

文章编号:1671-1637(2015)05-0091-10

基于单目视觉的水面船舶多目标定位方法

柳晨光^{1,2}, 初秀民¹, 谢 朔^{1,2}, 王 乐^{1,3}

(1. 武汉理工大学 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063; 2. 武汉理工大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063; 3. 武汉理工大学 物流工程学院, 湖北 武汉 430063)

摘 要:针对水面船舶的多目标实时定位,提出了一种定位和运动参数求解算法,采用固定位置和视角的单目摄像机采集船舶图像,对采集的图像进行高斯滤波和图像畸变校正,提出了基于船舶颜色、尺寸与运动学特征同时识别多个船舶目标(每个船舶目标独立识别)的方法,构建了图像坐标与真实环境坐标的转换模型与实时航速、航向和轨迹的计算模型,在水池环境下搭建了实时定位系统,开发了实时定位程序,并验证了定位方法的定位精度和轨迹跟踪性能。验证结果表明:在存在外界干扰的情况下,定位算法能实现对2艘船舶的精确识别;修正前坐标点横、纵坐标平均误差分别为0.058、0.209 m,修正后分别为0.038、0.124 m;摄像机定位数据更新频率为8 Hz,满足船舶控制需要;算法能实现对船舶位置、航速和航向的准确、实时计算,轨迹平滑且未出现异常点。

关键词:船舶定位;单目视觉;多目标;颜色特征;畸变校正;目标提取

中图分类号:U675.7

文献标志码:A

Multi-target locating method of surface ship based on monocular vision

LIU Chen-guang^{1,2}, CHU Xiu-min¹, XIE Shuo^{1,2}, WANG Le^{1,3}

(1. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 3. School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: Aiming at the multi-target real-time locating of surface ship, an algorithm for real-time locating and motion parameters calculating of ship was proposed. The proposed algorithm was realized by processing the images captured by monocular camera with fixed position and perspective. The captured images were preprocessed with Gaussian filter and distortion correction, and a multi-target recognition method was proposed based on ship color features, size characteristics, and kinematic characteristics (every target could be identified individually). A transformation model between image coordinate system and real coordinate system, and a computing model for ship speed, course and trajectory calculation were built. A real locating system was built in experimental pool, a real-time locating program was developed, and the locating precision and trajectory tracking performance were verified. Verification result indicates that in the circumstance with disturbances, the precise recognition of two ships can be realized by using proposed locating algorithm. The average locating errors in lateral and longitudinal

收稿日期:2015-05-21

基金项目:国家自然科学基金项目(61273234, 51479155);交通运输部信息化技术研究项目(2013-364-548-200);湖北省自然科学基金项目(2013CFA007)

作者简介:柳晨光(1988-),男,江西九江人,武汉理工大学工学博士研究生,从事船舶智能化与运动控制研究。

导师简介:初秀民(1969-),男,吉林通化人,武汉理工大学研究员,工学博士。

orientation are 0.058 m and 0.209 m respectively before amendment, 0.038 m and 0.124 m respectively after amendment. The update frequency of camera locating data is 8 Hz, which can meet the control requirements. The real-time position, speed and course of ship can be correctly calculated, and the trajectory is smooth without any abnormal location point. 1 tab, 17 figs, 23 refs.

Key words: ship locating; monocular vision; multi-target; color feature; distortion correction; target extraction

Author resumes: LIU Chen-guang(1988-), male, doctoral student, +86-27-86581899, liu_chenguang@126.com; CHU Xiu-min(1969-), male, researcher, PhD, +86-27-86581899, chuxm@whut.edu.cn.

0 引 言

计算机技术、信息技术和通信技术的提高大大推动了船舶智能化的发展,自主航行已成为船舶发展的重要方向^[1]。船舶自主航行需完成船舶周围环境感知、路径规划和轨迹跟踪等过程,其前提是船舶必须确知自己实时的精确位置,并根据位置信息得到自身的速度、航向、轨迹等,以此作为船舶运动控制中的反馈信息,不断修正运动偏差,最后完成航行任务。对于船舶航行定位精度和实时性要求较高的场合,常采用的定位方法有全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)差分定位、GNSS与惯性导航的融合定位和基于视觉传感器的定位^[2-3]。GNSS差分定位数据更新频率固定为1 Hz,在船舶自主航行过程中难以满足控制要求,通常差分定位数据需与惯性导航传感器配合进行定位,即GNSS与惯性导航融合定位,但由于惯性导航系统具有成本较高、初始校准时间长与误差积累等缺点,GNSS与惯性导航融合定位方法仍存在一定的局限^[4]。基于视觉传感器的定位利用摄像机图像像素位置与场景点位置间的关系,根据摄像机模型求解摄像机或者场景点的三维位置信息进行定位。基于视觉传感器的定位可采用单目视觉传感器、双目视觉传感器和全方位视觉传感器3种技术^[5-6],其中单目视觉定位利用一台摄像机完成定位工作,具有简单易用、数据更新快、无需解决立体视觉中的多台摄像机间的最优距离和特征点匹配等优点,也不会产生全方位摄像机图像大畸变^[7]。

单目视觉定位方法在移动机器人和自主水下航行器(AUV)定位中应用较广。目前,单目视觉定位方法多是将摄像机固定于需定位的移动物体上,定位的一般步骤为:首先,通过标定摄像机获取图像畸变参数,消除图像扭曲对定位精度的影响;其次,对摄像机场景中的人工图标进行特征识别与分割,获

