

多目视觉与激光组合导航 AGV 精确定位技术研究*

何 珍^{1,2}, 楼佩煌^{1,2}, 钱晓明^{1,2}, 武 星^{1,2}, 朱立群^{1,2}

(1. 南京航空航天大学机电学院 南京 210016; 2. 江苏省精密与微细制造技术重点实验室 南京 210016)

摘要:为进一步提高自动导引车(AGV)的定位精度,提出了一种多目视觉与激光组合导航的精确定位方法。该方法首先提出了一种基于双目视觉实时测量的AGV位姿控制技术,通过多目视觉系统来识别导引线侧的多个圆形标识点完成前瞻预判与精确定姿。采用基于代数距离方差校验的改进型最小二乘拟合椭圆算法来确定各标识中心坐标,结合激光扫描与视觉定位信息,采用无迹卡尔曼滤波算法进行多传感器信息融合,最终实现精确定位。实验结果表明:使用该方法后定位精度明显得到提高,控制曲线更为平滑,定位鲁棒性更好,姿态调整精度可达 $\pm 0.5^\circ$,停车定位精度可达 ± 1 mm。

关键词:自动导引小车;组合导航;无迹卡尔曼滤波;精确定位

中图分类号: TP242.2 TH741 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.50

Research on precise positioning technology for AGV based on multi-object vision and laser integrated navigation

He Zhen^{1,2}, Lou Peihuang^{1,2}, Qian Xiaoming^{1,2}, Wu Xing^{1,2}, Zhu Liqun^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to further improve the positioning accuracy of AGV (Automated Guided Vehicle) and meet the requirements of high-precision positioning occasions, a precise positioning method based on binocular vision and laser integrated navigation is proposed in this paper. Firstly, the method proposes an AGV position and pose control technique based on binocular vision real-time measurement. The multi-object vision system is used to recognize a number of circular identification points on the guide wire side, and the forward looking prediction and accurate pose determination are completed. Then, the improved least squares fitting ellipse algorithm based on algebraic distance variance calibration is used to determine the coordinates of the identification centers. Combining laser scanning and visual positioning information, the Unscented Kalman Filter (UKF) algorithm is adopted to realize the multiple sensor data fusion; and finally, the accurate positioning is realized. Experiment results show that after using the proposed method, the positioning accuracy is improved obviously, the control curve becomes smoother, the positioning robustness becomes better; the attitude adjustment accuracy can reach to ± 0.5 degrees and the comprehensive parking positioning accuracy can reach to ± 1 mm.

Keywords: automated guided vehicle; integrated navigation; unscented Kalman filter (UKF); precise positioning

0 引 言

自动导引车(automated guided vehicle, AGV)作为底层智能物流运输设备在汽车流水生产线、航空航天、船舶重工,装配等诸多工业领域得到了诸多推广应用^[1]。

AGV 由于存在多种导引方式,且均存在各自的局限性,仍有很大空间需要改进使得 AGV 适应性更强、鲁棒性更好、定位精度越高。其中采用磁导引成本低、实现简单、但定位精确低,一般为 ± 20 mm;采用激光导引定位精度高、能达到 ± 2 mm、易受到外界障碍物的屏蔽作用而导航失效;采用视觉导引由于定位精度较高、性价比高等优

点,目前也在不断发展,但视觉导引易受光照环境影响[2]。目前 AGV 不仅要求定位准确,并且车身姿态准确控制也是迫切需要解决的问题,而国内外对此研究较少。因此,融合多种导引技术的组合导引进行定位的方法还需进一步研究。

目前,诸多学者针对组合导引技术进行了大量的探索与研究。夏凌楠等人[3]提出了利用惯性传感器与视觉里程计结合的定位方法;张晓霞等人[4]应用 GPS/DR 组合导航信息融合技术,并结合航位推算系统、扩展卡尔曼滤波(extend Kalman filter, EKF)来实现 AGV 的定位导航;朱奇光等人[5]提出了一种基于容积扩展 H^∞ 滤波(cubature extended H^∞ filter, $CEF \infty F$)的并发建图与定位技术(simultaneous localization and mapping, SLAM)算法,三者实现起来均较为困难,且缺少额外的导航信标来进行辅助定位;朱从民等人[6]构建了利用多传感器来建立 AGV 导航控制系统,但是导引精度不高并且缺乏实时测距的功能;李泽民等人[7]设计了诸多传感器融合的惯性导航 AGV 模拟系统,但由于多传感器所用融合算法存在较大误差,定位精度不高,抗干扰性不强,对于精确定位与导引实现较为困难;钱晓明等人[8]设计了一种基于激光雷达与射频扫描仪的定位方法,只能够进行粗定位。

本文提出了一种多目视觉系统与激光扫描组合导航的 AGV 精确定位方法,首先采用前后摄像机对多个圆形标识点识别实现前瞻预判以及视觉定姿,提出利用双目实时测量的 AGV 位姿控制技术,通过提前调整 AGV 自身位姿以保证精准定姿。提出的一种基于代数距离方差校验的改进型最小二乘快速拟合算法来实现中心摄像机视觉局部精确定位;同时,再结合基于 Markov 的全局定位激光扫描定位系统来实现全局精确定位。最后,将两者定位信息经由无迹卡尔曼滤波器(unscented Kalman filter, UKF)实现多传感器信息融合,实现 AGV 整体精确定位,整个精确定位过程包含了图像采集、图像预处理、边缘提取、位姿矫正、局部视觉与全局激光复合定位。

1 AGV 多目视觉与激光复合导引模型

1.1 AGV 多目视觉与激光复合导引装置布局

本文采用的 AGV 模型如图 1 所示,该 AGV 是采用 4 轮独立驱动可全方位移动的麦克纳姆轮重载车,其运动方式灵活多变,可应用于工厂空间有限却运输频繁的场所。导引装置由图像处理单元、倾斜安装于车体前后的摄像机以及垂直安装于车体中心底部的摄像机、激光雷达、嵌入式系统等组成。其中,前后摄像机位于车体纵向中心线上,底部摄像机位于横向中心线上且距车体中心原点 X_0 处,激光雷达安装在底部摄像机正上方,其定位中心与摄像机光心重合。

