

滑移转向机器人不确定度分析及路面识别方法

白洋洋, 吕洪波, 黄吉全

(北方工业大学 机械与材料工程学院, 北京 100144)

摘要: 传感器的不确定度是移动机器人定位中的关键问题; 文章对 Pioneer3-AT 滑移转向机器人在转弯时运动学状态进行分析, 发现了滑动偏差受地面与轮的摩擦系数及左右两轮的速度影响, 通过 Adams 与 Matlab/Simulink 联合仿真实验得到了在不同地面不同轮速的滑动偏差的大小多组数据; 为了使仿真结果对研究里程计不确定度有一定的参考价值, 在仿真轨迹重复性偏差中选取最大值, 并对结果拟合, 建立了滑动偏差模型, 并通过实验进行了验证对比; 对仿真结果分析可以得出, 摩擦系数越大, 在相同速度下滑动偏差越小, 根据这一特性, 提取小车在不同轮速下的滑动偏差作为地面分类的原始数据; 通过 k-近邻 (KNN) 方法, 对地面进行分类, 识别率达到 70% 以上。

关键词: 滑移转向机器人; 滑动偏差; 不确定度; 路面识别方法

Uncertainty Analysis of Slip Steering Robot and Pavement Identification Method

Bai Yangyang, Lv Hongbo, Huang Jiquan

(College of Mechanical Engineering and Material, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Sensor uncertainty is a key issue in mobile robot positioning. The paper analyzes the kinematics of the Pioneer3-AT sliding-steering robot during cornering and finds that the sliding amount is affected by the friction coefficient of the ground and the wheels and the speed of the left and right wheels. Adams and Matlab/Simulink co-simulation experiments have obtained multiple sets of data for different sliding speeds at different ground speeds. In order to make the simulation results have a certain reference value for the study of odometer uncertainty, the maximum value is selected in the repetitive deviation of the simulation trajectory, and the results are fitted. The sliding deviation model is established and verified by experiments. Based on the analysis of the results, it can be concluded that the larger the friction coefficient, the smaller the sliding amount at the same speed. According to this characteristic, the sliding amount of the trolley at different wheel speeds is extracted as the raw data of the ground classification. The k-nearest neighbor (KNN) method was used to classify the ground and the recognition rate reached over 70%.

Keywords: sliding-steering robot; slippage; uncertainty; pavement identification method

0 引言

移动机器人的定位存在其位姿不能直接感知问题, 位姿数据只能通过数据推断。目前的定位方法中多以概率机器人学^[1]为理论基础。概率机器人将模型与传感器数据进行集成。因此要解决滑移转向机器人定位问题就要确定传感器数据问题。大多数机器人通过距离传感器和轮速定位实现位置的估计, 滑移转向机器人由于其特殊的机械结构, 导致其轮速定位误差过大, 在轨迹规划及定位中存在着更多的不确定。

为了解决滑移转向机器人的定位问题, 学者们进行很多研究, 一部分研究使用运动模型来估计里程计的不确定度。如文献 [2] 中以机器人运动路径近似弧线的假设, 依据里程计误差传播规律推导出了几种误差之间的近似函数。文献 [3-4] 中提出了基于速度瞬心的侧滑移动机器人运动学模型以此来解决问题。文献 [5] 中建立了轮式车辆稳态滑移转向的数学模型并提出了数值求解方法, 最后基于某 4×4 全地形车, 仿真分析了车速和转向中心线移动量对其转

向性能的影响。另一部分研究从动力学的角度, 建立了轮胎与地面受力分析模型, 这个领域的研究在地形与运动系统的作用力上, 模型为轮胎与牵引力之间的函数关系^[6-8]。文献 [7] 中论述了轮胎与路面间摩擦形成的机理, 并对其影响因素进行具体分析, 作为研究轮胎横向力和纵向力的基础。还有一些研究是针对打滑条件下的移动机器人进行数据算法控制^[9-10]。文献 [9] 中针对纵向滑动参数未知的轮式移动机器人的轨迹跟踪问题, 提出一种自适应跟踪控制策略。上面所述的方法中所建立的数学模型和力学模型, 都有一定的假设条件, 存在着局限性。在建模的过程中大多数将滑移、滑转以及轮子半径的影响作为系统误差, 把它的值作为噪声考虑或者只是进行分析, 在实际应用中里程计不确定度受很多因素影响, 如两轮的速度, 轮子与地面的摩擦等。