取人工图标模板点阵在图像中的坐标,特征识别与分割方法包括线段特征识别、Harris角点识别、SIFT识别等^[8];最后,将人工图标模板点阵的图像坐标通过单应矩阵转换为摄像机的空间坐标,从而得到固定摄像机的移动物体的空间位置。单目视觉定位方法在求解过程中需完成人工图标上模板点阵与模板图像之间对应点的匹配,导致数据处理时间较长,定位存在一定的延迟,同时定位过程中目标特征点不能被遮挡,如果采集图像的像质较差,则对测量精度具有较大影响^[9]。目前国内外针对水面船舶的单目视觉定位研究较少,多数集中在基于立体视觉定位研究上^[10-11]。Ashrafiuon等为解决水面模型船轨迹跟踪控制过程中的定位问题,将摄像机固定放置在小型室内水池正上方,在模型船的船首和船尾分别放置一个红外发光二极管,摄像机通过识别二极管颜色特征得到船舶在水池中的位置^[12];王健等提出一种基于单目机器视觉的船舶测距定位方法,并通过仿真验证了方法的有效性^[13];王强锋在船桥撞击试验研究过程中,将摄像机固定于桥墩上,应用单目视觉原理获取船舶实时运动轨迹^[14]。综合分析,基于固定摄像机的单目视觉定位应用于水面船舶是可行的,但目前研究多集中于单一船舶的定位。在多目标定位研究方面,基于视觉的多目标定位问题已有一定进展。Lu等针对单目视觉中的多目标识别问题,提出了一种基于粒子滤波的观测模型,在复杂环境下实现对多个人体目标的识别^[15];Heath等提出了一种基于粒子滤波的多目标识别模型,在立体视觉中实现对多个人体目标的识别^[16]。采用粒子滤波实现视觉图像中多目标识别存在一定缺陷,如复杂环境下会因计算量过大而导致实时性较差,同时粒子滤波本质上是将目标从环境中辨别出来,而对独立目标很难实现身份识别^[17]。以船舶为对象的多目标定位问题研究很少,针对室外试验水池环境下多目标水面船

船的实时定位问题,本文提出了一种基于单目视觉且能唯一识别每个船舶目标的多目标定位算法,并对算法的定位性能进行了验证,为今后开展船舶运动控制、路径规划和船队编队控制等研究提供支持。

1 多目标识别算法

1.1 图像预处理

在摄像机采集图像过程中,由于受到外界干扰,导致在拍摄或窗口变换处理过程中图像产生局部噪音,包括气泡、凹陷与毛刺等,这些噪音会对后继的图像识别产生影响。为提高图像识别准确性,需对局部误差进行校正和补偿。对真实环境中图像的处理效果进行对比,发现高斯滤波方法能在保证原图像质量不变的条件下起到较好的滤波效果。图 1 为高斯滤波处理前后图像效果的对比,可见高斯滤波对水纹有很好的滤波效果,并使船舶轮廓更加清晰。



(a) 高斯滤波前效果



(b) 高斯滤波后效果

图 1 高斯滤波前后效果对比

Fig. 1 Effects comparison before and after Gaussian filtering

高斯滤波器是根据高斯函数的形状来选择加权值的线性平滑滤波器,将高斯核函数作为权函数计算邻域像素的加权平均值,对去除服从正态分布的噪声很有效果。高斯函数描述为

$$G(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中: $G(i, j)$ 为高斯函数, i, j 为函数自变量; σ 为高斯边缘滤波器参数,决定图像的平滑程度, σ 越大,平滑程度越高^[18]。

在实际计算过程中,通常采用一个矩阵模板进行加权运算,该模板为离散高斯核。 $(2p+1) \times (2p+1)$ 维离散高斯核描述为

$$U(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-p-1)^2 + (y-p-1)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

式中: $U(x, y)$ 为离散高斯核, x, y 分别为图像像素点的横、纵坐标; p 为自然数。

使用 OpenCV 函数库中的 `cvSmooth` 函数对图像进行高斯平滑滤波,试验发现, σ 为 0.9 与 p 为 3 时滤波效果最好。

1.2 图像畸变校正

制作出一个数学上理想的透镜不大可能,同时也很难从机械方面把透镜与成像仪完全平行安装,因此,摄像机拍摄的图像均存在畸变。消除摄像机镜头畸变首先需要对摄像机进行标定,即获取摄像机内外参数^[19]。借助尺寸和形状已知的标定物,利用标定物上的点与拍摄标定物获得图像上对应点之间的对应关系建立数学模型,通过数学模型标定摄像机内外参数。本文选择平面棋盘格模式标定板,以保证能采集各方向棋盘图像^[19]。提取黑白棋盘格角点是应用平面标定法进行摄像机标定的关键。本文选择棋盘内角点为 Harris 角点,能够在图像旋转、灰度变化与噪声干扰等情况下准确提取角点。

使用 OpenCV 函数库的 `cvFindChessboardCorners` 函数进行棋盘格角点提取,利用 `cvFindCornerSubPix` 函数对亚像素角点精确化,最后利用 `cvCalibrateCamera2` 函数提取摄像机内参矩阵,并对摄像机镜头畸变予以校正,摄像机标定结果见图 2。摄像机内参矩阵是指摄像机在图像坐标 x, y 方向的像素焦距和偏移,畸变系数矩阵表示切向和径向畸变系数。经标定,内参矩阵 A 与畸变系数矩阵 B 分别为

$$A = \begin{bmatrix} 953.540 & 0.000 & 549.043 \\ 0.000 & 953.346 & 408.963 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.389\ 097\ 00 & 0.259\ 597\ 00 \\ -0.001\ 386\ 28 & -0.000\ 778\ 49 \end{bmatrix}$$

