

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.05.019

车路协同系统中的车辆精确定位方法研究

张辉^{1,2}, 庄文盛^{1,2}, 杨永强^{1,2}, 龚文森^{1,2}

(1. 中山大学 智能交通研究中心, 广州 510006; 2. 广东省智能交通系统重点实验室, 广州 510006)

摘要: 为了解决车路协同系统中车辆定位误差较大的问题, 提出了一种基于信息标识识别的车辆定位方法。该方法设计了一种能够储存道路信息的信息标识, 并在路面上设置信息标识。当车辆驶过标识时, 安装于车上的成像装置实现对信息标识图像的拾取。利用加权最小二乘法对图像进行直线拟合得到车辆的运动方向, 识别图像信息得到车辆的精确位置, 结合车辆对于自身运动状态的感知, 从而实现车辆的精确定位。试验结果表明, 车辆的运动方向检测误差仅为 0.71° , 定位误差仅为2.17 cm。可见该方法在车辆定位上更为直接、准确、成本低廉。

关键词: 交通工程; 车辆精确定位; 加权最小二乘法; 信息标识; 运动方向; 成像装置

中图分类号: U495

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2017) 05-0137-07

Study on Vehicle Accurate Position Method in Cooperative Vehicle Infrastructure System

ZHANG Hui^{1,2}, ZHUANG Wen-sheng^{1,2}, YANG Yong-qiang^{1,2}, GONG Wen-sen^{1,2}

(1. Research Center of ITS, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong 510006, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of ITS, Guangzhou Guangdong 510006, China)

Abstract: In order to solve the problem of large error of vehicle positioning in cooperative vehicle infrastructure system, a vehicle position method based on the recognition of information marks is proposed. This method designed a kind of information mark which can store road information and set the information marks on roads. When a vehicle moves through information marks, the images of information marks can be picked up by the imaging device installed on the vehicle. The vehicle motion direction is obtained by using the straight line which is fitted by weighted least square method, the accurate position of vehicles is obtained by recognizing the image information, and the accurate position of vehicles is realized combining the vehicles' perception of their own motion states. The experimental result shows that the motion direction error is only 0.71° and the position error is only 2.17 cm. It can be seen that this method is more direct, accurate and lower cost in vehicle position.

Key words: traffic engineering; vehicle accurate position; weighted least square method; information mark; motion direction; imaging device

0 引言

车路协同系统 (Cooperative Vehicle Infrastructure System, CVIS) 是目前智能交通系统的前沿技术, 是采用传感探测等技术获取车辆和道路的信息, 通过先进的无线通信和新一代互联网技术实现车车、车

路动态实时信息交互, 并在全时空动态交通信息采集与融合的基础上开展车辆主动安全控制和道路协同管理, 充分实现人车路的有效协同, 保证交通安全, 提高通行效率, 从而形成安全、高效和环保的道路交通系统^[1-2]。而在车路协同系统中, 车辆的精确定位是实现车辆协同控制的核心问题。

收稿日期: 2016-07-13

基金项目: 广东省重大专项基金项目 (2015B010110005)

作者简介: 张辉 (1973-), 男, 河南范县人, 副教授, 博士. (zhanghui@mail.sysu.edu.cn)

目前车辆定位技术主要有惯性导航技术^[3-4]、卫星定位技术^[5]、组合定位技术^[6-7]、基于无线射频识别 (Radio Frequency Identification, RFID) 的无线定位技术^[8-9]等。文献 [3] 指出惯性导航器件误差具有随时间累积的特性, 针对惯性导航系统关键参数在线标校的实际需要, 提出了基于受约束最优化可观测度分析方法、最优标校路径设计方法和基于输出耦合的自适应 Kalman 滤波算法, 有效地提升了导航定位精度。文献 [4] 设计了一个微小型捷联惯导系统, 实现了水下机器人惯性导航系统的导航参数读取, 包含位置、瞬时速度、偏航角等信息, 并通过试验表明该系统满足水下机器人定航控制要求。文献 [5] 论述了 GPS 车辆定位监控系统的设计与实现, 系统试用结果表明该系统能够较精确地完成车辆定位监控与调度。文献 [6] 采用全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)/地图匹配 (Map Matching, MM) 组合定位技术, 借助地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 数字地图中的高精度道路网信息作为分类模板进行模式识别, 根据识别结果校正 GPS 定位误差, 有效提高了定位精度。文献 [7] 设计了 GPS/惯性导航系统 (Inertial Navigation System, INS) 组合导航系统, 该系统定位精度可达 0.1 ~ 0.5 m, 当车速分别为 0.5 m/s 和 1 m/s 时, 路径跟踪的最大横向误差分别为 0.16 m 和 0.27 m。文献 [8] 设计了一种基于 RFID 原理的交通目标搜索和定位方案, 通过改进的 LMS 时延估计方法获得车辆到达不同基站的时间差 (Time Difference of Arrival, TDOA), 然后采用 Chan 算法求解 TDOA 值构成的双曲线方程组获得车辆的位置, 试验平均定位误差小于 15 m。文献 [9] 提出了一种新的多基站 TDOA 车辆定位方法, 有效地克服了传统 Chan 算法中信号衰减引起 TDOA 估计误差较大时性能迅速恶化的问题, 具有较高精度, 满足交通信息获取系统中对车辆定位的要求。

