

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)07-1219-07

论文索引信息: 张学武, 徐立中, 石爱业, 张卓, 范新南. 内河水路交通流参数视觉测量系统 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(7): 1219-1225

内河水路交通流参数视觉测量系统

张学武, 徐立中, 石爱业, 张卓, 范新南

(河海大学计算机与信息学院, 南京 210098)

摘要: 内河水路交通流参数获取是当前发展内河水路交通智能的关键问题之一。提出一种基于视觉测量的水路交通流参数获取方法, 采用视觉传感器获取航道全景图像, 提取感兴趣对象(船舶), 建立视觉测量模型, 获取多视角下船舶几何特征参数, 建立 CCD 视觉传感器获取图像信息和基于知识库的广义传感器信息融合模型, 计算和决策水路交通参数, 如船舶吨位、船舶类型、船舶速度、航道占有率、通航密度、船舶安全状态评估等重要水路交通基础参数, 为航运交通管理部门进行水路交通管理、规划和决策提供依据。实验结果表明, 系统可实现对水路交通流参数的可靠获取, 满足工程应用要求。

关键词: 水路交通智能; 视觉感知; 图像理解; 信息融合; 交通流参数

Visual measurement system for traffic flow of inland waterway

Zhang Xuewu, Xu Lizhong, Shi Aiye, Zhang Zhuo, Fan Xinnan

(College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 210098 China)

Abstract: Acquiring traffic flow parameters of inland waterway is one key issue in developing intelligent inland waterway transport system. The paper proposes a method of vision measurement to acquire waterway traffic flow parameters. It uses vision sensors to capture panoramic view image of channel, extracts interested objects (ships), and establishes visual perception measurement model for acquiring geometric parameters of the ship under multi-view. A model which used CCD vision sensors to capture image information and broad knowledge-based sensors to fuse information is constructed and is used to compute water transport parameters, including the tonnage of ships, ship types, ship speed, occupancy rate of waterway, traffic density, the security state of ships, and other basic parameters of important waterway transport infrastructure, which serves as basis for traffic management, planning, and decision-making for waterway transport management sector. The results show that the system can obtain the traffic flow parameters of water access reliably, which meets the engineering requirements.

Keywords: waterway transport intelligence; visual perception; image understanding; information fusion; traffic flow parameters

0 引言

内河航运与陆上其他运输相比具有显著的优

势, 适宜大宗散货和油类的长途运输, 运输成本低, 环境污染小, 有利于生态环境保护和经济可持续发展等。近年来, 我国内河航道、港口设施建设取得了显著成绩, 内河航运货运量持续增长, 运输船舶大型

收稿日期: 2010-05-07; 修回日期: 2010-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(60872096); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009B31914)。

第一作者简介: 张学武(1973—), 男, 副教授。河海大学计算机与信息学院信息学专业博士研究生, 主要研究方向为机器视觉、图像分析与处理。E-mail: zhangxw@hhuc.edu.cn。

化、标准化趋势明显,航运市场日趋活跃,内河航运进入了快速发展的较好时期^[1-3]。

我国在《国民经济和社会发展第十个五年计划纲要》中明确提出“要加强信息资源开发,强化公共信息资源共享,推动信息技术在国民经济和社会发展各领域广泛应用”的要求。交通部召开的全国交通信息化工作会议明确了包括港口和航道在内的公路、水路交通信息化建设是主要目标之一。第 2 次全国航道普查时,交通部提出要充分利用现代计算机技术和信息处理技术,尽快实现航道管理现代化的目标^[4]。