摄像机镜头畸变校正前后的效果对比见图 3,可以明显看出水池边线由曲线校正为近似直线。

1.3 基于颜色特征的图像分割

在图像处理领域,利用 RGB 色彩模式中的 3 个

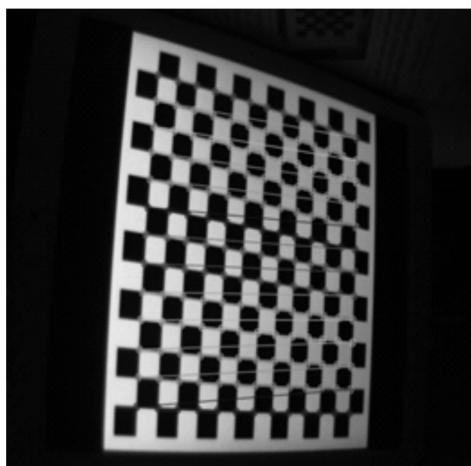


图 2 摄像机标定结果

Fig. 2 Camera calibration result



(a) 畸变校正前



(b) 畸变校正后

图 3 摄像机镜头畸变校正前后效果对比

Fig. 3 Effect comparison before and after distortion correction of camera lens

不同颜色通道的颜色差异进行图像分割的应用较广。Tian 等针对野外光照条件下农业机械自主作业的需要,依据作物绿色与背景非绿色特征提出了一种图像分割算法,进行绿色作物与土壤背景实时分割^[20];刘娅静等针对杂草识别中受光照影响大、环境适应性差等问题,提出了基于颜色特征的分割算法,在统计分析杂草和土壤背景各颜色因子的基础上,得到了适于杂草图像分割的颜色分量,实现了

复杂场景与光照条件下杂草区和背景区的分割^[21];张晓娜等利用车牌颜色特征实现了不同光照环境下车牌的定位^[22]。

在户外条件下,由于受到光线、能见度与水面反光等因素的影响,对船舶目标进行图像分割是船舶识别的难点。多目标识别问题对图像分割的要求更高。目前,图像分割算法众多,不同的应用环境和对象适用的分割方法也不同。本文在尝试背景差法、灰度分割法、轮廓识别法和阈值分割法等后,提出了一种基于颜色特征的多目标船舶图像分割算法,具体实现过程如下。

为便于试验研究和验证,本文选用 2 艘模型船作为研究对象,试验环境为室外水池。模型船由帕卡萨鱼雷艇 1/32 比例制成,长度、宽度分别为 958、243 mm。根据 RGB 色彩模式的定义,任何颜色均可以分解为红色通道(R)、绿色通道(G)和蓝色通道(B)3 种颜色的混合,每个通道灰度值范围为 0~255。为实现更好的分割效果,将这 2 艘模型船分别涂成红色和蓝色(与背景颜色区别开),分别为船舶 1、2。图像分割流程如下。

Step 1:通道分离。采集到的图像 I 经过预处理和畸变校正后,按红色、绿色、蓝色 3 个颜色通道进行分离,分别得到单通道图像 I_R 、 I_G 和 I_B ,记某像素点 (x, y) 的 3 个单颜色通道灰度矩阵为 $[g_{Rxy} \ g_{Gxy} \ g_{Bxy}]$,其中 g_{Rxy} 、 g_{Gxy} 、 g_{Bxy} 分别为 R、G、B 通道的灰度值。

Step 2:二值化。按设定阈值分别对单通道图像 I_R 、 I_B 进行二值化,并保存为二值化图像 E_R 、 E_B 。

Step 2.1:红色通道二值化。二值化阈值设置为

$$\begin{cases} g_{Rxy} - g_{Gxy} > g_1 \\ g_{Rxy} - g_{Bxy} > g_2 \\ g_{Gxy} < g_3 \\ g_{Bxy} < g_4 \end{cases} \quad (3)$$

式中: g_1 、 g_2 、 g_3 和 g_4 均为设定阈值。

如果图像 I_R 像素点 (x, y) 满足式(3)条件,则图像 E_R 中 (x, y) 的灰度值为 255(全白),否则为 0(全黑)。

Step 2.2:蓝色通道二值化。二值化阈值设置为

$$\begin{cases} g_{Bxy} - g_{Gxy} > g_5 \\ g_{Bxy} - g_{Rxy} > g_6 \\ g_{Gxy} < g_7 \\ g_{Rxy} < g_8 \end{cases} \quad (4)$$

式中: g_5 、 g_6 、 g_7 和 g_8 均为设定阈值。

$g_1 \sim g_8$ 均大于 0,且随外界环境变化随时调整。如果图像 I_B 像素点 (x, y) 满足式(4)条件,则图像 E_B 中像素点 (x, y) 的灰度值为 255,否则为 0。

Step 3:轮廓提取。由于对二值化图像 E_R 、 E_B 处理流程完全相同,本文仅以图像 E_R 为例对轮廓提取过程进行说明。 $V_{a1} \sim V_{am}$ 为使用 OpenCV 函数库中的 `cvFindContour` 函数得到的图像 E_R 的 $1 \sim m$ 个轮廓序列。由于色域干扰存在,通常 m 大于 1。

Step 4:轮廓识别。由于 m 一般大于 1,因此,需去除干扰轮廓,过程如下。

Step 4.1:分别求解轮廓 $V_{a1} \sim V_{am}$ 的面积,得到的轮廓面积序列为 $S_1 \sim S_m$ 。

Step 4.2:设定有效轮廓面积范围为 $[S_{\min}, S_{\max}]$,经过筛选后得到轮廓序列为 $V_{b1} \sim V_{bk} (k \leq m)$ 。

Step 4.3:如果 $k \geq 1$,则需利用船舶航行速度特征进行识别。考虑在时间 Δt 内,轮廓序列 $V_{b1} \sim V_{bk}$ 的外接圆圆心位置变化矢量序列为 $C_1 \sim C_k$,通过计算得到轮廓对象运动速率 v 序列和转向角速率 r 序列分别为 $v_1 \sim v_k$ 和 $r_1 \sim r_k$ 。根据模型船真实运动能力设置动力参数约束条件,表示为 $0 \leq v \leq v_{\max}$ 、 $0 \leq r \leq r_{\max}$,其中, v_{\max} 、 r_{\max} 分别为轮廓对象运动速率和转向角速率的最大值。经过筛选后得到轮廓序列为 $V_{c1} \sim V_{ci} (i \leq k)$ 。