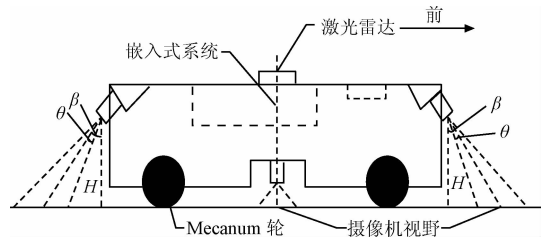


图 1 AGV 导引装置模型

Fig. 1 The AGV guiding device model

该多目视觉导引系统标定采用石陈陈等人[9]提出的多目视觉主动协同标定的方法,首先通过平面模板法完成各摄像机内、外部参数的标定,然后分别控制 AGV 前中以及后中两摄像机协同完成视觉导引运动,并基于特征轨迹约束法来估计各摄像机坐标系相对于 AGV 本体中心的位置误差以及装配误差,进而建立各摄像机视觉测量坐标系与 AGV 运动控制坐标系的变换模型来完成标定。

1.2 AGV 多目视觉与激光复合导引建模

本文采用的多目视觉系统包含前后两个倾斜摄像机以及中间特定位置的垂直摄像机,前置或后置既可进行路径追踪,同时也可两者协同利用实时测距算法来实时调整 AGV 车身姿态,控制姿态参数 $T(\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta \theta)$ 来确保车体中心线与视觉导引线重合;激光定位系统则是由一个二维激光扫描雷达、数据接入终端、5~6 块外置激光反射板组成,其中二维激光雷达在 AGV 行进过程中不断扫描四周环境,获得至少来自 3 块反射板的距离 (S_1, S_2, S_3) ,然后基于三角定位原理来确定 AGV 的全局定位坐标,具体系统建模方案如图 2 所示。

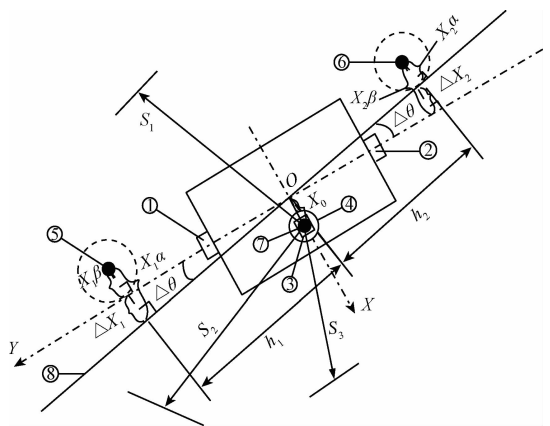


图 2 多目视觉与激光复合导引模型

Fig. 2 The composite guided model of multi-object vision and laser

图 2 中①、②、③分别代表前置、后置、中间 3 个摄像机,④代表二维激光扫描雷达,⑤、⑥、⑦均表示地面圆形标识,⑧表示地面导引线,坐标系 $X-O-Y$ 是以 AGV 车体

中心作为原点,以车体前进方向作为 Y 轴正方向,车体前进方向左侧作为 X 轴正方向。 X_1^a 、 X_2^a 分别为前后两圆心标识点距离导引线的固定垂直距离, X_1^b 、 X_2^b 分别为前置与后置摄像机实时测距得到的距离偏差, h_1 、 h_2 分别为⑤标识点、⑥标识点距标识点⑦的距离, $\Delta\theta$ 则为小车身前进中心线方向与导引线所成的夹角。

1.3 组合导航系统坐标系建立

组合导航系统由多目视觉系统、嵌入式控制系统以及激光扫描定位系统^[10]组成。那么选取一个二维平面坐标系作为世界坐标系 X_w-O-Y_w , 并设该 AGV 在世界坐标系内的位姿 $Q = (x_s, y_s, \theta_s)$, 根据摄像机的内外参数, 可以将图像像素坐标系转化为以 AGV 中间摄像机为主的视觉坐标系 X_v-O-Y_v 下, 进而综合激光定位与多目视觉组合定位来达到目标点在世界坐标系下的坐标 (x_q, y_q) 。其中 V_v 为 AGV 行进速度, θ_s 为 AGV 的偏转角度, 由编码器测量得到。前后方向坐标系关系一致, 因此其单方向组合导航坐标系建模如图 3 所示。

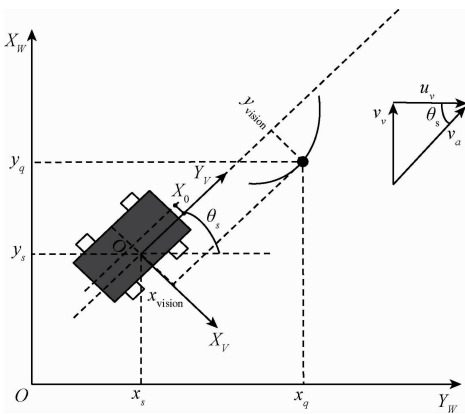


图3 导航系统坐标系关系

Fig.3 Coordinate system relation diagram of the navigation system

根据目标点在上述系统坐标系下的位置关系,可以得到目标点在世界坐标系以及相应视觉坐标系下的坐标转换关系,那么目标点在世界坐标系以及以中间摄像机为中心的视觉坐标系下的坐标转换关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} x_q = x_s + x_{\text{vision}} \sin\theta_s + y_{\text{vision}} \cos\theta_s \\ y_q = y_s - x_{\text{vision}} \cos\theta_s + y_{\text{vision}} \sin\theta_s \end{cases} \quad (1)$$