利用视觉感知,精准获取船舶的基本属性数据和载重量等重要内河管理基础信息,间接获取船舶流量、船舶速度、通航密度等重要基础信息,为航运管理部门进行水域交通管理和交通规划、决策提供内河航道的重要交通参数^[5-6]。如今视觉测量技术在目标跟踪和检测上的应用越来越多,但是对于水路交通环境中的船舶跟踪研究较少。水路交通参数包括船舶几何参数、船舶航向、船型、船速、航道流量等;目前国内常见的内河河道上的交通参数检测方法有声纳检测器、超声波检测器、激光检测器、视频检测技术等^[7]。声纳技术主要是实现船舶吨位的智能测量,而声纳传感器安装的位置是有要求的,使用时受到船舶距离的限制;超声波和激光检测器这些检测技术采用发射、反射和接收模式,容易受环境干扰,影响其测量精度;而激光检测器主要是利用激光的发射与接收时间来判断船舶图像的位置和深度,从而实现交通参数的检测和船舶的 3 维重建,但是激光检测器的价格昂贵,运用到一般的测量系统中不是很现实。视频检测技术在智能交通方面有诸多优点,比如,检测范围大,提供信息丰富,测量精度高,安装维修方便,检测系统易于维护,主要依靠软计算测量,成本低,能够适应复杂的水上交通环境^[8]。由于这些优点,提出一种基于视频的水路交通流参数视觉测量方法。

1 测量系统理论建模

视觉测量通过获取船舶目标的 2 维图像,建立相应的数学模型来感知、描述、理解和识别目标,本文提出一种航运交通参数视觉测量的理论框架,以本框架来指导整个系统的设计^[8-10]。从图像工程的

角度来看,该框架是一个图像理解中情景语义解释问题,可将本框架分为 4 层,分别是视觉感知层、图像理解层、语义表示层和应用决策层,如图 1 所示。利用视觉传感器获取的信息和基于知识库的广义虚拟传感器信息,抽象各传感器信息,构建信息融合模型,完成航运交通参数的直接测量和间接获取,系统软件架构如图 2 所示。

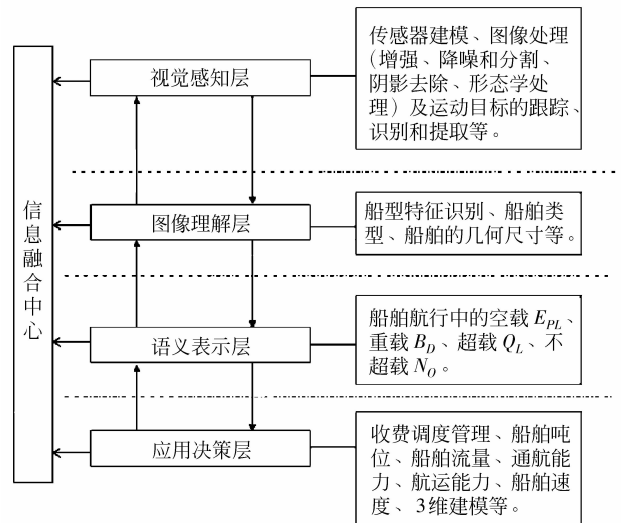


图 1 测量系统分层模型

Fig. 1 Hierarchical model of measuring system

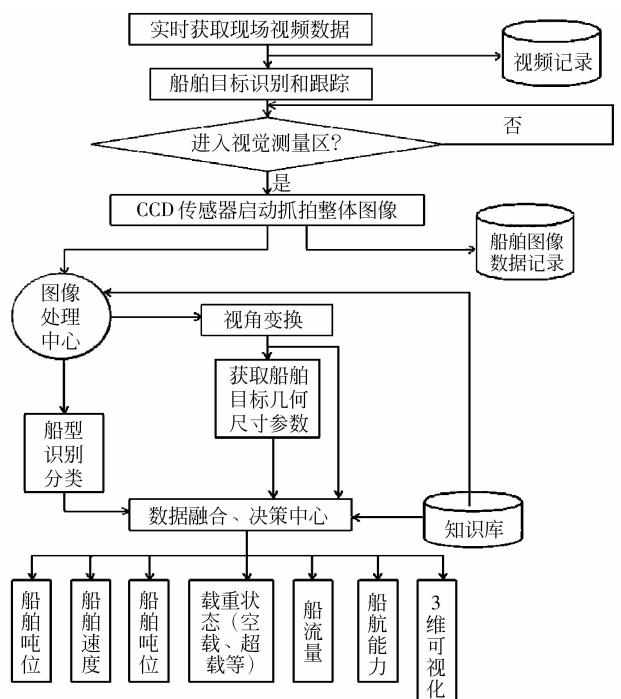


图 2 系统软件架构

Fig. 2 System software architecture

2 测量系统设计关键问题研究

2.1 视觉感知层的分析与描述

水路交通流参数获取是图像工程的综合应用,涉及图像处理的各层面。本系统依据航运实际应用环境设计。视觉感知层主要技术环节涉及视觉传感器定位、跟踪进入检测区域的船舶对象、有效提取船舶对象基本属性。由于船舶目标的背景为水面,且受光线、天气等外界条件变化的影响,背景建模是视觉感知层的基础工作,也是重要的一个环节,关系到进一步分析视频图像信息的可靠性。