本文采用以仿真实验为主, 实际情况作为对比的方式, 在仿真过程中, 尽可能保证与实际情况相符, 考虑轮子与地面的摩擦及一些随机误差的影响。仿真以左右轮速为输入, 以滑移转向机器人的质点坐标的位姿为输出。为了确定滑移转向机器人在不同的轮速情况下里程计的不确定度, 进行了仿真分析, 并对仿真数据进行统计分析。同时通过 KNN 算法训练, 根据滑移偏差及左右两轮的速度对地面进

收稿日期: 2018-10-25; 修回日期: 2018-12-28。

作者简介: 白洋洋(1994-), 男, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 主要从事移动机器人定位方向的研究。

行识别, 研究结果可以为滑移转向机器人定位及导航提供支持。

1 Pioneer3-AT 先锋机器人运动学分析

滑移转向机器人转向原理为通过左右两轮的速度不同转向, 转向原理如图 1 所示, 由于滑移转向机器人轮的方向保持不变, 通过电机驱动器控制两侧的速度实现运动控制。当两侧驱动轮行驶速度不同, 滑移转向机器人进行转向行驶, 速度大小为两侧轮子速度矢量的合成, 受小车的宽度影响。当两侧驱动轮行驶速度相同, 滑移转向机器人进行直线行驶; 当左右两侧驱动轮的速度相反时, 进行原地转弯。

1.1 理论情况下转向原理

在研究滑移转向机器人^[11-13]的运动问题时, 我们从两个方面讨论这个问题, 当半径大于轮距宽度一半时, 如图 1 所示。

1) 大半径 ($R_i > B/2$)。

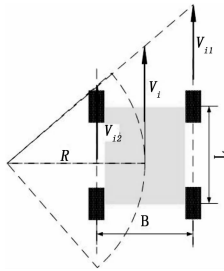


图 1 大半径转弯

图 1 中:

$$V_i = (V_{i1} + V_{i2})/2 \quad (1)$$

由相似三角形关系可得整车绕绝对转向中心点 O 点的角速度:

$$\omega_i = \frac{V_i}{R_i} = \frac{V_{i1}}{R_i + B/2} = \frac{V_{i2}}{R_i - B/2} = \frac{V_{i1} - V_{i2}}{B} \quad (2)$$

则由上式可得出整车理论转向半径为:

$$R_i = \frac{B(V_{i1} + V_{i2})}{2(V_{i1} - V_{i2})} \quad (3)$$

2) 当小车半径小于车体宽度时, 如图 2 所示: 小半径 ($0 < R_i < B/2$)。

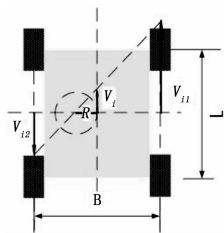


图 2 小半径转弯

图 2 中:

$$V_i = (V_{i1} - V_{i2})/2 \quad (4)$$

由相似三角形关系可得整车绕绝对转向中心点 O 点的角速度:

$$\omega_i = \frac{V_i}{R_i} = \frac{V_{i1}}{R_i + B/2} = \frac{V_{i2}}{B/2 - R_i} = \frac{V_{i1} + V_{i2}}{B} \quad (5)$$

则可得出整车理论转向半径为:

$$R_i = \frac{B(V_{i1} - V_{i2})}{2(V_{i1} + V_{i2})} \quad (6)$$

1.2 实际运动过程转向原理

在滑移转向机器人实际转向过程中总是伴随着轮胎的滑动(滑转或滑移), 地面对轮胎作用驱动力时易产生滑转, 地面对轮胎作用制动力时易产生滑移。通常情况下, 对滑移转向机器人来说, 大半径转向过程中, 侧驱动轮作用有驱动力, 产生滑转, 内侧驱动轮作用有制动力, 产生滑移。在小半径转向时, 内外侧驱动轮都作用有驱动力, 易产生滑转现象。

由滑移转向机器人的结构特点可知, 在运动过程中同侧车轮具有相同的理论速度, 实际运动过程中, 同一侧车轮运动速度相等, 可得出前后轮具有相同的滑动率。而实际滑动率取决于地面与轮胎摩擦系数、机构参数、速度及地面情况等。现定义外内侧驱动轮平均滑动率 δ_r 、 δ_p 为:

$$\begin{cases} \delta_r = \left| \frac{V_{r1} - V_{r1}}{V_{r1}} \right| \\ \delta_p = \left| \frac{V_{i2} - V_{r2}}{V_{i2}} \right| \end{cases} \quad (7)$$

