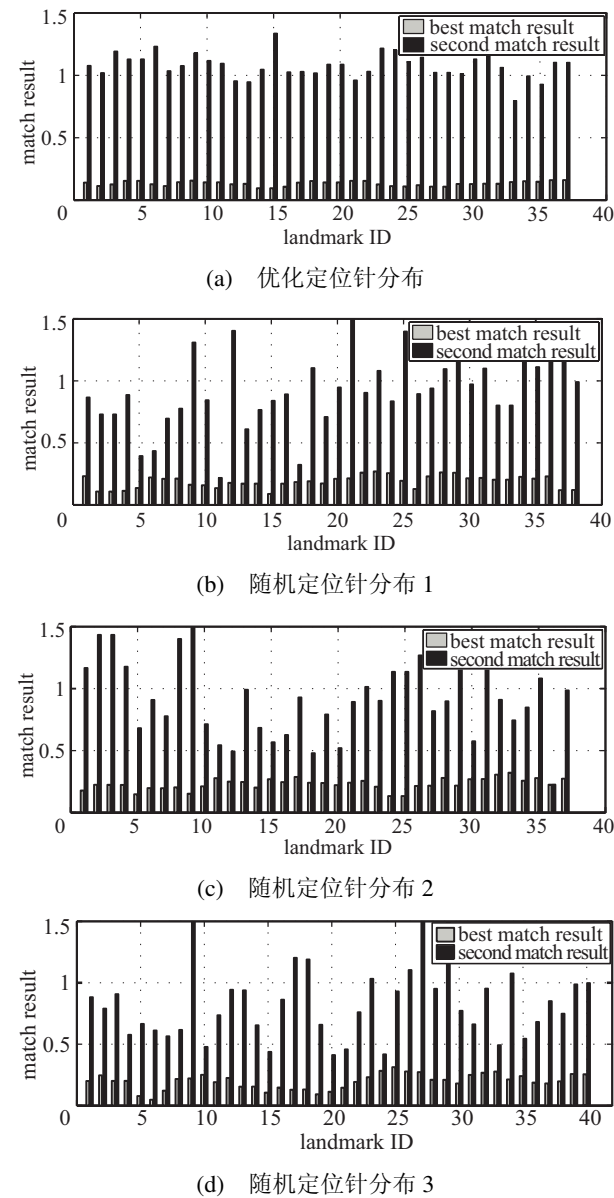


图 3 全局定位仿真结果

Fig.3 Simulation result of global localization

仿真结果如图 3 所示, 优化组和对比组的全局匹配最优结果较为接近. 这是由于最优匹配误差主要取决于定位针间隔的测量误差, 与定位针分布方式无关.

而几组数据的次优匹配误差区别较大: 优化组的次优匹配误差分布较为集中, 均在 1 附近, 最小值为 0.8; 而对比组均存在一些位置次优匹配结果较差, 3 组随机生成的对比组仿真结果均存在次优匹配误差小于 0.5 的情况.

由于全局定位要求次优匹配结果尽可能大, 从而确保全局定位结果的准确性, 规避定位区间之间的误识别. 根据仿真结果, 优化组的全局定位效率显然要优于对比组. 定位针布置方法有效性得以证明.

4.4 鲁棒性仿真

为证实全局定位方法的效果, 本文进行了定位方法鲁棒性仿真, 包括打滑重定位仿真和定位针丢失定位仿真.

仿真模拟优化组定位针分布的轨道地图中, 移动车体行驶过程中出现打滑空转的异常情况. 测试全局定位方法在定位出现大定位偏差后能否有效实现重定位. 实验结果如图 4 所示.

打滑重定位仿真结果如图 4 所示.

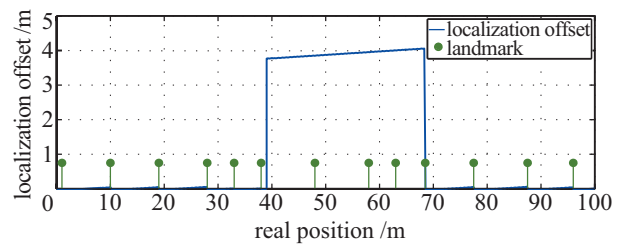


图 4 打滑重定位仿真结果

Fig.4 Simulation result of wheel spin and re-localization

移动车体在 0 ~ 39 m 正常运动, 定位偏差在 0 ~ 2 cm, 且每次经过定位针后, 定位偏差均下降到 0 左右. 原因为局部定位校正模块根据最近定位针位置, 校正里程计累计误差. 移动车体在 39 m 处发生打滑, 空转距离为 4 m 左右, 39 m ~ 68.5 m 定位误差保持在 4 m 左右. 移动车体行驶到 68.5 m 时, 定位误差下降到 1 cm 之内. 这是由于全局定位模块根据 39 m ~ 68.5 m 测得的定位针间距序列, 全局匹配获得移动车体全局位置. 68.5 m ~ 100 m 移动车体定位偏差与 0 ~ 39 m 类似.