由于船舶的复杂轮廓纹理特性和运动速度较慢等特性,通过实验验证帧差法跟踪效果不是很好;粒子滤波跟踪方法易受水波影响,易发生误跟踪,而且粒子滤波算法需要对所有粒子进行系统的观测和重采样,使得计算量很大,不适用于实时性要求高的系统工程。

Kalman 滤波器是根据最小均方误差准则建立起来的估计方法,它用线性递推的方法,对多个测量数据和多个信号参数进行处理,给出无偏的最小均方误差估计。它只用信号的前一个估计值和最近一个观察值就可以在线性无偏最小方差估计准则下估计信号的当前值,而不必像维纳滤波器那样需要全部过去的观察值。同时,可根据受噪声干扰的观测输入对未知系统状态和参数进行估计,观测噪声和扰动输入都看作随机过程。Kalman 滤波一般都假设它们是高斯白噪声过程,它们的概率密度函数是均值为零的高斯函数^[11-17]。因此,本系统采用 Kalman 背景建模法提取背景。

对于水面环境的一些特殊的影响因素,如水波和阳光的反射,使得背景产生一些亮度突变,容易把一些水面波动区域检测为运动物体。为了检测得到单一的船舶跟踪图,去除这些误检测区域,通过设定检测区域的长、宽、区域面积和区域平均亮度这些特征值的范围来排除水波和阳光的干扰。利用 Kalman 滤波提取背景后,使用背景差法获得目标区域。通过在江苏省常州市魏村内河航道实测,得到用于去除误检测区域的特征值范围如下:长 10 ~ 20 pixels,宽 10 ~ 60 pixels,区域面积 100 ~ 2 999 pixels和区域平均亮度值 5 ~ 52。检测到的区域特征值超出以上范围时,被认为是非目标干扰区域,去除。这样就可以较为准确的提取运动的船舶,

去除水波和阳光反射的影响。

图 3 所示为远景和近景跟踪实验,实验统计经过的船舶数量,如(c)(g) Results 窗口所示,(c)中此时还没有船舶通过,显示结果为 0;当船舶过了某一区域,在水面划定一个界线,当船舶过了界线,用矩形框对被跟踪的船舶进行定位,实时显示船舶的位置,并在窗口的左上角显示当前超越界限的船舶数量((g)中显示船舶数量为 1)。该方法应用到交通流参数的测量上,实时性较高。