本文探索一种车路协同系统中的车辆精确定位方法, 设计一种能够储存道路信息的信息标识, 并在路面上设置信息标识。当车辆驶过标识时, 安装于车上的成像装置实现对信息标识图像的拾取, 利用加权最小二乘法对图像进行直线拟合得到车辆的运动方向, 识别图像信息得到车辆的精确位置, 结合车辆对于自身运动状态的感知, 实现车辆的精确定位。该方法相比前述几种方法具有以下优点:

(1) 定位精度可达 cm 级, 充分满足车辆协同控制的需求。

- (2) 受周围建筑环境影响小, 适应性强。
- (3) 无需搭建基站, 成本相对较低。
- (4) 算法简单, 位置获取速度快。

1 路面信息标识的设计

本文设计的路面信息标识由多个相同圆形色块组成, 色块颜色应与路面颜色有显著差异。在此以黑色路面、白色圆形色块为例说明其基本原理。

定义白色圆形色块为标记点, 其直径为 D 。将若干标记点排成 1 行, 即可通过其排列方式表征特定信息。一种可行的排列方式为: 按照 D 为间距排列标记点, 存在标记点用数字“1”表示, 不存在标记点用数字“0”表示, 则图 1 所示信息标识中标记点的排列可表示为“100011001010110001”。



图 1 信息标识

Fig. 1 Information mark

依据上述原理, 路面信息标识可以表征各种信息, 如道路名称、速度限制、定位信息等。本文主要针对定位信息进行讨论。定义 1 条路面信息标识包含 30 个数据位, 如图 2 所示。

左侧空白区	起始标识	道路情况数据段	横向位置数据段	中间分隔符	纵向位置数据段	终止标识
5位	3位	3位	7位	2位	7位	3位

图 2 信息标识定义

Fig. 2 Definition of information mark

其中:

- (1) 左侧空白区为两标识之间的间隔, 为连续 5 位的数据 0;
- (2) 起始终止标识均采用连续 3 位的数据 1, 从而与左右侧空白区区分开。
- (3) 道路情况数据段分配 3 个数据位, 区别不同的道路情况, 分为一般直行道路、十字交叉口等道路。
- (4) 横向位置数据段为 7 位, 组成 1 个 7 位二进制数, 表示该信息标识是从道路右边开始第几个信息标识。
- (5) 中间分隔符为连续 2 位的数据 1, 分隔横向位置和纵向位置数据。

(6) 纵向位置数据段为7位,组成1个7位二进制数,表示车辆距离路段终点的距离单位个数。

多条信息标识在道路上依次排布如图3所示,即构成1个行驶方向断面的定位信息。图4为图3的局部放大图,框中信息标识4表示“000001110010000100110001010111”,其含义为该路段为直行路段,该信息标识为从道路右边界起第4个信息标识,该位置距离路段终点10个距离单位(如定义1个纵向距离单位为50 m,则距离路段终点还有500 m)。

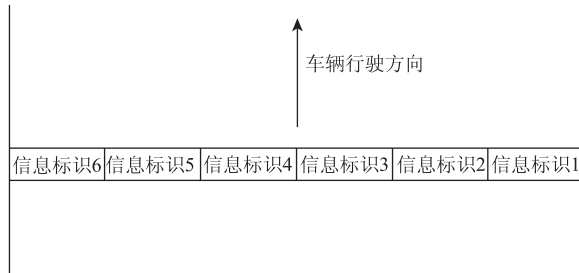


图3 信息标识排布
Fig. 3 Arrangement of information marks



图4 信息标识局部放大图
Fig. 4 Partially enlarged view of information marks

由于信息标识位于道路表面,外部条件比较恶劣,因此对其材料性能有较高要求,即应具有抗滑性和耐磨性,以保证行车安全和使用寿命。本文仅讨论定位算法,关于标识材料的讨论将在后续文章中进行。