Step 5:通常通过上述过程即可筛选出符合条件的轮廓,即 $i=1$ 。图 4~7 为在真实环境中用红色通道图像实现船舶 1 的识别过程。如果最终 $i \neq 1$,则舍弃该帧图像,并可以使用时域预测的方法来估计该时刻的位置数据。

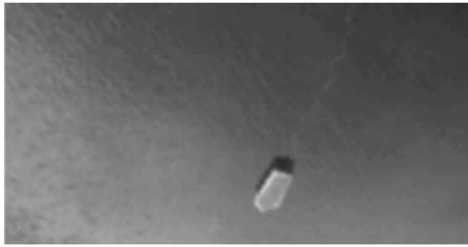


图 4 原图像

Fig. 4 Original image

张文娟提出将三次指数平滑法应用于船舶轨迹的短时预测中,并取得了较好效果^[23]。指数平滑法的原理是任一时刻的指数平滑值均为本时刻实际测量值与前一时刻指数平滑值的加权平均。一次指数平滑法表示为

$$s_{1,t} = \alpha X_t + (1 - \alpha)s_{1,t-1} \quad (5)$$

$$Y_t = s_{1,t-1} \quad (6)$$

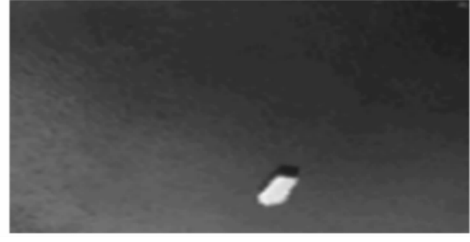


图 5 红色通道图像

Fig. 5 Red channel image



图 6 二值化图像

Fig. 6 Binary image

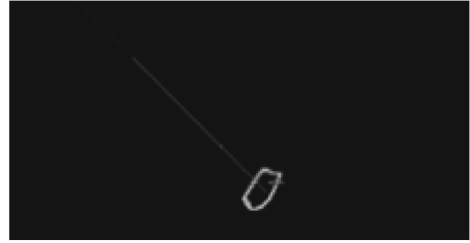


图 7 轮廓识别图像

Fig. 7 Contour recognition image

式中: X_t 、 Y_t 分别为 t 时刻的实际测量值与预测值; $s_{1,t}$ 为 t 时刻的一次指数平滑值; α 为加权系数, $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

二次指数平滑法与三次指数平滑法分别表示为

$$s_{2,t} = \alpha s_{1,t} + (1 - \alpha)s_{2,t-1} \quad (7)$$

$$s_{3,t} = \alpha s_{2,t} + (1 - \alpha)s_{3,t-1} \quad (8)$$

式中: $s_{2,t-1}$ 、 $s_{3,t-1}$ 分别为 $t-1$ 时刻的二次指数平滑值与三次指数平滑值。

如预测的周期数为 T ,对于 $t+T$ 时刻的指数预测值 Y_{t+T} ,其三次指数平滑得到非线性预测模型为

$$Y_{t+T} = a_t + b_t T + c_t T^2 \quad (9)$$

$$a_t = 3s_{1,t} - 3s_{2,t} + s_{3,t}$$

$$b_t = \frac{\alpha}{2(1-\alpha)^2} [(6-5\alpha)s_{1,t} - 2(5-4\alpha)s_{2,t} + (4-3\alpha)s_{3,t}]$$

$$c_t = \frac{\alpha^2}{2(1-\alpha)^2} (s_{1,t} - 2s_{2,t} + s_{3,t})$$

式中: a_t 、 b_t 、 c_t 均为 t 时刻的平滑系数。

在实际预测过程中初始平滑值和平滑系数 a_t

的选取十分关键^[23]。三次指数平滑法对船舶轨迹预测已被证明,本文不具体讨论其实现过程。

2 坐标转换算法

摄像机成像几何模型是光学成像几何的简化,本文选用应用最为广泛的小孔透视模型。小孔透视模型是一种线性模型,在物理上相当于薄透镜,其最大优点是简单、实用与准确。

2.1 世界坐标系转换

对于获取到序列的轮廓,通过轮廓最小外接圆的圆心表征实际位置,获得其在成像平面的坐标。成像平面的坐标通过相机内参矩阵可以转化为对焦平面的坐标,而在固定的场景中,船舶在对焦平面坐标系与世界坐标系中坐标的转换可以通过几何方法获得。水平面坐标系(世界坐标系)可表示为 $x_1O_1y_1$ 。摄像机固定在岸边并以固定角度拍摄水面,调整摄像机焦距使其对焦点在 O_2 点,过 O_2 点作与光轴垂直的平面,即为对焦平面,其坐标系为 $x_2O_2y_2$ 。图 8 为对焦平面与世界坐标系的空间关系, O_1 、 O_2 (2 个点重合) 为摄像机光轴与水平面的交点, H 为镜头离水平面的高度, L 为镜头到岸边的水平距离, θ 为对焦平面与水平面的夹角, W 为观测水域岸边的宽度, H 、 L 、 θ 、 W 均可通过测量得到。