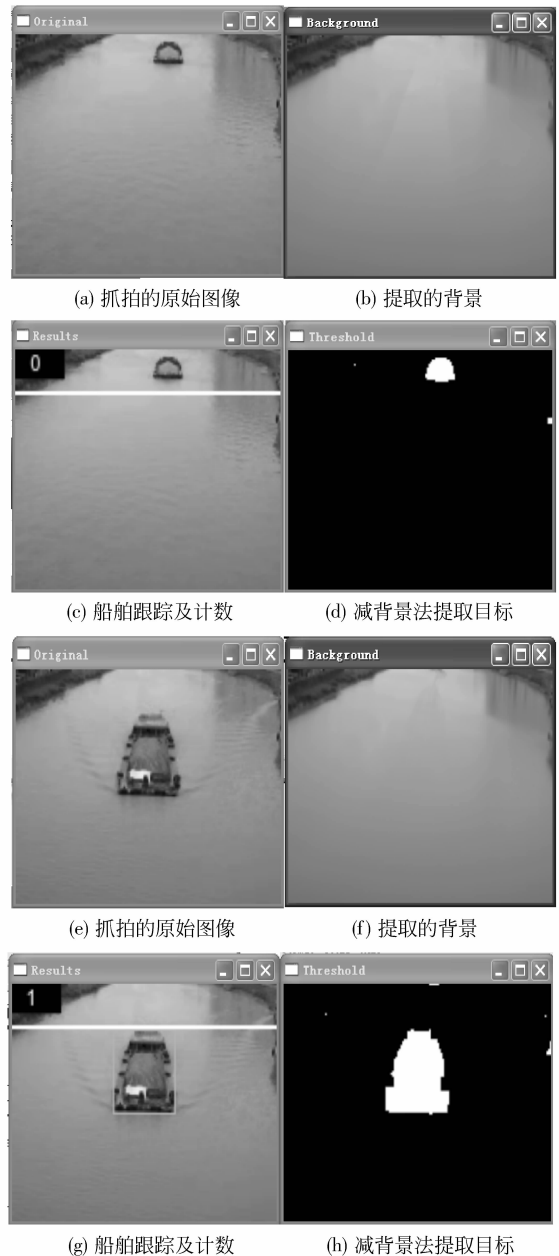


图 3 远景和近景跟踪实验结果

Fig. 3 Tracking results of distant view and nearby view

2.2 图像理解层的分析与描述

在准确跟踪和目标提取的基础上,图像理解层主要借鉴人类视觉信息的处理机理,利用先验知识指导对感兴趣目标(船舶)的分析和描述,最大限度地剔除目标图像的冗余信息,保留重要信息,实现图像到数据的解析。系统采用基于透视变换的计算模型,实现多视角下船舶的长度、宽度和船舷高度等参数测量。利用透视中心、像点、目标点 3 点共线的条件,按透视旋转定律使成影面(透视面)绕迹线(透视轴)旋转某一角度,破坏原有的投影光线束,仍能保持成影面上投影几何图形的不变性。将系统 CCD 视觉传感器的视角转化为垂直于水面向下的视角和与水面平行的视角,通过视角变换可得到垂直和水平视角下的船舶图像,再确定图像空间与物理空间的对应关系,结合 CCD 视觉传感器标定参数,可以计算图像像素和实际距离的关系,进而可以按等比例关系,将透视变换后的船舶的长、宽和船舷高度的像素值,直接转换为实际物理空间的长、宽和船舷高度,最终获得船舶目标的长、宽和船舷高度^[18]。

下面以测量船舶的长和宽为例,建立船舶几何尺寸的视觉测量模型,其原理如图 4 所示。

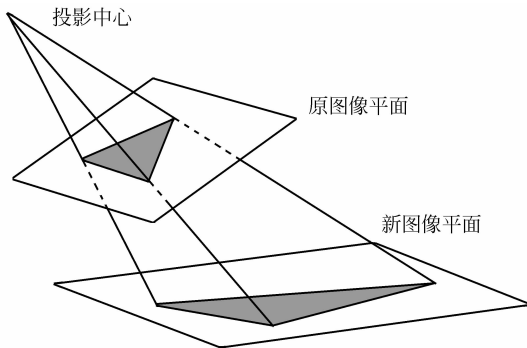


图 4 重投影示意图

Fig. 4 Re-projection diagram

设 (x, y) 是坐标平面 XOY 中的一点, (x', y') 是 (x, y) 在坐标平面 $X'OY'$ 中对应的像点,则有

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix}}{1 + \begin{bmatrix} u & v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}} \quad (1)$$

式中, a, b, c, d, e, f, u, v 都是常量。

确定两个平面之间的投影变换只需要在两个平面上找到 4 对“物点和像点”,由这 4 对点的对应关系就可以确定 a, b, c, d, e, f, u, v 。具体而言,用

一个规范化坐标系(平面)作为重投影平面,首先建立从规范化坐标到原始坐标的变换,其形式为

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix}}{1 + \begin{bmatrix} u & v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix}} \quad (2)$$

为了确定 a, b, c, d, e, f, u, v 8 个常量的数值,在实际河道环境下标定,其方法是在河道设置的测量区,以河道两边堤岸为矩形的长,以河道宽度为宽构成矩形(不一定是正方形),约束条件为标定时,要求河道平行或者垂直于船体轴线,这样的矩形在原始图像中显示为一个理想的等腰梯形,如图 5 所示。