2 精确定位与算法分析

2.1 精确定位策略及算法流程

该 AGV 组合导引控制系统主要由多目视觉定位系统、激光扫描定位系统以及嵌入式控制系统三大部分组成。其中多目视觉系统通过对多个圆形标识的图像采

集、处理,来实现基于视觉的局部精确定位,一方面前置或后置摄像头作为标识预判单元,完成小车减速及粗定位的功能,中间底部摄像机则用于实现小车的精确定位,另一方面利用前置以及后置两摄像机来实现实时测距并提前调整姿态参数来保证 AGV 停车时的正确姿态;中间摄像机基于改进后的最小二乘椭圆定点方法来实现视觉局部定位;激光扫描定位系统则是由安装在底部摄像机正上方的二维激光雷达对四周反射板不断进行扫描来实现全局的精确定位,获得在指定的世界坐标系的二维空间位置坐标;嵌入式控制系统中的编码器单元能够实时测量出 AGV 小车当前在二维平面上的角速度、角加速度与线速度、线加速度等^[11],并输出给导引控制器来获得小车当前的航向角度与运行速度;最后通过坐标变换,利用基于 UKF 的多传感器信息融合技术^[12]来获得更为精确的位置信息,进而实现 AGV 小车精确定位。

2.2 多目视觉系统精确测量与定位

2.2.1 标识检测与图像预处理

对于多目视觉系统由前、中、后 3 个摄像机采集图像,包含前进与后退两个方向。定位标识检测的过程包含对彩色图像二值化处理、中值滤波、自适应阈值分割、图像去噪及边缘提取、曲线拟合等步骤,来确定定位坐标。

本实验平台均采用彩色 CCD 摄像机对目标图像采集,信号采用逐行倒相(phase alternating line, PAL)制式传输给视频编解码器,经由解码器解码后输出 8 位 BT-601 YCbCr 格式的彩色图像,在此类格式中,Cb 分量与 Cr 分量分别代表蓝色分量与红色分量,且在当前的实验条件下能被很好的识别。本文是在水磨石路面的环境下进行试验,用蓝色色带作为 AGV 巡线行驶路径,用蓝色圆形点作为定位标识。对彩色图像二值化处理后进行图像预处理,结合改进中值滤波算法^[13]来对图形去噪声处理,如前置摄像机初始图像预处理结果图 4 所示。

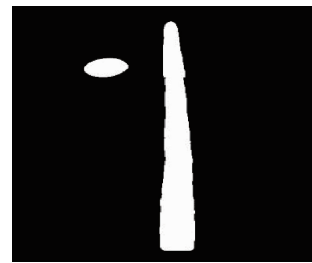


图4 图像预处理结果

Fig.4 The image pre-processing result

2.2.2 标识边缘测定

1) 标识边缘提取

由于定位标识点在图像中只占有小部分,图像噪声少,为满足 AGV 视觉导引实时性的要求,尽可能地减少像

素点的运算,本文优先采用张建鹏等人^[14]提出的基于椭圆几何特征的方法来获取目标的边缘,即先对椭圆标识区域进行块状提取,再采用形态学膨胀算法来进行掩膜处理,以便获取不规则的可用区域,最后提取出有效的椭圆边界。

假设 $V_i(u(i), v(i))$ 为目标物体的一个边界点,表示第 i 个点的像素点坐标值。那么下一边界点将在其邻域进行搜索,并且按照上述方法相应的椭圆区域划分及方向码进行选择跟踪,最后按照基于椭圆几何特征方法,在检测到的目标区域从左至右的顺序不断进行扫描追踪,并将依次检索扫描到的边缘目标点保存起来,从而得到边缘点序列集合 $V = \{V_i(u(i), v(i)) \mid (i = 1, 2, \dots, n)\}$,并对这些边缘点进行后续处理。

2) 边缘提取结果

通过对上述采集的图像边缘像素点序列 V 细化处理,得到椭圆边缘提取效果,前置(后置)摄像机拍摄的圆形标识呈现椭圆如图 5 所示,底部中心摄像机识别的圆形标识如图 6 所示。

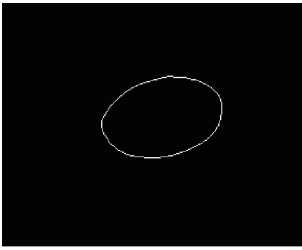


图 5 椭圆边缘提取效果

Fig. 5 The extraction effect of ellipse edge

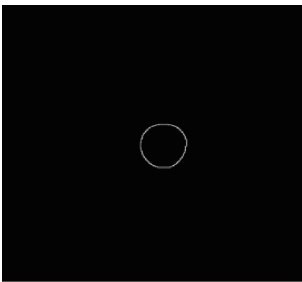


图 6 圆形边缘提取效果

Fig. 6 The extraction effect of round edge

2.2.3 标识点测量与位姿确定

为确保 AGV 停车定位时不仅定位准确,同时位姿也能得到确定,采用组合定位之前提前进行 AGV 位姿确定,来进一步保证 AGV 的精准停车定位。因此,本文提出了一种基于双目视觉实时测量位姿控制技术,通过不断控制调节姿态参数 $T(\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta \theta)$,进而优化车身位姿,使得 AGV 的车体中心线与导引线重合。根据上述图 3 的多目视觉与激光复合导引建模关系图中,通过图 3 得出:

$$\begin{cases} \Delta X_1 = X_1^a - X_1^b \\ \Delta X_2 = X_2^a - X_2^b \\ \Delta \theta = \arctan\left(\left|\frac{\Delta X_1}{h_1}\right|\right) = \arctan\left(\left|\frac{\Delta X_2}{h_2}\right|\right) \end{cases} \quad (2)$$

通过上述的运动过程关系,便可以推出 K 时刻时, AGV 的位姿参数为 $T_k = (\Delta X_1^k, \Delta X_2^k, \Delta \theta^k)$ 其中 $T_k = (\Delta X_1^0, \Delta X_2^0, \Delta \theta^0)$ 为初始时刻参数,那么有:

$$\begin{cases} \Delta X_1^k = \Delta X_1^0 + \sum_{i=1}^k \Delta X_1^i \\ \Delta X_2^k = \Delta X_2^0 + \sum_{i=1}^k \Delta X_2^i \\ \Delta \theta^k = \Delta \theta^0 + \sum_{i=1}^k \Delta \theta^i \end{cases} \quad (3)$$