2 路面信息标识的识别

2.1 路面信息标识图像的获取

当路面上布设了信息标识后,车辆只需通过成像装置拾取信息标识的图像并识别,即可获得车辆的精确定位信息。成像装置安装在车辆内(图5),垂直向下拍摄。图6表示车辆通过信息标识4时成像装置获取的图像,可以看出标识相对于水平方向有一定的偏转角度,将这个角度定义为偏转角。图7表示车辆通过信息标识时成像装置坐标系和信息标识坐标系的相对关系,忽略车辆运动中的侧偏,其中 α 角为车辆运动方向与道路横向的夹角, β 角为标

识图像的偏转角,满足 $\alpha + \beta = 90^\circ$,因此通过识别所得标识图像的偏转角即可得到车辆的运动方向。



图5 成像装置的位置
Fig. 5 Position of imaging device

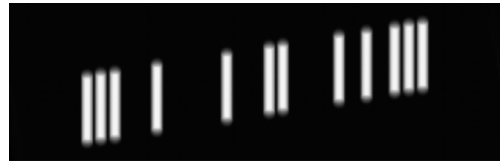
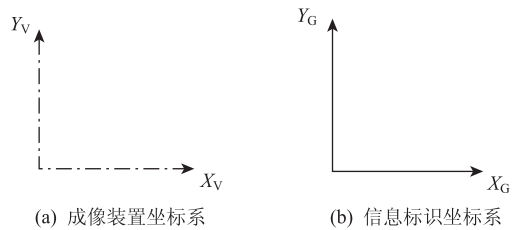
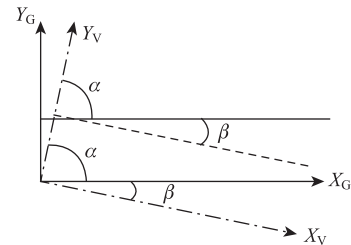


图6 成像装置拾取的图像
Fig. 6 Image picked up by imaging device



(a) 成像装置坐标系 (b) 信息标识坐标系



(c) 成像装置坐标系和信息标识坐标系

图7 成像装置坐标系和信息标识坐标系
Fig. 7 Coordinate systems of imaging device and information marks

2.2 影响信息标识图像的因素

成像装置获取的路面信息标识图像受到几个因素的影响,分别为车速、成像装置的安装高度、路面情况。

(1) 车速对信息标识图像的影响

由于车辆速度的影响,成像装置获取的图像6与图4相比具有道路坐标系 Y_G 轴方向的模糊特性,这是由于成像装置的曝光时间相对于车辆驶过路面标识的时间较长,而成像装置的工作原理是在很短时间里将场景在胶片上曝光。场景中的光线投射在胶片上,引起化学反应,最终产生图片。而车辆运

动使得在曝光过程中场景发生变化,因此形成运动模糊。

本文采用模型车对车速和模糊长度的关系进行模拟试验,试验结果如图8所示。可以看出数据具有明显的线性关系。对数据进行线性拟合可以得到拟合直线方程为 $y = 33.388x - 21.6$, 拟合的 R^2 值为 0.892 6, 拟合效果较好。实际情况中,由于标识图像会有一定的偏转角,因此标识区域所占长度 $B = y \times (1 + \sin \beta)$ 。由于成像装置获取的图像大小为 1280×720 , 为使整个标识处于图像中,则需满足 $B < 720$, 取 90° 极限 β 值求得车 $x < 11.43 \text{ m/s} = 41.15 \text{ km/h}$, 因此本文方法仅适用于车速低于 41.15 km/h 的行驶情况。