当大半径 ($R > B/2$) 时转向如图 3 所示, 外侧驱动轮实际线速度为 V_{r1} 与 V_{r2} :

$$\begin{cases} V_{r1} = V_{i1}(1 - \delta_r) \\ V_{r2} = V_{i2}(1 - \delta_r) \end{cases} \quad (8)$$

则滑移转向机器人转向过程中实际的角速度 ω 为:

$$\omega = \frac{V_{r1} - V_{r2}}{B} = \frac{V_{i1}(1 - \delta_r) - V_{i2}(1 - \delta_p)}{B} \quad (9)$$

实际转角半径 R 为:

$$R_r = \frac{B(V_{r1} + V_{r2})}{2(V_{r1} - V_{r2})} = \frac{B}{2} \cdot \frac{V_{i1}(1 - \delta_r) + V_{i2}(1 - \delta_p)}{V_{i1}(1 - \delta_r) - V_{i2}(1 - \delta_p)} \quad (10)$$

由上述公式可知, 实际转向半径要大于理论转向半径, 实际转向角速度要小于理论转向角速度。同理, 可得出小半径实际运动情况。

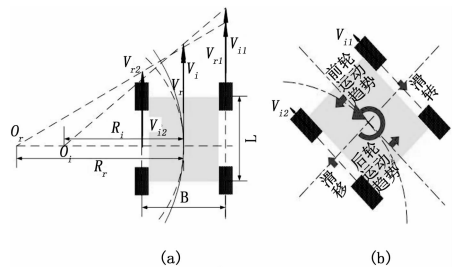


图 3 滑移滑转对大半径转弯的影响

1.3 滑移转向机器人整车运动分析

由于滑移转向机器人在运动过程中, 受到滑转和滑移的影响, 当小车逆时针转动时, 前轮的运动趋势指向圆心, 后轮运动趋势是远离圆心, 左侧轮受滑移的影响, 右侧轮

受滑转的影响。根据滑移滑转情况, 滑移转向机器人半径转弯运动分析结果如图 4 所示。

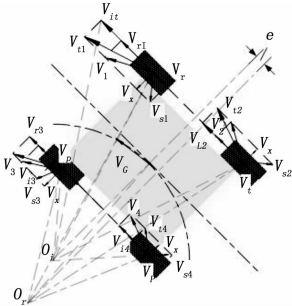


图 4 整车运动学分析

图中, V_r 、 V_p 分别表示滑转和滑移偏差, 转弯半径变大, 角速度变小, 其中 e 值的大小可表征转向时车辆的稳定性, 值越大说明转向中心线偏离形心距离越大, 稳定性越差, 反之越小说明转向越稳定。小车的整体滑移受每个轮的滑移、滑转的影响, 大小与车的结构和轮速及动摩擦因素有关, 实际应用中我们选取 Pioneer3-AT 机器人为研究对象, 选取不同地面为研究对象, 搭建仿真平台进行研究分析, 具体过程如下。

2 仿真平台的搭建

在移动平台运动过程中无法具体计算滑转率和滑移率^[14-15], 它们受地面与轮胎的摩擦系数和左右两轮的轮速影响, 同时通过实验测量工作量大, 因此, 我们将通过联合仿真, 确定滑移转向机器人在不同路面的滑移偏差, 以此来确定里程计的不确定度。

主要过程如下所示:

1) 在 Solidworks 中创建 Pioneer3-AT 移动机器人简化模型, 然后导入到 Admas 进行运动学分析, 首先添加约束及材料属性, 及驱动力, 其实验平台结构参数如表 1 所示。为保证实验结果可靠性, 材料选取铝合金材料, 保证质量相同、运动结构相同, 同时添加负重使仿真模型与实验移动机器人质量相同, 所受重力及地面接触面积相同, 保证轮子与地面相对滑移的影响。