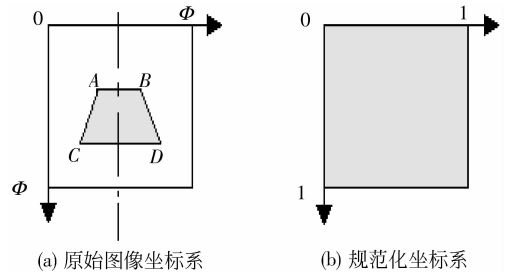


图 5 规范化坐标系和原始图像坐标系

Fig. 5 Standardized coordinate system and the original image coordinate system

设 A 点的坐标为 (x_1, y_1) , C 点坐标为 (x_2, y_2) , 则 B, D 的坐标分别是 $(\phi - x_1, y_1)$ 和 $(\phi - x_2, y_2)$ 。经过投影, A, B, C, D 4 个点依次与规范化坐标系中的 $(0, 0)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 1)$ 4 个点相对应。将此对应关系代入式(2),得

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix}}{1 + \begin{bmatrix} u & v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \phi - x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix}}{1 + \begin{bmatrix} u & v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix}}{1 + \begin{bmatrix} u & v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \phi - x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix}}{1 + \begin{bmatrix} u & v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}} \quad (6)$$

可以求得各待定常数为

$$\begin{cases} c = u = 0 \\ a = \Phi - 2x_1 \\ v = \frac{a}{\Phi - 2x_2} - 1 \\ b = x_2v + x_2 - x_1 \\ d = y_2v + y_2 - y_1 \\ e = x_1 \\ f = y_1 \end{cases}$$

2.3 语义表示层的分析与描述

语义表示层建立在图像理解的基础上,进一步在知识的指导下描述船舶状态和事件,确立船舶基本几何属性、状态和事件关联,形成船舶几何尺寸、吨位、船舶空载 E_{PL} 、船舶重载 B_D 、船舶超载 O_L 、船舶不超载 N_o 、船舶速度、船舶类型等的语义表示,并自动生成一个事件记录,提交数据库,为后续应用决策。

2.4 应用决策层的分析与描述

应用决策层面向用户,提取语义事件记录和图像视频记录,得到航运能力分析、船舶航行速度、水路交通流密度统计、安全态势评估等。

3 实验

3.1 测量环境部署

依据内河航运管理要求,测量环境首先考虑设置测量区域。本系统部署两处测量区域,如图 6 所示。在船闸上、下游远调站航道 1 km 处部署测量区域;CCD 视觉传感器模组安装于船闸横梁处,使过闸的船舶能够在其正下方通过,这样就能够采集船舶自上而下的俯视图。实验地点选在了常州市魏村一个内河航运船舶过闸处。硬件平台包括工业计算

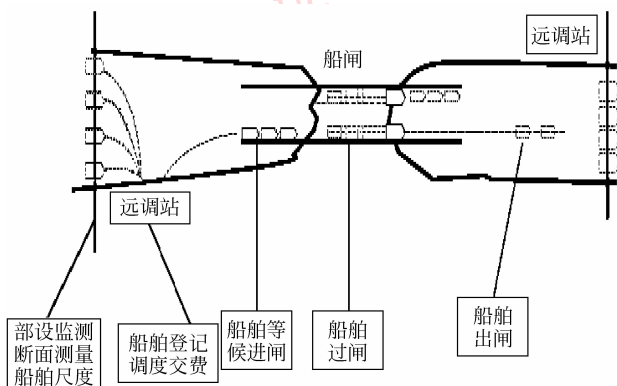


图 6 测量区域部署

Fig. 6 Deployment of measurement area

机,P4 2.4 GHz 主频的 CPU;大恒 DH-HV1303 工业相机,分辨率可达 $1\ 280 \times 1\ 024$,标准 CS,C 镜头,允许外触发;软件开发工具选用 VC++ 6.0,数据库选用 SQL Server 2000,操作系统支持 Windows XP。