对于上述姿态参数,采用动态非线性系统运动模型来进行描述,可以简化成:

$$T_k = G(T_{k-1}, v_k) + \omega_k \quad (4)$$

那么 $G(T_{k-1}, u_k)$ 为高度非线性系统的状态转换函数, T_k, T_{k-1} 为当前时刻以及上一时刻的位姿参数, ω_k 为 AGV 运动过程中产生的一定噪声,视觉系统控制信息为 $v_k = (V, \beta)$,在 Δt 时间内通过控制机器人运动速度 V 以及角速度 β ,则视觉运动控制模型为:

$$S_k = \begin{bmatrix} \Delta X_1^k \\ \Delta X_2^k \\ \Delta \theta^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_1^{k-1} + V\Delta t \cos(\Delta \theta^{k-1} + \beta \Delta t) \\ \Delta X_2^{k-1} + V\Delta t \sin(\Delta \theta^{k-1} + \beta \Delta t) \\ \Delta \theta_{k-1} + \beta \Delta t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{x1} \\ \omega_{x2} \\ \omega_\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

综上所述,利用前置与后置两摄像机对前后同侧标识点进行协同视觉测量后,得到位姿控制参数 T_k ,然后由视觉导航控制系统基于上述运动模型 S_k 来逐步逼近,最终来实现 AGV 精准控制自身位姿,进一步减小可控误差来提高 AGV 的定位精度。

2.2.4 标识中心点定位

根据上述提取的边缘信息对椭圆进行拟合来实现其中心定位的目标,最小二乘法作为曲线拟合的经典方法^[15],在椭圆拟合方面发挥出色,因此,本文提出了一种基于代数距离方差校验的改进型最小二乘法椭圆拟合方法,根据采集到的边缘序列 V ,在其中随机化抽取至少 6 点来拟合初始椭圆,然后计算出其余边缘信息点距离当前拟合椭圆的代数距离集合 $S = \{S_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 并对集合计算方差,得出结果与系统预设方差阈值 t 相比较,小于 t 则作为椭圆参数方程;大于 t 则继续循环,为保证小车实时性,循环次数 n 为合理有限值,如果循环次数达到 n ,仍未满足条件,则取方差最小的一个作为拟合的椭圆方程。

在二维平面内,椭圆一般方程可表示为 $Au^2 + Buv + Cv^2 + Du + Ev + F = 0$,因此可以设拟合椭圆中心坐标 (u_0, v_0) ,长轴与短轴分别表示为 a_0, b_0 ,那么根据椭圆的几何性质得出:

$$\begin{cases} a_0 = 2 \sqrt{\frac{-2F}{C+A - \sqrt{\left(\frac{C-A}{F}\right)^2 + B^2}}} \\ b_0 = 2 \sqrt{\frac{-2F}{C+A + \sqrt{\left(\frac{C-A}{F}\right)^2 + B^2}}} \\ u_0 = \frac{2CD - BE}{B^2 - 4AC} \\ v_0 = \frac{2AE - BD}{B^2 - 4AC} \end{cases} \quad (6)$$

为避免椭圆一般方程零解或者整数倍解,需添加约束条件来消除这类情况,约束条件为 $A + C = 1$, 平面内某点 (u_1, v_1) 到方程 $g(u, v) = 0$ 的距离可表示为代数距离 $g(u_1, v_1)$, 那么直接将椭圆边缘离散点进行最小二乘化处理, 就可以得出椭圆未知的 6 个参数 A, B, C, D, E, F , 同样, 长轴、短轴以及椭圆中心坐标便可以求出, 即求出目标函数为:

$$g(A, B, C, D, E, F) =$$

$$\sum_{i=1}^n (Au_i^2 + Bu_iv_i + Cv_i^2 + Du_i + Ev_i + F) \quad (7)$$

并使得该目标函数值最小来确定各系数, 因此, 由极值原理, 若要使得 $g(A, B, C, D, E, F)$ 最小, 则必须满足式(8)即可。

$$\frac{\partial g}{\partial A} = \frac{\partial g}{\partial B} = \frac{\partial g}{\partial C} = \frac{\partial g}{\partial D} = \frac{\partial g}{\partial E} = \frac{\partial g}{\partial F} = 0 \quad (8)$$

式(8)为一个线性方程组并结合约束条件, 便可以求出 A, B, C, D, E, F 的值, 那么相应的长轴 a_0 与短轴 b_0 , 椭圆中心坐标 (u_0, v_0) 。因此, 当 AGV 前进时, 前置摄像头由于倾斜安装, 识别的图像即为椭圆, 当识别到椭圆标识后, AGV 小车便立刻进行前瞻预判并减速处理, 缓慢巡线行驶, 直至圆形标识进入底部垂直安装摄像机, 用改进后的最小二乘法对椭圆边缘进行拟合, 当满足 $\|B\| = \Delta\theta$ ($\Delta\theta$ 为接近于 0 的数), 且 $\|A - C\| = \Delta\beta$ ($\Delta\beta$ 为接近于 0 的数), 那么, 此时的圆心坐标则作为视觉定位中心点, 并结合激光定位, 利用 UKF 算法进行坐标融合计算来实现小车精准定位。

2.3 UKF 算法

该组合导航系统属于非线性系统, 且误差不能太大, 因此优先采用 UKF 滤波算法实现多传感器信息融合。该算法无需计算雅可比矩阵, 可以精确到二阶或者更高, 可以大大提高系统精度, 在处理系统状态方程时, 必须先进行 UT 变换, 再对变换后的状态变量进行滤波估计, 那么该系统非线性模型如下:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \mathbf{F}_k(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{w}_{k-1} \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{Q}_k(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (9)$$

式中: \mathbf{x}_k 表示系统状态向量, \mathbf{z}_k 表示系统量测向量, \mathbf{Q}_k 为系统状态向量与量测向量关系矩阵, $\mathbf{w}_k, \mathbf{v}_k$ 分别表示系统的过程噪声及量测噪声, 两类噪声独立且互不相干,