$x_1O_1y_1$ 上的任一点 $P_1(x_1, y_1)$ 与对焦平面上

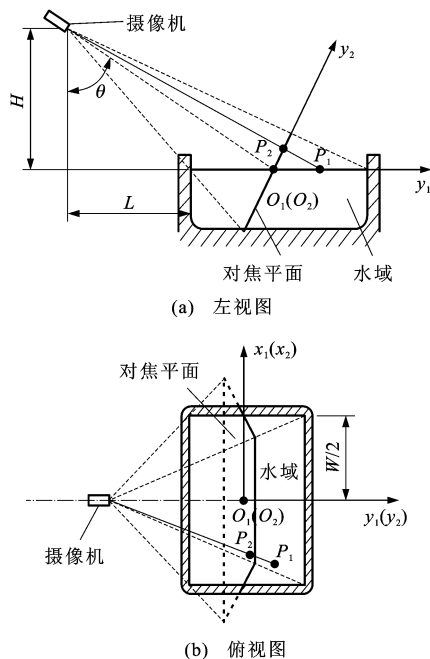


图 8 对焦平面与世界坐标系转换关系

Fig. 8 Transform relationship between focal plane and world coordinate system

的对应点 $P_2(x_2, y_2)$ 的转换关系为

$$\begin{cases} x_1 = \frac{H\beta\sin(2\theta)x_2}{2H - \beta\sin(2\theta)y_2\sin(\theta)} \\ y_1 = \frac{1}{2}\gamma\sin(2\theta)y_2 + \frac{[2L + \gamma\sin(2\theta)y_2]\beta\sin(2\theta)y_2\sin(\theta)}{2[2H - \beta\sin(2\theta)y_2\sin(\theta)]} \end{cases} \quad (10)$$

$$\beta = \tan(\theta) - \frac{L}{H}$$

$$\gamma = \sin(\theta) - \frac{L\cos(\theta)}{H}$$

2.2 摄像机坐标系转换

对焦平面与水域空间关系见图 9, 其中 M 为图像宽度(单位为像素), W' 为对焦平面视野宽度。

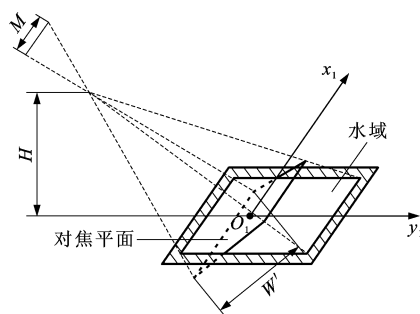


图 9 对焦平面与水域关系

Fig. 9 Relationship between focal plane and water space

摄像机小孔成像原理见图 10, 成像平面坐标系为 $x_3O_3y_3$, $P_3(x_3, y_3)$ 为对焦平面点 $P_2(x_2, y_2)$ 在成像平面对应点, f 为镜头焦距, Z 为对焦平面到小孔距离, f/Z 表示成像平面与对焦平面尺寸比例关系。由于本文摄像机单个像素点在对焦平面的投影为正方形, 因此, 定义投影正方形的边长为 K , 则有

$$K = \frac{W'}{M} = \frac{WH}{M\sqrt{H^2 + L^2}} \cdot$$

$$\cos(\theta)\cos\left[\theta - \arctan\left(\frac{L}{H}\right)\right] \quad (11)$$

$P_2(x_2, y_2)$ 与 $P_3(x_3, y_3)$ 的转换关系为

$$\begin{cases} x_2 = Kx_3 \\ y_2 = Ky_3 \end{cases} \quad (12)$$

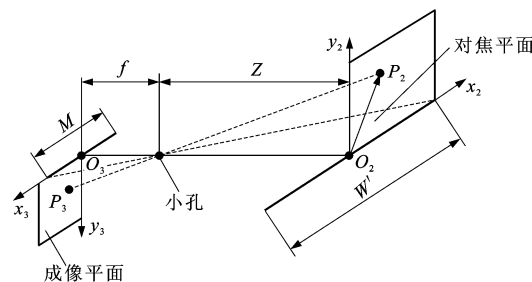


图 10 摄像机小孔成像原理

Fig. 10 Pinhole imaging principle of camera

综合式(11)、(12)可完成 $P_3(x_3, y_3)$ 到 $P_1(x_1, y_1)$ 的坐标转换,表示为

$$\begin{cases} x_1 = \frac{H\beta\sin(2\theta)x_3K}{2H - \beta\sin(2\theta)y_3K\sin(\theta)} \\ y_1 = \frac{1}{2}\gamma\sin(2\theta)y_3K + \frac{[2L + \gamma\sin(2\theta)y_3K]\beta\sin(2\theta)y_3K\sin(\theta)}{2[2H - \beta\sin(2\theta)y_3K\sin(\theta)]} \end{cases} \quad (13)$$

2.3 运动状态计算

将船舶轮廓外接圆圆心 c_b 作为船舶质心,根据 Δt 内 c_b 的运动变化可计算出船舶实时航速 v 和航向角 ψ 。船舶运动状态的计算见图 11, ψ' 为 Δt 时间内的平均航向角,当 Δt 很小时, ψ' 可近似等于实时航向角 ψ 。将一段时间内连续位置 c_b 连接起来,即得到船舶运动轨迹。假定船舶在 Δt 时间内由位置 c_{b1} 沿曲线路径运动到位置 c_{b2} ,船舶航速和航向角分别为

$$v = \frac{|c_{b1}c_{b2}|}{\Delta t} = \frac{\sqrt{(x_{b2} - x_{b1})^2 + (y_{b2} - y_{b1})^2}}{\Delta t} \quad (14)$$

$$\psi \approx \psi' = \begin{cases} \varphi & x_{b2} - x_{b1} > 0, y_{b2} - y_{b1} > 0 \\ \pi - \varphi & x_{b2} - x_{b1} > 0, y_{b2} - y_{b1} < 0 \\ 2\pi - \varphi & x_{b2} - x_{b1} < 0, y_{b2} - y_{b1} < 0 \\ \pi + \varphi & x_{b2} - x_{b1} < 0, y_{b2} - y_{b1} > 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\varphi = \arcsin \left[\frac{x_{b2} - x_{b1}}{\sqrt{(x_{b2} - x_{b1})^2 + (y_{b2} - y_{b1})^2}} \right]$$