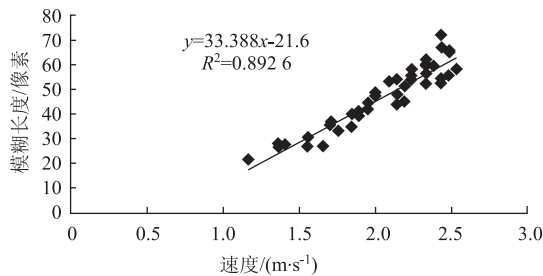


图8 模糊长度和速度的数据

Fig. 8 Data of blur length and velocity

(2) 成像装置安装高度对信息标识图像的影响

本文所使用的成像装置视角为 66° , 假设成像装置的安装高度为 h , 可得到成像装置的视野范围 $Z = 2h \times \tan 33^\circ$ 。下文会提到成像装置视野范围需大于 $40D$, 若 $D = 2 \text{ cm}$, 可以求得 $h > 61.6 \text{ cm}$ 。

(3) 路面情况对信息标识图像的影响

由于信息标识是设置在道路表面, 成像装置获取的信息标识图像会受到路面情况的影响。图9为信息标识设置在真实路面上成像装置静止拍摄得到的图像, 图10为成像装置以一定速度经过信息标识时拍摄得到的图像。可以看出图10中无关背景元素较多, 会对信息标识的识别造成较大影响, 因此在识别前需对图像进行预处理以剔除无关元素。由于标识区域图像相对于背景的特征更为明显, 因此本文采用二值化的方法, 通过自适应阈值算法求算图像阈值进行二值化。图11为图10的二值化效果图, 可见背景剔除效果较好。图11中还进行了1次闭运算, 以消除相邻标记点间的空隙, 方便后续的图像识别。

2.3 路面信息标识的识别

获取信息标识图像的二值图后, 使用加权最小

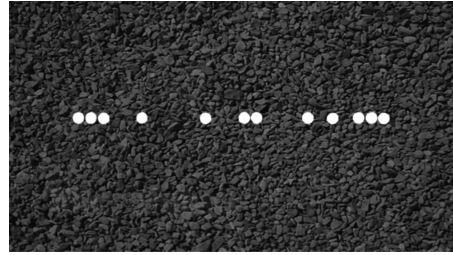


图9 静止图像

Fig. 9 Static image

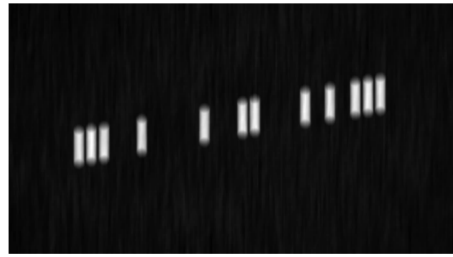


图10 运动图像

Fig. 10 Motion image



图11 二值化图像

Fig. 11 Binary image

二乘法对标识图像进行直线拟合来求算偏转角。假设图像中的白色标识的坐标点为 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, 3, \dots, n$, 坐标点所对应的像素灰度值为 w_i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$, 假设拟合得到的直线表达式为 $y = kx + b$, 在最小二乘法的基础上, 将像素值作为权重进行拟合, 其中直线方程中的斜率 k 和截距 b 可以通过式(1)^[10-17] 计算得到。

$$\begin{cases} b = \bar{y} - k\bar{x} \\ k = \frac{-\bar{b} + \sqrt{\bar{b}^2 + 4\bar{a}^2}}{2\bar{a}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 的加权平均值 $\bar{x} = \frac{\sum (x_i w_i)}{w}$; y 的加权平均值 $\bar{y} = \frac{\sum (y_i w_i)}{w}$; 各点灰度值的和 $w = \sum w_i$; x 和 y 的加权离均差积 $\bar{a} = \sum (x_i y_i w_i) - \bar{x}\bar{y}w$; x 的加权离

均差平方和与 y 的加权离均差平方和的差值 $\tilde{b} = [\sum (x_i^2 w_i) - \bar{x}^2 w] - [\sum (y_i^2 w_i) - \bar{y}^2 w]$ 。

图12为使用加权最小二乘法进行直线拟合的结果。表1为各偏转角度下求得的数据,其中绝对误差为算得角度与实际角度差值的绝对值,由其中数据求出平均绝对误差为 0.71° ,证明算法能得到较精确的偏转角,亦即可得到车辆的精确行驶方向。