3.2 关键参数测量与实验

3.2.1 直接数据测量

利用一台广角摄像装置对内河航道的过往船舶对象进行视频跟踪,在河道上选取一块区域作为检测区,当船舶过了检测边界线,进入检测区时,软件计时开始,当船舶过了检测区域后,即过了第 2 道检测边界线,停止计时,并且将船舶数目加一,统计过闸的船舶数目。在检测区内,采用视觉技术直接获取船舶的长(测量范围 20 ~ 230 m)、宽(测量范围 3 ~ 23 m)和高(干舷高度 -0.5 ~ 5 m)等信息。

依据视觉测量系统理论框架,实现水路交通流参数数据的直接获取软件流程如图 7 所示,监控系统用户界面如图 8 所示。系统采用 Kalman 背景建模法,以及减背景法完成船舶目标的跟踪。实验中,在获取的图像上标识一个矩形框作为虚拟的测量区域。在准确跟踪的基础上,采用基于透视变换的计算模型,得到垂直和水平视角下的船舶图像,再确定图像空间与物理空间的对应关系。透视变换后船舶的长、宽和船舷高度的像素值,直接转换为实际物理空间的长、宽和船舷高度,最终获得船舶目标的长、宽和船舷高度,现场测量值如表 1 所示。通过现场标定实验,船舶的几何尺寸测量平均误差小于

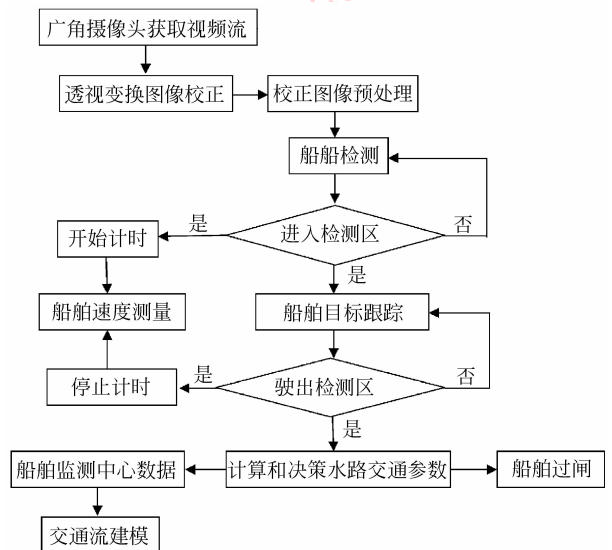


图 7 测量流程

Fig. 7 Measurement Process

1% ,满足工程应用要求。



图 8 系统监控软件界面

Fig. 8 Software interface of monitoring system

3. 2. 2 间接参数计算

通过建立先验知识库,如把京杭运河现有过闸船型尺度、标准化发展船型尺度收集全,在数据库中建立一个船舶尺度表(此表可以维护,以适应船型的变化或者增加),表中包括船舶种类、长、宽、高、

总吨等字段。每个种类的船舶是一条记录,依据直接测量的长、宽和高数据,查表找到长、宽和高相等或者最相近的那条船舶尺度记录,使用该条记录中的高度数据减去水上测量得到的干舷高度就是吃水深度,这样就可以计算过闸费。

3. 2. 3 交通流密度测量

交通流密度是指在单位时间内单位面积水域内行驶的船舶艘数,它反映出该水域内船舶的密集程度,所以又称为船舶密度。交通流密度是一个重要的参数,交通流密度高的水域,往往是事故多发地区,自然也就是船舶交通研究和交通管理的重点。交通流密度表示为