并设 \mathbf{w}_k 的协方差矩阵 \mathbf{T}_k , \mathbf{v}_k 的协方差矩阵 \mathbf{R}_k , 并且假设 \mathbf{x} 的均值与协方差分别为 $\bar{\mathbf{x}}$ 与 \mathbf{P}_x , 故 UKF 算法每个循环步骤如下:

1) 计算 $2n + 1$ 个取样点 $\xi_k(i)$ 及其相应的权值 w_i , 如式(10)、(11)所示。

$$\begin{cases} \xi_0 = \bar{\mathbf{x}}, & i = 0 \\ \xi_i = (\sqrt{\mathbf{P}_x(n + \lambda)})_i + \bar{\mathbf{x}}, & i = 1, 2, \dots, n \\ \xi_i = \bar{\mathbf{x}} - (\sqrt{\mathbf{P}_x(n + \lambda)})_i, & i = n + 1, \\ & n + 2, \dots, 2n \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} w_0^u = \lambda / (\lambda + n) \\ w_0^v = (1 - \psi^2 + \vartheta) + \lambda / (\lambda + n) \\ w_i^u = w_i^v = 1 / [2(\lambda + n)] \end{cases} \quad (11)$$

$i = 1, 2, \dots, 2n$

式中: $\lambda = \psi^2(n + \beta)$, ψ 决定于取样点的分散程度, 一般 ψ 的取值范围为 $(0, 1)$, 通常将其取为 0, n 为系统状态向量的个数, $\sqrt{\mathbf{P}_x(n + \lambda)}_i$ 表示矩阵 $\sqrt{\mathbf{P}_x(n + \lambda)}$ 的第 i 列, ϑ 用来描述 \mathbf{x} 的分布信息, w_i^u 为求系统一阶特性的权系数, w_i^v 为求系统二阶特性的权系数。

2) 对取样点 $\xi_{(k-1)}(i)$ 进行状态方程的传播, 并对系统的状态及滤波协方差进行预测如式(12)所示。

$$\begin{cases} \xi_k(i) = \mathbf{F}_{k-1}\xi_{k-1}(i) \\ \tilde{\mathbf{x}}_k = \sum_{i=0}^{2n} w_i^u \xi_k(i) \\ \tilde{\mathbf{P}}_k = \mathbf{T}_{k-1} + \sum_{i=0}^{2n} w_i^v (\xi_k(i) - \tilde{\mathbf{x}}_k)(\xi_k(i) - \tilde{\mathbf{x}}_k)^T \end{cases} \quad (12)$$

$i = 1, 2, \dots, 2n$

针对上述步骤算出来的 $\tilde{\mathbf{x}}_k, \tilde{\mathbf{P}}_k$ 分别待入式(11), 来分别取代 $\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{P}_x$, 进而更新 $\xi_k(i)$ 点。

3) 经由式(12)计算输出预测如下:

$$\begin{cases} \xi_k(i) = \mathbf{Q}_k \xi_k(i) \\ \tilde{\mathbf{z}}_k = \sum_{i=0}^{2n} w_i^v \xi_k(i) \\ \mathbf{P}_{x,z} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^v (\xi_k(i) - \tilde{\mathbf{x}}_k)(\xi_k(i) - \tilde{\mathbf{z}}_k)^T \\ \mathbf{P}_z = \sum_{i=0}^{2n} w_i^v (\xi_k(i) - \tilde{\mathbf{z}}_k)(\xi_k(i) - \tilde{\mathbf{z}}_k)^T + \mathbf{R}_k \end{cases} \quad (13)$$

4) 根据求得的量测向量 \mathbf{z}_k , 那么进一步对系统的状态及滤波误差进行更新, 如式(14)所示, 式中 \mathbf{U}_u 为滤波增益矩阵。

$$\begin{cases} \mathbf{U}_u = \mathbf{P}_{x,z} \mathbf{P}_z^{-1} \\ \mathbf{x}_k = \mathbf{U}_u (\mathbf{z}_k - \tilde{\mathbf{z}}_k) + \tilde{\mathbf{x}}_k \\ \mathbf{P}_k = \tilde{\mathbf{P}}_k - \mathbf{U}_u \mathbf{P}_z^{-1} \mathbf{U}_u^T \end{cases} \quad (14)$$

2.4 建立多传感器信息融合模型

由于 AGV 车载传感器均存在测量误差, 且彼此的误差相互独立。因此, 需采用多源数据信息融合技术进行

分析验证并补充综合,来最大程度上降低数据采集的不确定性以提高 AGV 定位精度。本文采用 UKF 滤波器来实现 AGV 多传感器数据信息融合并得出最终定位坐标。该多传感器信息融合系统主要包含 3 个视觉传感器、1 个激光雷达、4 个电机编码器等,将 3 个视觉传感器进行数据相关,将中间视觉传感器与激光雷达进行数据融合,将四轴编码器进行特征提取得到相关速度与角度信息,最后通过 UKF 滤波器的数据融合与数据关联策略得到最终定位信息,并由 AGV 将相关信息反馈给上述传感器形成闭环控制,进而达到 AGV 整体精确定位的目的,其信息融合策略如图 7 所示。