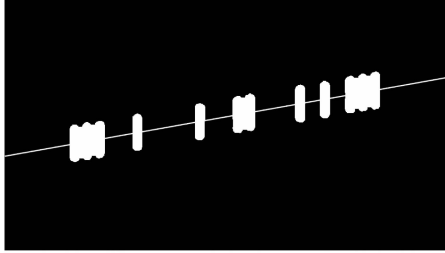


图12 直线拟合结果

Fig. 12 Result of straight line fitting

表1 不同角度下的试验数据

Tab. 1 Experimental data from different angles

实际角度/(°)	算得角度/(°)	绝对误差/(°)
10	10.31	0.31
15	15.46	0.46
20	20.60	0.60
25	25.71	0.71
30	30.80	0.80
35	35.87	0.87
40	40.90	0.90
45	45.91	0.91
50	50.88	0.88

得到标识区域的拟合直线后,通过分析拟合直线上图像的灰度值就能得到信息标识所表示的位置信息。求出拟合直线上各像素点的灰度值(如图13所示),用若干个数字“1”表示各极大值点,用若干个数字“0”表示各极小值点,可以识别出图中的数据“00000111001000010011000101011100000”,从而得到车辆的精确位置信息。

3 车辆精确位置的计算方法

获取标识的信息后就可进行车辆的精确定位。假设一个行驶方向断面上的信息标识分别为 $M_1, M_2, \dots, M_n$, n 为信息标识中横向位置表示的数字,单个标识长度为 L ,由上文可知, $L = 30D$,成像装置的视野中心点为 m ,标识 M_n 中心点的横向位置为

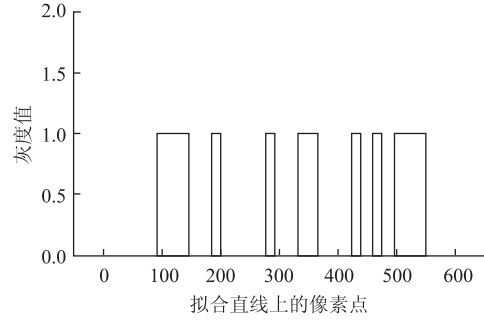


图13 拟合直线上各像素点的灰度值

Fig. 13 Gray values of pixel points on fitting straight line

$P_{nx} = nL - \frac{L}{2}$, 纵向位置为 P_{ny} , 车辆中心点的横向位置为 V_x , 纵向位置为 V_y 。

在拍摄中会出现以下几种情况,分别有不同的计算位置方法:

(1) 理想的拍摄情况是拍摄到的图像包含1个完整的标识(如图14所示),圆形为成像装置的视野范围,此时识别出1个完整标识 M_n ,其中 d_1, d_2 可通过分析图像得到,则车辆横向位置 $V_x = P_{nx} - [m - (\frac{L}{2} + d_1)] = P_{nx} - (\frac{L}{2} + d_2 - m)$, 纵向位置 $V_y = P_{ny}$ 。

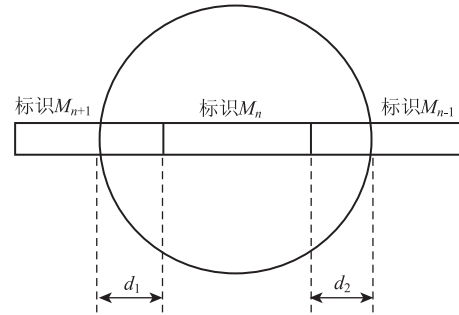


图14 拍摄情况1

Fig. 14 Shooting situation 1

(2) 拍摄到的图像没有1个完整的标识(如图15所示),其中 d_3, d_4 可通过分析图像得到,此时需结合成像装置的视野大小判断视野中的有效信息。若能够获取标识 M_n 的横向位置数据,则车辆的横向位置 $V_x = P_{nx} - (m - d_3 + \frac{L}{2})$; 若能够获取标识 M_{n-1} 的横向位置数据,则车辆的横向位置 $V_x = P_{(n-1)x} + [m - (d_4 - \frac{L}{2})]$ 。纵向位置上只要成像装置视野范围大于 $40D$ 即可得到标识 M_n 的纵向位置数据, $V_y = P_{ny} = P_{(n-1)y}$ 。