式中: x_{b1} 、 y_{b1} 分别为点 c_{b1} 的横、纵坐标; x_{b2} 、 y_{b2} 分别为点 c_{b2} 的横、纵坐标。

3 试验验证

3.1 试验过程

为了验证本文定位方法的定位性能,在真实水

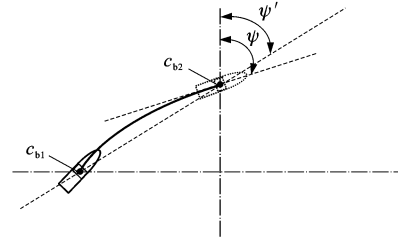


图 11 船舶运动状态计算

Fig. 11 Calculation of ship motion state

池环境中开展了相关试验。试验设备包括单目摄像机、激光测距仪、标定板、计算机和电源系统等。单目摄像机型号为 MVC800DAM-GE45,为高分辨率 CCD 摄像机。电源系统由 12 V 蓄电池和电源逆变器组成,为摄像头和计算机供电。为验证定位方法的性能,开发了一款具有参数配置、图像显示与对比、实时数据显示、数据存储和路径显示等功能的定位软件,程序主界面见图 12。摄像机的绝对定位精度的测试过程如下。

Step 1:将摄像机固定在水池岸边固定点,见图 13。调整摄像机机位,使其视野在水域内且与岸边线平行;调整光圈和焦距,找到摄像机在真实环境中的原点,测量相关参数 H 、 L 、 θ 和 W 。

Step 2:将一艘模型船放入水中,观察摄像机对模型船的识别效果,调整颜色通道阈值、轮廓面积范围等参数,使得摄像机能够可靠且唯一识别船舶。

Step 3:待模型船在水面基本稳定后,使用激光测距仪多次测量,取其平均值为船舶实际位置 P_r ,同时记录下此时摄像机定位得到的测量值 P_c 。测量方法见图 14,其中 x_a 、 y_a 分别为激光测距仪测量的船舶实际横、纵坐标。

Step 4:移动船舶位置,重复 Step 3,保证测量



图 12 程序主界面

Fig. 12 Main interface of program



图 13 摄像机位置

Fig. 13 Position of camera

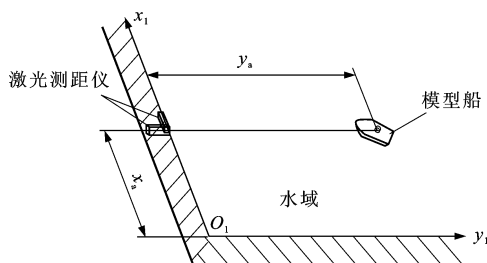


图 14 激光测距仪测量方法

Fig. 14 Measuring method of laser range finder

点覆盖全部摄像机视野,达到测量次数后,停止测量,记录数据并进行分析。

除进行绝对定位精度试验外,还需开展多目标

的轨迹跟踪性能。试验过程为:将船舶 1、2 均放入水池内,待 2 艘船舶均被摄像机识别后,人为操控 2 艘船舶向不同方向运动,记录船舶运动的轨迹数据并分析。

3.2 试验结果分析

对本文单目视觉定位系统进行了多种光照条件下的性能测试。在保证一定光照条件情况下,通过调节摄像机光圈、图像颜色通道阈值和船舶轮廓尺寸参数实现对船舶的唯一识别。试验过程中虽有其他因素干扰,但定位系统能实现对 2 艘船舶的唯一识别。从定位精度和对多目标轨迹跟踪性能方面对试验结果进行分析。

3.2.1 定位精度分析

按照试验步骤完成摄像机定位精度分析试验,测量的参数值为: H 为 4.23 m, L 为 4.13 m, θ 为 60° , W 为 6.26 m。表 1 为全部 16 组测量结果。图 15(a)为摄像机测量值与实际值的对比,摄像机测得的定位数据与激光测距仪测量的数据(实际值)存在一定偏差,且差值较大。这种误差形式一般可定义为系统误差,是由于对定位参数测定不准确造成的。本文通过平滑滤波对数据进行修正,具体步骤如下。

表 1 测量结果

Tab. 1 Measuring result

序号	实际值/m	摄像机测量值/m	修正前差值/m	修正后摄像机测量值/m	修正后差值/m
1	(2.99, 2.13)	(2.99, 2.27)	(0.00, 0.14)	(2.94, 2.14)	(-0.05, 0.01)
2	(2.11, 2.38)	(2.23, 2.35)	(0.12, -0.03)	(2.18, 2.22)	(0.07, -0.16)
3	(1.84, 1.24)	(1.80, 1.37)	(-0.04, 0.13)	(1.75, 1.24)	(-0.09, 0.00)
4	(1.55, 4.00)	(1.61, 4.17)	(0.06, 0.17)	(1.56, 4.04)	(0.01, 0.04)
5	(3.01, 2.80)	(3.12, 3.02)	(0.11, 0.22)	(3.07, 2.89)	(0.06, 0.09)
6	(2.38, 2.04)	(2.42, 2.22)	(0.04, 0.18)	(2.37, 2.09)	(-0.01, 0.05)
7	(4.38, 2.31)	(4.44, 2.22)	(0.06, -0.09)	(4.39, 2.09)	(0.01, -0.22)
8	(4.36, 2.43)	(4.41, 2.68)	(0.05, 0.25)	(4.36, 2.55)	(0.00, 0.12)
9	(2.97, 1.54)	(3.03, 1.59)	(0.06, 0.05)	(2.98, 1.46)	(0.01, -0.08)
10	(2.49, 4.60)	(2.55, 4.91)	(0.06, 0.31)	(2.50, 4.78)	(0.01, 0.18)
11	(2.38, 3.20)	(2.38, 3.43)	(0.00, 0.23)	(2.33, 3.30)	(-0.05, 0.10)
12	(0.22, 4.93)	(0.23, 5.19)	(0.01, 0.26)	(0.18, 5.06)	(-0.04, 0.13)
13	(5.12, 4.53)	(5.15, 4.86)	(0.03, 0.33)	(5.10, 4.73)	(-0.02, 0.20)
14	(4.41, 5.03)	(4.44, 5.33)	(0.03, 0.30)	(4.39, 5.20)	(-0.02, 0.17)
15	(6.10, 2.89)	(6.21, 3.17)	(0.11, 0.28)	(6.16, 3.04)	(0.06, 0.15)
16	(4.86, 3.86)	(5.00, 4.23)	(0.14, 0.37)	(4.95, 4.10)	(0.09, 0.24)