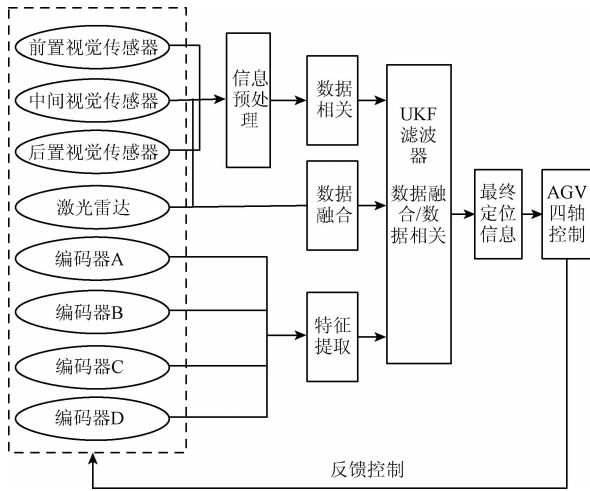


图 7 多传感器信息融合策略

Fig. 7 The information fusion strategy diagram of multi-sensors

同时,根据上述建立的组合导航系统模型与 UKF 算法的基本方法^[16]及其相关原理,不难确定 k 时刻的状态向量 x_k 可以表示如式(15)所示。

$$x_k = (x_{q,k}, y_{q,k}, x_{s,k}, y_{s,k}, u_{v,k}, v_{v,k}, \theta_{s,k}) \quad (15)$$

式中: $(x_{q,k}, y_{q,k})$ 表示目标点在世界坐标系下的位置坐标, $(x_{s,k}, y_{s,k})$ 表示激光雷达在世界坐标系下的位置信息, $(u_{v,k}, v_{v,k})$ 表示 AGV 前进速度 v_a 在世界坐标系下的水平分量与垂直分量, $\theta_{s,k}$ 表示 AGV 的航向角度。

利用多目视觉系统与激光扫描定位系统的输出相关信息作为量测值,那么 k 时刻的量测向量可以如式(16)所示。

$$z_k = (x_{s,k}, y_{s,k}, \theta_{s,k}, v_{a,k}, x_{vision,k}, y_{vision,k}) \quad (16)$$

式中: $(x_{s,k}, y_{s,k})$ 由激光雷达在二维空间内进行特征提取并利用基于 Markov 的全局定位方法来获得的位置坐标, $(x_{vision,k}, y_{vision,k})$ 表示目标点在以中间摄像机为中心的坐标系下的位置坐标, $(\theta_{s,k}, v_{a,k})$ 由编码器测得的航向角度以及行进速度。

本文实验中 AGV 行驶速度在极短时间 Δt 内可以等效于匀速行驶,综上所述,可以求得 k 时刻到 $k + 1$ 时刻的系统转移矩阵 F_k 以及关系矩阵 Q_k ,如式(17)、(18)所示。

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$Q_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{u_{v,k}}{\sqrt{u_{v,k}^2 + v_{v,k}^2}} & \frac{v_{v,k}}{\sqrt{u_{v,k}^2 + v_{v,k}^2}} & 0 \\ \sin\theta_s & -\cos\theta_s & -\sin\theta_s & \cos\theta_s & 0 & 0 & 0 \\ \cos\theta_s & \sin\theta_s & -\cos\theta_s & -\sin\theta_s & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

对于 UKF 算法中噪声协方差矩阵需要进行测定,将 AGV 的各传感器打开,然后将接收到的数据进行统一处理,并以此作为基准,然后根据所选算法的精度及相关经验多次测试后来最终确定 UKF 滤波器的 T 矩阵、 R 矩阵以及 P 矩阵,3 个矩阵的初值设定如式(19)~(21)所示。

$$T = \begin{bmatrix} 0.2^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2^3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2^3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2^3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2^3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2^3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.01^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.02^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

3 实验结果与分析

3.1 图形处理过程与分析

为实现本文提出的改进型圆形标识图像处理定位算法,采用了实验室自主研发的基于多目视觉导引的全方位移动重载 AGV 平台,摄像机图像分辨率达 640×480 ,镜头广角采用大广角 170° ;激光扫描定位系统采用德国 SICK 公司生产的 LMS291 系列 2D 激光雷达,角度分辨率可达 0.25° ,扫描频率最高可达 75 Hz ,响应时间最快可达 13 ms ,整个系统主要由以 DSP TMS320DM642 为核心的嵌入式多目视觉导引系统、ARM 为核心的运动控制系统以及激光雷达三大部分组成。系统运动控制中心根据 DSP 图像处理求出的路径偏差来实时调整 AGV 行进姿态,进而实现 AGV 的精确导引,在 AGV 中间摄像机的正上方安装二维激光雷达,前置或者后置摄像机安装高度距离地面 18 mm ,并且与垂直平面的夹角成 50° 。系统装置如图 8 所示。其中,DSP 允许 4 通道模拟视频信号同时接入,本实验用到前、中、后 3 路模拟视频输入,视频口只需视频采样时钟与采样使能信号,并由 TVP5150 芯片组基于系统时钟 SCLK 提供统一的采样时钟,使各采集通道信号之间保持良好的相位一致性,进而实现多通道数据采集的同步性,也是保障视觉精确定位的前提。

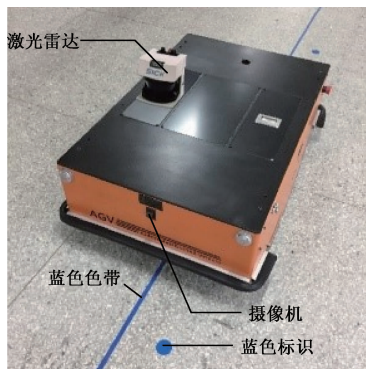


图 8 组合导航系统装置

Fig. 8 The integrated navigation system device

为进一步验证本文提出图像处理方法的定位精度以及系统鲁棒性,实验环境选在白色瓷砖上铺设蓝色圆形人工标识,图像采集频率为 28 f/s ,总共采集 50 组图像数据,通过 MATLAB 并使用该算法平均处理一幅图片的时间约为 10 ms ,能够满足室内 AGV 的导引实时性的要求。从下列图 9 可以看出圆形定位标识点提取边缘更加清晰,受环境污染小,抗干扰性增强。