为了检验标识横向位置信息获取的准确性,通

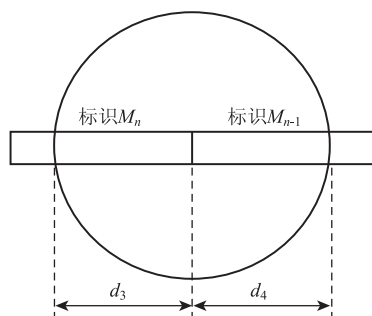


图 15 拍摄情况 2

Fig. 15 Shooting situation 2

过模拟道路和模型车进行定位试验, 其中标记点直径 $D = 2\text{ cm}$, 试验数据如表 2 所示。

表 2 不同距离下的试验数据

Tab. 2 Experimental data from different distances

实际距离/cm	算得距离/cm	绝对误差/cm
140.6	141.4	0.8
143.1	146.0	2.9
148.1	150.8	2.7
153.1	155.8	2.7
160.3	162.7	2.4
166.2	169.5	3.3
171.2	173.6	2.4
175.6	177.6	2
179.0	180.4	1.4
182.5	183.6	1.1

表 2 中的绝对误差为算得距离与实际距离差值的绝对值, 由表 2 中数据求出平均绝对误差为 2.17 cm , 约为 1 个标记点的直径, 证明算法能够得到较精确的车辆位置信息。

如果成像装置相对车体的位置已知, 当车辆通过 1 个信息标识断面时即可获得车辆在道路上的精确位置及行驶方向, 如图 16 中 A 点的位置和行驶信息。但由于这一标识只能在路面上间隔出现, 在两个信息标识之间的车辆定位就需要依靠惯性导航技术, 即在已知初始位置、方向的条件下, 依靠车速、车体横摆角速度可以推算车辆在两个信息标识之间的运动轨迹, 在距离不太长的条件下, 可以实现相当精确的定位^[18-22], 从而实现车辆在全程中的精确定位。

4 结论

本文提出的车辆精确定位方法不需要搭建高昂的检测设备, 只需通过设置路面信息标识和车辆对

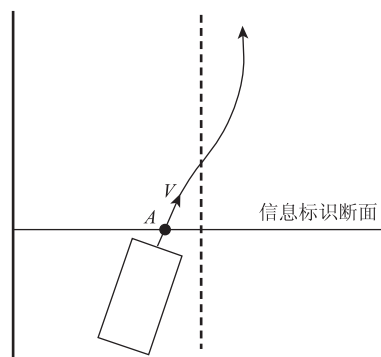


图 16 车辆信息获取示意图

Fig. 16 Schematic diagram of acquisition of vehicle information

标识的识别装置, 结合车辆对于自身运动状态的感知, 就可实现车辆的精确定位。定位精度可达 cm 级。在车路协同系统条件下, 该方法相对便捷, 成本低廉。该信息标识还可表达更多的控制信息, 可在车路协同系统中起到重要作用。

该方法目前主要用于相关的研究和试验, 其中仍有许多问题可以改进。如信息标识的定义规则、信息标识断面在路网中的设置方法、标识的鲁棒性识别、标志点之间的快速惯导计算方法、标识材料的选择等。

参考文献:

References:

- [1] DING Z M, LU F, SUN C L. A Design of Cooperative Vehicle Infrastructure System Based on Internet of Vehicle Technologies [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 552: 363-366.
- [2] 彭登, 徐建闽, 林培群. 城市车路协同系统的通信及定位技术研究 [J]. 计算机工程与设计, 2011, 32 (3): 859-862.
PENG Deng, XU Jian-min, LIN Pei-qun. Research on Communication of City Cooperative Vehicle Infrastructure System and Its Positioning Technology [J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32 (3): 859-862.
- [3] 梁源. 惯性导航系统关键参数在线标校技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
LIANG Yuan. Study on On-line Calibration on Key Parameters of Inertial Navigation System [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [4] 杨磊, 庞硕, 杨耀民, 等. 基于 9DOF IMU 的 AUV 惯性导航技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (3): 133-135.
YANG Lei, PANG Shuo, YANG Yao-min, et al. Study of