定位针丢失情况下的定位仿真结果如图 5 所示.

仿真中, 20 m ~ 40 m 之间的 3 个连续定位针丢

失, 导致无法校正里程计累积定位误差, 48 m 前定位误差达到 0.3 m. 在 48 m 处再次检测到定位针后, 定位误差下降到 0 左右.

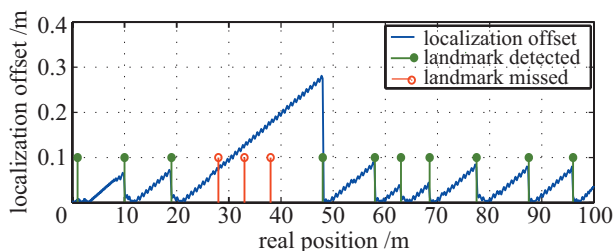


图 5 定位针丢失定位仿真结果

Fig.5 Simulation result of localization with missed landmarks

由仿真结果可知, 定位方法可以有效地应对移动车体打滑以及定位针丢失的情况, 有效地保证了定位系统的鲁棒性.

5 实验与结果分析 (Experiment and analysis)

5.1 实验平台与实验环境

实验平台为自行研制的变电站巡检机器人系统 (如图 6 所示), 系统运动控制部分主要由主控制器、电机驱动器、电机、传动机构、光电传感器组成. 主控制器采用 NI 公司 Compact-RIO 9074 可编程控制器, 通过 RS485 串口通讯方式与电机驱动器交互. 主控制器集成高速数字 I/O 卡, 直接连接光电传感器, 信号采样频率为 1 kHz. 移动车体最大行驶速度为 1 m/s, 主控制器控制周期为 30 ms.



图 6 变电站巡检机器人

Fig.6 Substation inspection robot

实验场地位于中国东北某地的变电站, 最低气温达 -30°C , 存在雨雪等恶劣天气状况. 场地中有较强的电磁干扰, 有夜间作业要求.

5.2 重复定位实验

为测试轨道定位方法重复定位精度, 进行了重复定位实验.

移动车体目标点位置选取在定位针后 0.5 m 处. 移动车体以目标位置前 50 m 处为初始位置, 根据位置控制指令自主导航到目标位置, 人工测量移动车体最终位置并记录. 移动车体峰值速度为 0.5 m/s, 最大加速度为 0.2 m/s^2 .

实验共重复 40 组, 实验结果如图 7 所示. 重复定位测量结果标准差为 0.9 mm, 误差最大组与均值偏差为 1.7 mm.

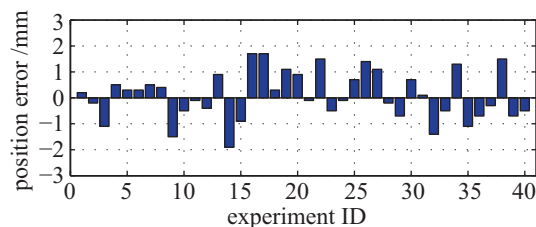


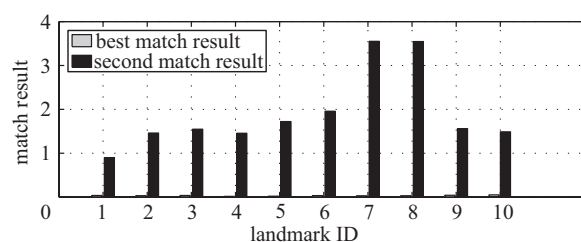
图 7 重复定位实验结果

Fig.7 Experiment result of repeated localization

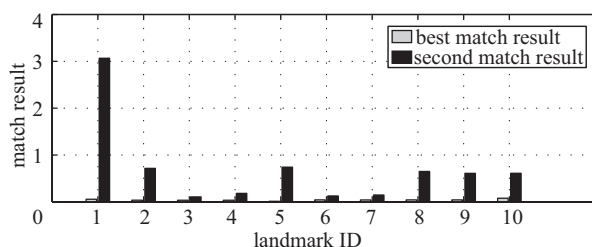
5.3 全局定位实验

实验选取两段轨道分别进行全局匹配实验. 优化组定位针分布由定位针布置方法生成, 轨道总长为 64.18 m, 定位针数量为 13; 对比组定位针分布随机生成, 轨道总长为 58.32 m, 定位针数量为 13, 移动车体峰值速度为 0.5 m/s, 最大加速度为 0.2 m/s^2 .