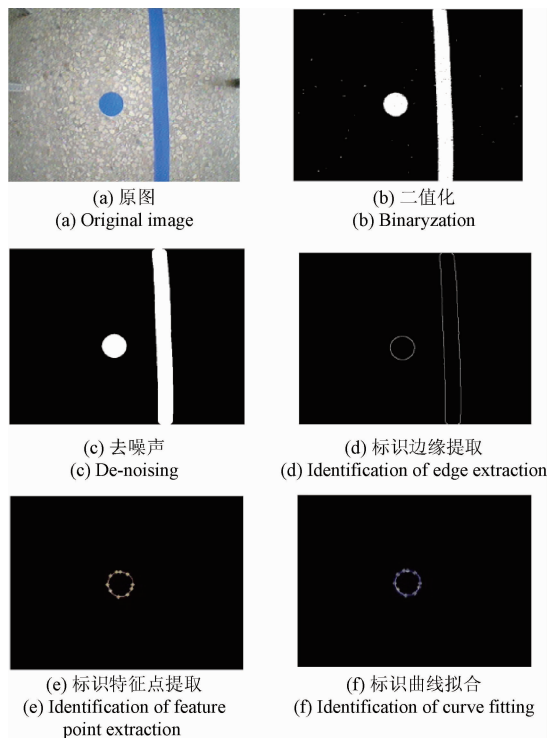


图 9 图像处理流程

Fig. 9 The image processing process

3.2 组合导航精确定位

为验证组合导航系统的定位精度,实验中 AGV 以 0.5 m/s 的速度向前行驶,激光雷达在初始状态保持开启状态,实时输出较为精确的位置信息,通过 UKF 滤波器的作用来实现多传感器信息融合,为保证测量定位精度的稳定性,在同一工位点进行多次试验,试验次数达到了 400 次,并设对于 AGV 在定位点的 x 方向上的距离偏差 Δx , y 方向上的距离偏差 Δy ,以及小车位姿与小车前进方向所成角 θ 的角度偏差 $\Delta \theta$ 进行准确测量,测量结果如下图所示。实验结果数据表明,采用视觉导引原始定位精度达 $3 \sim 4 \text{ mm}$,通过与激光雷达的组合导航,并采用 UKF 滤波器算法与 KF 算法进行比较,不难发现,UKF 算法定位曲线更加顺滑,突变情况少,算法鲁棒性更好;另外,在 Δx 方向上的定位偏差优化比 Δy 、 $\Delta \theta$ 方向上偏差优化明显,主要在于 Δx 方向上采用了多目视觉与激光组合定位,相比单目视觉定位,根据视觉测量原理在 Δx 方

向上形成多点距离偏差约束以及多点偏差优化,综合优化效果更为明显,而对于 Δy 方向定位主要取决于激光雷达定位精度以及图像信息处理的实时性,由于该算法计算量相对较大,个别图像信息未能及时处理,进而导致 Δy 方向偏差优化不明显,但是该算法相比传统算法,控制鲁棒性更好,AGV 停车定位更为平稳,对于 $\Delta\theta$ 方向主要由于采用视觉导引定位本身 $\Delta\theta$ 方向上定位精度较高,虽然改进后的定位算法较好,但 AGV 控制伺服电机分辨率有限,故角度偏差优化有限,但是控制转动更为平稳,其中 Δx 稳定在 ± 1 mm, Δy 稳定在 ± 1 mm, $\Delta\theta$ 则稳定在 $\pm 0.5^\circ$ 。

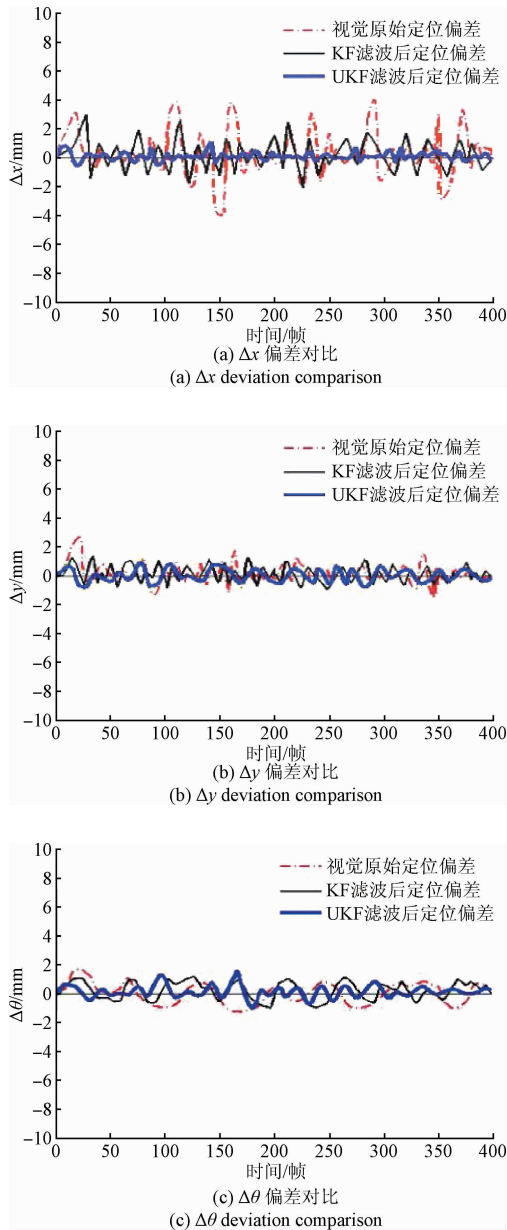


图 10 定位偏差对比关系

Fig. 10 Comparison relations of location deviations

4 结 论

本文提出了一种多目视觉系统与激光扫描组合导航的 AGV 精确定位方法。该方法首先提出了一种基于双目实时测量控制 AGV 位姿技术,利用前(后)置摄像机识别多个圆形标识点来完成前瞻预判与多目视觉测量,进而提前实现 AGV 精准定姿,来保证后续 AGV 能够实现精准停车定位,再利用提出的一种基于代数距离方差校验的改进型最小二乘快速拟合算法来实现中心摄像机视觉局部精确定位;同时结合基于 Markov 的全局定位激光扫描定位系统来实现全局精确定位,最后将两者定位信息经由基于 UKF 滤波器的多传感器信息融合技术,来最终确定 AGV 定位坐标完成 AGV 整体精确定位。通过大量的实验表明,采用视觉与激光组合定位,定位精度以及定位姿态均得到了很大提高,利用 UKF 滤波后的定位信息与 KF 滤波后定位信息进行比较,UKF 滤波处理后的曲线更为平滑,定位鲁棒性更好,AGV 定位精度可以达到 ± 1 mm,其中 Δx 稳定在 ± 1 mm, Δy 稳定在 ± 1 mm,则 $\Delta\theta$ 稳定在 ± 0.5 。