Step 1: 根据 16 组实际值与摄像机测量值的差值,分别计算横、纵坐标轴方向的平均误差。

Step 2: 根据实际值与修正前测量值间的平均误差对这 16 组数据进行修正,得到修正后的摄像机测量值。

修正后摄像机测量值与实际值的比较结果见

图 15(b)。修正前坐标点横坐标平均误差为 0.058 m,纵坐标平均误差为 0.209 m,修正后平均误差分别为 0.038、0.124 m,均在可接受范围内,且摄像机定位数据更新频率达到 8 Hz,满足船舶控制需要。

3.2.2 轨迹跟踪性能分析

船舶 1、2 的轨迹曲线见图 16,其中左侧曲线

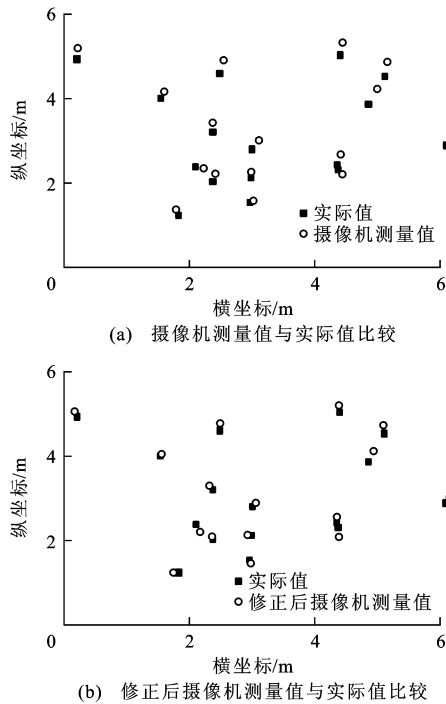


图15 摄像机定位试验结果

Fig. 15 Experimental results of camera locating

为船舶1的运动轨迹,右侧曲线为船舶2的运动轨迹,2艘船舶运动轨迹平滑,说明摄像机识别和定位过程是连续的,未出现异常点。在试验过程中,由于受到突变风力的影响,船舶运动过程中发生了突然的变向,船舶1、2航向角随时间的变化曲线见图17。通过对比图16、17可以发现航向角变化趋势保持一致。

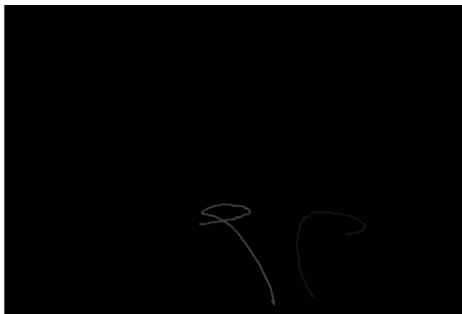


图16 轨迹曲线

Fig. 16 Trajectory curves

4 结 语

(1)提出了一种基于单目视觉的多目标船舶实时定位方法,基于颜色、船舶尺寸与运动学特征解决了多目标船舶提取和识别问题,建立了坐标转换与船舶运动参数计算模型,开发了基于单目视觉的实时定位程序。在真实环境下对定位精度和轨迹跟踪性能进行了试验验证,分析了系统定位误差并提出

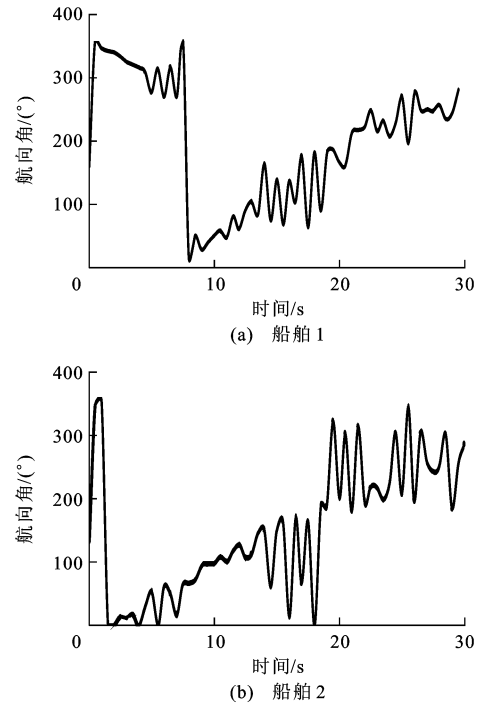


图17 航向角变化曲线

Fig. 17 Changing curves of course angles

了修正方法,试验结果表明单目视觉定位方法能满足定位需求。

(2)本文仅以2艘船舶为对象对定位算法进行了验证,针对更多数量船舶的定位需求,可通过对船舶涂刷不同颜色来实现(不一定是纯色,任意颜色特征均能通过设定相应阈值来识别)。

(3)由于存在环境干扰,轮廓提取有时会因轮廓不完整而影响定位精度,可通过研究轮廓修复方法来提高定位精度。

(4)后续研究可考虑将摄像机架设在某船体上,利用定位算法跟踪周围船舶,以研究船舶列队控制问题。

参考文献:

References:

- [1] CACCIA M, BIBULI M, BONO R, et al. Basic navigation, guidance and control of an unmanned surface vehicle[J]. Autonomous Robots, 2008, 25(4): 349-365.
- [2] 周娜. 基于单目视觉的摄像机定位技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
ZHOU Na. Research on camera location based on monocular vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [3] 刘江, 蔡伯根, 王云鹏. 基于GNSS/DSRC融合的协同车辆定位方法[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(4): 116-126.
LIU Jiang, CAI Bai-gen, WANG Yun-peng. Cooperative vehicle positioning method based on GNSS/DSRC fusion[J].

- Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(4): 116-126. (in Chinese)
- [4] 李明月. 高精度捷联式惯性导航系统校准与补偿方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- LI Ming-yue. The research of calibration and compensation methods for high precision strapdown inertial navigation system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [5] 孟 浩, 程 康. 基于 SIFT 特征点的双目视觉定位[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(6): 649-652, 675.
- MENG Hao, CHENG Kang. Object location technique for binocular stereo vision based on scale invariant feature transform feature points[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(6): 649-652, 675. (in Chinese)
- [6] 曹凤萍, 王荣本, 张亮修. 基于双目立体视觉的月球车三维定位算法[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(4): 28-33.
- CAO Feng-ping, WANG Rong-ben, ZHANG Liang-xiu. A three-dimensional localization algorithm of lunar rover based on binocular vision[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2012, 30(4): 28-33. (in Chinese)
- [7] 李荣明, 芦利斌, 金国栋. 单目视觉定位方法研究综述[J]. 现代计算机, 2011, 28(11): 9-12.
- LI Rong-ming, LU Li-bin, JIN Guo-dong. Research overview of location method for monocular vision[J]. Modern Computer, 2011, 28(11): 9-12. (in Chinese)
- [8] 刘洪伟. 基于单目视觉的移动机器人目标识别与定位[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- LIU Hong-wei. Mobile robot object recognition and localization based on monocular vision[D]. Jinan: Shandong University, 2011. (in Chinese)
- [9] 张治国. 基于单目视觉的定位系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- ZHANG Zhi-guo. Research on locating system based on monocular vision[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [10] HUNTSBERGER T, AGHAZARIAN H, HOWARD A, et al. Stereo vision-based navigation for autonomous surface vessels[J]. Journal of Field Robotics, 2011, 28(1): 3-18.
- [11] MA Yue, HU Ying, BI Feng-long. Tracking and position study for unmanned semi-submersible vessel based on stereo vision[C]//IEEE. 4th International Conference on Digital Manufacturing and Automation. New York: IEEE, 2013: 1618-1621.
- [12] ASHRAFIUON H, MUSKE K R, MCNINCH L C, et al. Sliding-mode tracking control of surface vessels[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(11): 4004-4012.
- [13] 王 健, 王孝通, 徐晓刚. 基于单目机器视觉的船舶测距定位原理研究[J]. 中国航海, 2005, 28(3): 8-10, 14.
- WANG Jian, WANG Xiao-tong, XU Xiao-gang. Study of ship locating principle by measuring distance based on the monocular camera machine vision[J]. Navigation of China, 2005, 28(3): 8-10, 14. (in Chinese)
- [14] 王强锋. 利用单目视觉测量技术研究船舶撞击运动[D]. 宁波: 宁波大学, 2012.
- WANG Qiang-feng. Studying on the ship movement during ship-bridge collision with monocular vision measuring[D]. Ningbo: Ningbo University, 2012. (in Chinese)
- [15] LU Jian-guo, CAI A, LI Li-li. A detection-aided multi-target tracking algorithm[C]//IEEE. 2010 International Conference on Machine Vision and Human-Machine Interface. New York: IEEE, 2010: 580-583.
- [16] HEATH K, GUIBAS L. Multi-person tracking from sparse 3D trajectories in a camera sensor network[C]//IEEE. 2nd ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras. New York: IEEE, 2008: 1-9.
- [17] 梁 敏. 基于粒子滤波的多目标跟踪算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- LIANG Min. Study of multi-target tracking algorithm based on particle filter[D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
- [18] 王文远. 基于图像信噪比选择优化高斯滤波尺度[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(10): 2483-2487.
- WANG Wen-yuan. Selecting the optimal Gaussian filtering scale via the SNR of image[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2009, 31(10): 2483-2487. (in Chinese)
- [19] 熊显名, 任娟娟. 黑白棋盘格中的角点提取算法的研究[J]. 微型机与应用, 2014, 33(9): 66-69.
- XIONG Xian-ming, REN Juan-juan. Research of corner detection algorithm in the black and white checkerboard[J]. Microcomputer and Its Applications, 2014, 33(9): 66-69. (in Chinese)
- [20] TIAN L F, SLAUGHTER D C. Environmentally adaptive segmentation algorithm for outdoor image segmentation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1998, 21(3): 153-168.
- [21] 刘娅静, 杨 帆, 浦昭邦. 基于颜色特征的杂草图像分割技术研究[J]. 微计算机信息, 2007, 23(18): 269-271.
- LIU Ya-jing, YANG Fan, PU Zhao-bang. Research on segmentation of field weed image based on color feature[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(18): 269-271. (in Chinese)
- [22] 张晓娜, 何 仁, 陈士安, 等. 基于主动学习 AdaBoost 算法与颜色特征的车牌定位[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(1): 121-126.
- ZHANG Xiao-na, HE Ren, CHEN Shi-an, et al. Vehicle license plate location using active learning AdaBoost algorithm and color feature[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(1): 121-126. (in Chinese)
- [23] 张文娟. 桥区船舶航行风险预警系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- ZHANG Wen-juan. Early warning system for ship navigation risk in bridge waterways[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)