与仿真相同, 实验中采集机器人经过各定位针时最优匹配结果和次优匹配结果, 并进行比较分析.



(a) 优化定位针分布



(b) 随机定位针分布

图 8 全局定位实验结果

Fig.8 Experiment result of global localization

全局定位实验结果如图 8 所示. 两组数据最优匹配结果均小于 0.1, 实验组最优匹配结果标准差为 0.0097, 对比组最优匹配结果为 0.0167. 而两组数

据中次优匹配结果差别较大, 实验组中次优匹配结果均大于 0.9, 满足全局匹配要求; 对比组中有 4 组次优匹配结果小于 0.2, 8 组小于 0.75, 为全局匹配带来困难. 全局定位实验结果表明, 定位针布置方法明显提高了全局定位效率.

6 结论 (Conclusion)

本文设计了一种基于多传感器数据融合的里程计结合定位针路标的轨道机器人全局定位系统, 并且提出了一种定位针路标的优化分布方法, 通过扩大定位区间之间针分布的差异, 提高全局定位的精确性.

实验与仿真结果表明, 轨道机器人定位系统具有高定位精度和高鲁棒性. 重复定位实验中, 轨道机器人定位误差小于 2 mm. 同时, 定位针布置算法提升了全局定位的效率, 能够有效地应对打滑空转、定位针丢失等异常情况, 提高了系统鲁棒性.

参考文献 (References)

- [1] Keller Heirich O, Robertson P, Garcia A C, et al. Probabilistic localization method for trains[C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 482-487.
- [2] 刘进, 吴汶麒. 轨道交通列车定位技术 [J]. 城市轨道交通研究, 2001, 4(1): 30-34.
Liu J, Wu W Q. Train positioning technology of railway and mass transit[J]// Urban Mass Transit, 2011, 4(1): 30-34.
- [3] Acharya A, Sadhu S, Ghoshal T K. State inequality constraint based method for rail navigation[C]//Annual IEEE India Conference: Green Energy, Computing and Communication. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [4] Heirich O, Robertson P, Garcia A C, et al. Bayesian train localization method extended by 3D geometric railway track observations from inertial sensors[C]//15th International Conference on Information Fusion. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 416-423.
- [5] Hensel S, Hasberg C. Probabilistic landmark based localization of rail vehicles in topological maps[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 4824-4829.
- [6] Hensel S, Hasberg C, Stiller C. Probabilistic rail vehicle localization with eddy current sensors in topological maps[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1525-1536.
- [7] Wohlfeil J. Vision based rail track and switch recognition for self-localization of trains in a rail network[C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 1025-1030.
- [8] 徐海贵, 王春香, 杨汝清, 等. 磁传感系统在室外移动机器人导航中的研究 [J]. 机器人, 2007, 29(1): 61-66.
Xu H G, Wang C X, Yang R Q, et al. A magnetic sensing system for outdoor mobile robot navigation[J]. Robot, 2007, 29(1): 61-66.
- [9] 王景川, 方毅, 陈卫东. 移动机器人定位的自适应功率调节射频识别系统 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(2): 207-212.
Wang J C, Fang Y, Chen W D. Mobile robot self-localization based on RFID system with adaptive power control[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2012, 46(2): 207-212.
- [10] 许俊勇, 王景川, 陈卫东. 基于全景视觉的移动机器人同步定位与地图创建研究 [J]. 机器人, 2008, 30(4): 289-297.
Xu J Y, Wang J C, Chen W D. Omni-vision-based simultaneous localization and mapping of mobile robots[J]. Robot, 2008, 30(4): 289-297.
- [11] 刑文训, 谢金星. 现代优化计算方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
Xin W X, Xie J X. Modern optimum algorithms[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

作者简介:

唐恒博 (1987-), 男, 硕士生. 研究领域: 移动机器人.
陈卫东 (1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 智能机器人, 多机器人系统.
王景川 (1979-), 男, 硕士, 助理研究员. 研究领域: 移动机器人.