表 1 Pioneer3-AT 实验平台结构参数

Pioneer3-AT	M	L	W	H	B
	12	268	497	277	395

其中: M 为质量 (kg); $L/W/H/B$ 为长宽高及轮距 (mm)。

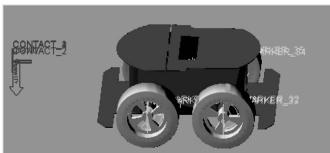


图 5 Admas 机器人模型

Matlab 系统模型, 输入为左右两侧的速度, 输出为车体的质心坐标, 及车体的速度。

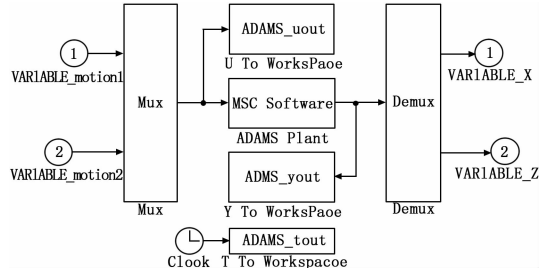


图 6 Simulink 控制系统

3) 在 Matlab 中, 调用 Simulink 模块进行仿真, 添加输入、输出, 将运行轨迹输出, 对比轨迹误差, 记录, 合成。

橡胶轮胎和大理石路面的静摩擦系数取 0.35; 橡胶轮胎和水泥路面的动摩擦系数取 0.17;

小车向前向后最大速度: 0.7 m/s;

轮胎宽度: 75 mm;

实验分别, 其中一侧轮的速度设为: 0.1 m/s,

每隔 0.1 取一个值。另一侧轮设为: 0.2 m/s, 每隔 0.2 取一个值, 从图中可得当大半径转弯时 (左右两侧速度方向相同), 转弯周期与左右两轮轮速大小之和有关, 轮速之和越大值越大。

与计算结果相同, 即 $\frac{V_{i1} + V_{i2}}{B}$, 同理, 也可以验证小半径转弯周期与轮速的关系。

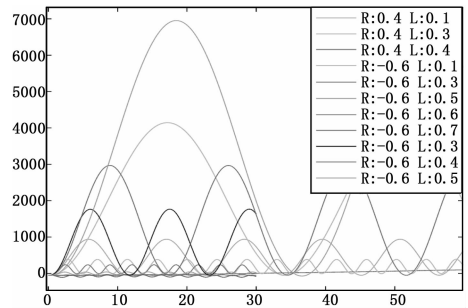


图 7 转弯 x 方向坐标

实验设计了 56 组, 输入数据分别设置左右两侧电机运动的速度, 得到误差模型, 通过 Matlab 差值进行图像拟合, 可得结果如图 8 所示。

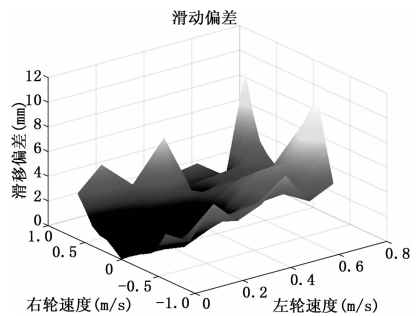


图 8 大理石路面滑动偏差

2) 将 Admas 中的模型通过机械系统导出, 导出为

图 8 所示为仿真转一周所产生的相对滑移偏差, 进行

拟合,由图可得出, 滑移转向机器人的滑移偏差不止与速度差有关, 与转弯半径的大小也有关, 其值为在转弯过程中误差累积, 当左右两轮速度差过大时, 会产生更大的滑移滑转不确定度。在实际应用中应避免左右两轮速度差过大, 大半径转弯误差相对较小, 小半径转弯误差大。

3 基于 KNN 算法的路面识别方法

关于移动机器人对不同地形条件的判别方法, 已进行了非常丰富的研究^[4,16], 这些研究主要是通过激光雷达、视觉或振动测量实现地形分类。通过振动测量来实现地形分类, 当地形的振动情况差别不是很大时, 很难进行分类, 本文通过滑移偏差进行地面材质进行分类, 采用 KNN 算法, 纵向摩擦系数决定车辆在刹车时的滑行距离, 横向摩擦系数影响车辆的方向控制能力, 良好的横向摩擦系数可减少弯道侧滑。横、纵摩擦系数都与地面的材质相关。在 Adams 仿真中我们用动、静摩擦因数来模拟不同路面与轮胎之间的运动参数, 查找资料初步确定动、静摩擦因数, 通过仿真和实验滑动偏差对比确定不同路面与滑移转向机器人之间的动、静摩擦因数。