参考文献

- [1] 史恩秀,黄玉美. 自主导航小车 AGV 定位方法的研究[J]. 传感技术学报,2007,20(1):233-236.
SHI EN X, HUANG Y M. The study of navigation method for AGV [J]. Journal of Transduction Technology, 2007, 20(1): 233-236.
- [2] 喻俊,楼佩煌,钱晓明,等. 自动导引车视觉导引路径的识别及精确测量[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2012,40(3):143-149.
YU J, LOU P H, QIAN X M, et al. Recognition and accurate measurement of vision-guided path of automatic guided vehicle [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(3): 143-149.
- [3] 夏凌楠,张波,王营冠,等. 基于惯性传感器和视觉里程计的机器人定位[J]. 仪器仪表学报,2013,34(1):166-172.
XIA L N, ZHANG B, WANG Y G, et al. Robot localization algorithm based on inertial sensor and video odometry [J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2013, 34(1):166-172.
- [4] 张晓霞,汪传龙,韩刘柱,等. AGV 用 GPS/DR 组合导航信息融合[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2011,27(1):173-177.
ZHANG X X, WANG CH L, HAN L ZH, et al. The information fusion of AGV by using GPS/DR integrated navigation system [J]. Journal of Shenyang Construction University: Natural Science Edition, 2011, 27(1):

- 173-177.
- [5] 朱奇光,袁梅,陈卫东,等. 基于 $CEH \infty F$ 的机器人 SLAM 算法研究[J]. 仪器仪表学报,2015,36(10): 2304-2311.
ZHU Q G, YUAN M, CHEN W D, et al. $CEH \infty F$ based SLAM algorithm for mobile robots [J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2015, 36 (10): 2304-2311.
- [6] 朱从民,黄玉美,上官望义,等. AGV 多传感器导航系统研究 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29 (11): 2419-2423.
ZHU C M, HUANG Y M, SHANGGUAN W Y, et al. Research on AGV multi-sensor navigation system [J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2008, 29(11): 2419-2423.
- [7] 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, 31(6): 94-96,100.
LI Z M, DUAN F Y, LI Z P. Design of digital navigation and attitude system based on MEMS sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, 31(6): 94-96,100.
- [8] 钱晓明,张浩,王晓勇,等. 基于激光扫描匹配的移动机器人相对定位技术研究[J]. 农业机械学报,2016, 47(3):14-21.
QIAN X M, ZHANG H, WANG X Y, et al. Relative localization technology for mobile robot based on laser scan matching [J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2016, 47(3):14-21.
- [9] 石陈陈,楼佩煌,武星,等. 自动导引摄像机主动导引系统的协同标定[J]. 仪器仪表学报,2014, 35(11): 2589-2599.
SHI CH CH, LOU P H, WU X, et al. Collaborative calibration of initiative multi-camera guiding system for transport automatic guided vehicle [J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2014, 35(11): 2589-2599.
- [10] RONZONI D, OLM I R, SECCHI C, et al. AGV global localization using indistinguishable artificial landmarks [C]. IEEE international conference on Robotics and Automation, 2011, 124(1): 287-292.
- [11] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 2003, 3(4): 323-344.
- [12] 林海军,滕召胜,迟海,等. 基于多传感器信息融合的汽车衡误差补偿[J]. 仪器仪表学报,2009,30(6): 1245-1250.
LIN H J, TENG ZH SH, CHI H, et al. Error compensation for truck scale based on multi-sensor information fusion [J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2009, 30(6): 1245-1250.
- [13] ROWEKAMPER J, SPRUNK C, TIPALDI G D, et al. On the position accuracy of mobile robot localization based on particle filters combined with scan matching [C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012,34(10):789-798.
- [14] 张建鹏,楼佩煌,钱晓明,等. 多窗口实时测距的视觉导引 AGV 精确定位技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2016,37(6):1356-1363.
ZHANG J P, LOU P H, QIAN X M, et al. Research on precise positioning technology by multi-window and real-time measurement for visual navigation AGV [J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2016, 37(6): 1356-1363.
- [15] 邹益民,汪渤. 一种基于最小二乘的不完整椭圆拟合算法[J]. 仪器仪表学报,2006,27(7):808-812.
ZHOU Y M, WANG B. Fragmental ellipse fitting based on least square algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2006,27(7): 808-812.
- [16] 徐嵩,何衍,孙秀霞,等. 一种不同高度目标的视觉定位新算法[J]. 仪器仪表学报, 2010,31(3):546-552.
XU S, HE Y, SUN X X. New visual localization algorithm for targets with different heights [J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2010, 31 (3): 546-552.

作者简介



何珍,2014 年于湖南科技大学获得学士学位,现为南京航空航天大学硕士研究生,主要研究方向为移动机器人、计算机视觉、物流自动化装备。

E-mail:zhenhenuaa@163.com

He Zhen received his B. Sc. degree from Hunan University of Science and Technology in 2014. Now, he is a M. Sc. candidate in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interest includes mobile robotics, computer vision, and logistic automation equipment.



楼佩煌,分别在 1984 年和 1993 年于南京航空航天大学获得学士学位和硕士学位,现为南京航空航天大学教授、博士生导师,主要研究方向为现代集成制造技术、智能装备技术、物流自动化装备技术、机器人技术。

E-mail:meephlu@nuaa.edu.cn

Lou Peihuang received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1984 and 1993, respectively. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main interests are modern integrated manufacturing technology, intelligent equipment, logistics automation and robotics technology.