- Navigation for AUV Based on 9 DOF IMU [J]. Computer Measurement and Control, 2016, 24 (3): 133–135.
- [5] 纪玉波, 田秋红, 张超. GPS 车辆定位监控系统设计与实现 [J]. 石油化工高等学校学报, 2002, 15 (3): 61–63.
- JI Yu-bo, TIAN Qiu-hong, ZHANG Chao. Design and Implementation of GPS in Vehicle Location and Monitor [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2002, 15 (3): 61–63.
- [6] 张威. 基于 GPS/MM 组合的车辆定位技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- ZHANG Wei. Research of Vehicle Localization Technology Based on Global Positioning System & Map Matching [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [7] 刘军, 袁俊, 蔡骏宇, 等. 基于 GPS/INS 和线控转向的农业机械自动驾驶系统 [J]. 农业工程学报, 2016, 32 (1): 46–53.
- LIU Jun, YUAN Jun, CAI Jun-yu, et al. Autopilot System of Agricultural Vehicles Based on GPS/INS and Steer-by-wire [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (1): 46–53.
- [8] 刘保卫. 基于 RFID 原理的交通目标搜索与定位技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- LIU Bao-wei. Search and Location of Transportation Targets Based on RFID [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [9] 赵泰洋, 郭成安, 金明录. 一种基于 RFID 原理的交通信息获取系统与车辆定位方法 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32 (11): 2612–2617.
- ZHAO Tai-yang, GUO Cheng-an, JIN Ming-lu. A RFID Based Traffic Information Acquisition System and Vehicle Positioning Method [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32 (11): 2612–2617.
- [10] 邵建新. 最小二乘法线性拟合中参数的确定问题 [J]. 大学物理, 2003, 22 (1): 23–24.
- SHAO Jian-xin. Establishment of Parameter in a Linearity Fitting by Method of Least Squares [J]. College Physics, 2003, 22 (1): 23–24.
- [11] WEN W, HAO Z, YANG X. A Heuristic Weight-setting Strategy and Iteratively Updating Algorithm for Weighted Least-squares Support Vector Regression [J]. Neurocomputing, 2008, 71 (16): 3096–3103.
- [12] KRYSZEK M, ANTON M. A Weighted Total Least-squares Algorithm for Fitting a Straight Line [J]. Measurement Science & Technology, 2007, 18 (11): 3438–3442.
- [13] LONGSTAFF F A, SCHWARTZ E S. Valuing American Options by Simulation: A Simple Least-squares Approach [J]. Review of Financial Studies, 2001, 14 (1): 113–47.
- [14] KAMGARPARSI B, KAMGARPARSI B, NETANYAHU N S. A Nonparametric Method for Fitting a Straight Line to a Noisy Image [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1989, 11 (9): 998–1001.
- [15] 孙彦清. 最小二乘法线性拟合应注意的两个问题 [J]. 汉中师范学院学报: 自然科学版, 2002, 20 (3): 58–61.
- SUN Yan-qing. Two Problems on Least Squares Fit [J]. Journal of Hanzhong Teachers College: Natural Science Edition, 2002, 20 (1): 58–61.
- [16] HUNG W L. Weight Least-squares Estimation of the Shape Parameter of the Weibull Distribution [J]. Quality and Reliability Engineering, 2001, 17 (6): 467–469.
- [17] 姜睿, 罗贵明. 基于加权最小二乘法的最优适应控制器 [J]. 自动化学报, 2006, 32 (1): 140–147.
- JIANG Rui, LUO Gui-ming. Optimal Adaptive Controller for Stochastic Systems Based on Weighted Least-squares Algorithm [J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32 (1): 140–147.
- [18] LIN Y, ZHANG W, XIONG J. Specific Force Integration Algorithm with High Accuracy for Strapdown Inertial Navigation System [J]. Aerospace Science & Technology, 2015, 42: 25–30.
- [19] 李泽民, 段凤阳, 李赞平. 基于 MEMS 传感器的数字式航姿系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2012 (6): 94–96.
- LI Ze-min, DUAN Feng-yang, LI Zan-ping. Design of Digital Attitude Heading Reference System Based on MEMS Sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012 (6): 94–96.
- [20] LIU Ji-zhong, DONG Jin-ming. Design and Implementation of an Efficient RSA Crypto-processor [C] // 2010 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC). Shanghai: IEEE, 2010: 368–372.
- [21] 周亮, 付永涛, 李广军. 无线定位与惯性导航结合的室内定位系统设计 [J]. 电子技术应用, 2014, 40 (4): 73–76.
- ZHOU Liang, FU Yong-tao, LI Guang-jun. Design of Indoor Positioning System Based on Inertial Navigation and Wireless Location [J]. Application of Electronic Technique, 2014, 40 (4): 73–76.
- [22] YAO Q M, WANG F Y, GAO H, et al. Location Estimation in Zig Bee Network Based on Fingerprinting [C] // IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, ICVES. Beijing: IEEE, 2007.