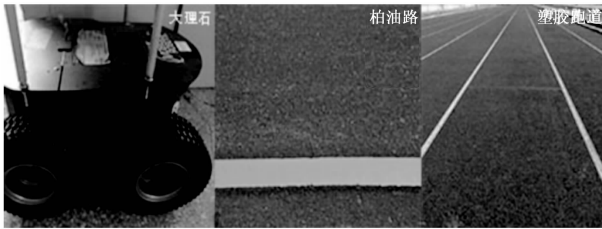


图 9 路面实景

表 2 路面动静摩擦因数取值

因数路面情况	动摩擦因数	静摩擦因数
光滑大理石	0.17	0.35
柏油路面	0.62	0.78
塑胶路面	0.76	0.92

将不同的动/静摩擦因数输入分别输入到 Adams 中进行试验, 左测轮速分别取 0.1、0.3、0.5、0.7 (m/s), 右侧轮速分别取 0、0.2、0.4、0.6 (m/s), 每种地形情况获得 16 组数据, 一共得到 48 组数据, 取 42 组为训练样本, 剩余 6 组为测试样本。

4 实验结果验证

4.1 不确定模型结果分析

为了确定实验的合理性, 设计了实验与仿真对比实验, 通过对比结果, 判断仿真的合理性。设置先锋机器人左右两轮的速度分别为 0.3 m/s 和 0.5 m/s 测量其轨迹, 通过 Linux 控制移动机器人移动, 根据轮迹与仿真的结果进行比较, 由于我们在实验和仿真主要考虑在在一圈范围内, 当转弯角度在 0~180°时, 由下图可观测结果在误差为同一侧偏大 0~2 mm, 误差不影响误差模型的创建与路面识别方法结果, 即所得结果可以为滑移转向机器人里程计不确定

度研究提供支持。

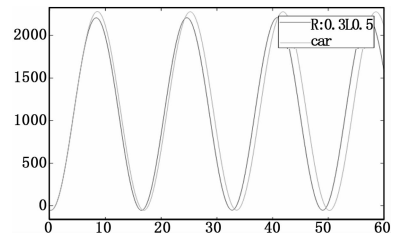


图 10 仿真与轮迹对比

4.2 路面识别方法验证

使用 KNN 算法进行分类的过程需要训练集和验证集, 我们将 Matlab 与 Admas 联合仿真得到的数据存储到 Excel 中, 在 Matlab 中实现 KNN 算法训练, 然后对测试样本进行验证, 结果如表 3 所示。

表 3 KNN 近邻法识别率

识别率	大理石	柏油路	塑胶
仿真实验	0.86	0.79	0.95
轮迹与轮速	0.83	0.70	0.88
惯性元件与里程计	0.74	0.63	0.75

设置实验对照组, 搭建 Pioneer3-AT 实验平台, 通过 ROS 系统控制滑移转向机器人进行给定速度移动, 左右速度不同机器人会进行圆周运动, 根据运动轨迹测量出圆周运动的误差大小, 根据给定的速度, 确定理想状态下的理论轨迹, 通过对比得到滑移转向机器人的滑移偏差, 根据左右两侧速度和滑移偏差, 通过 KNN 算法, 识别路面情况, 实际应用中多采用传感器进行测量分析, 能够达到实时分析运动环境, 同时实际运动过程中也无法通过轨迹对比来确定不确定度误差, 因此我们将激光雷达与惯性测量元件的数据通过卡尔曼滤波进行融合与里程计比较得到滑移偏差, 识别率如表 3 所示。

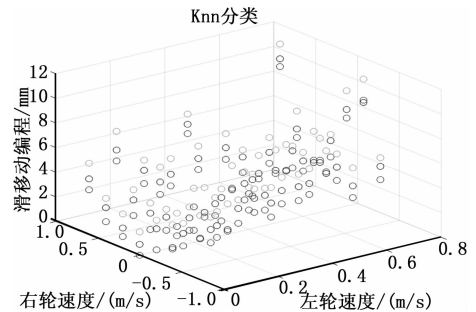


图 11 KNN 算法数据

5 结论

滑动偏差的大小即为不确定度。卡尔曼滤波原理通过多传感器进行移动机器人定位, 通过多个传感器定位数据及不确定度, 计算它们的协方差, 来确定机器人的位置。实验中设一周的滑移偏差为 $\Delta\delta$; 转弯时转角为 $\Delta\theta$, 则转弯后的角度位置误差 $\Delta\epsilon$:

(下转第 176 页)