$$\rho = \frac{N}{WL} \tag{7}$$

式中, ρ 为某时刻的交通流密度, N 是检测区域的船舶数, L 和 W 是检测区域的长度和宽度。

交通量、交通流密度、速度等参数之间的关系式称为交通流模型,交通流的基本模型为

$$\rho = \frac{Q}{WV} \tag{8}$$

式中, ρ 为交通流密度, Q 为交通量, V 为速度, W 为观测航道的宽度。

表 1 直接测量数据统计

Tab. 1 Measurement results

测量参数	500 t 单放船 (45 × 9.2 × 1.7)				1000 t 单放船 (55 × 9.8 × 3.5)				2000 t 半分驳 (67.5 × 15.6 × 3.6)				/m
最大船长	41.8	42.1	41.1	40.9	54.7	55.3	55.2	54.6	67.1	68.3	67.7	67.9	
最大船宽	8.99	9.22	9.02	9.25	9.83	9.77	9.63	9.33	15.4	15.5	15.8	15.3	
吃水深度	0.74	1.17	0.99	1.32	1.37	2.31	1.06	1.97	0.79	1.05	0.46	2.07	
干舷高度	0.96	0.53	0.71	0.38	2.13	1.19	2.44	1.53	2.91	2.55	3.14	1.53	

4 结 论

视觉测量作为测量技术的一种手段,因其非接触方式感知测量目标,获取目标的信息量丰富,便于后续面向各类需求实施信息加工,在实际工程应用中的应用日益广泛。本文尝试对 CCD 传感器获取的图像信息进行分析和理解,以获取船舶目标的几何参数为主线,引入先验知识,间接获取水路交通流的其他参数,实现内河航运智能。提出的水路交通流参数视觉测量方法,利用图像-图形、图像-数据、数据-图像的计算和处理方法,建立了船舶基本几何

属性、状态和事件关联,对水路交通监管、水路交通规划和建设、水路执法以及实现水路智能交通系统都具有一定理论意义和实用价值。

参考文献 (References)

[1] Qian Xutao. Discussion on the inland navigation standard [J]. Jiangsu Ship, 2002, 19(2): 1-3. [钱徐涛. 浅议内河通航标准[J]. 江苏船舶, 2002, 19(2): 1-3.]

[2] Shi Yiming. Discuss auditing and control of harbor fee for ship [J]. Navigating Technology, 2003, 22(4): 72-73. [施一鸣. 论船舶对港费的审核与控制[J]. 航海技术, 2003, 22(4): 72-73.]

[3] Zhang Wei, Liao Peng. Analysis on characteristics of ship arrival

- at Shiqiao lock [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2004, 26(1): 70-73. [张玮, 廖鹏. 苏北运河施桥船闸到船特性分析[J]. *水利水运工程学报*, 2004, 26(1): 70-73.]
- [4] Zhang Wei, Liao Peng, Wu Lingli, et al. Main parameters of waterway lock capacity [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineer*, 2004, 4(3): 108-110. [张玮, 廖鹏, 吴玲莉, 等. 船闸通过能力主要影响因素[J]. *交通运输工程学报*, 2004, 4(3): 108-110.]
- [5] Zhang Qiang. Applicable principle on the International Convention on Tonnage Measurement of Ships, 1969 [J]. *World Shipping*, 2002, 25(4): 19-20. [张强. 谈《1969年国际船舶吨位丈量公约》的适用原则[J]. *世界海运*, 2002, 25(4): 19-20.]
- [6] Wang Feng, Qian Shao, Lü Jianguang, et al. Grading fragment arithmetic for inland waterway tonnage measurement of ship [J]. *Jiangsu Ship*, 1999, 16(6): 34-35. [王峰, 钱哨, 闾建庚, 等. 内河船舶吨位丈量分段算法探讨[J]. *江苏船舶*, 1999, 16(6): 34-35.]
- [7] Zhang Chunfu, Zhang Jun, Tang Wenyan, et al. Application of laser tracker on geometric parameters measurement of large dimensional workpieces [J]. *Tool Engineering*, 2002, 36(6): 26-28. [张春富, 张军, 唐文彦, 等. 激光跟踪仪在大尺寸几何参数测量中的应用[J]. *工具技术*, 2002, 36(6): 26-28.]
- [8] Zhen Nanning. *Computer Vision and Pattern Recognition* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 34-48. [郑南宁. *计算机视觉与模式识别* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 34-48.]
- [9] Zhang Yujin. *Image Engineering (Second Volumn)—Image Understanding* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 6-10. [章毓晋. *图像工程(下册)图像理解* [M]. 北京: 清华大学出版社. 2007: 6-10.]
- [10] Wang Runsheng. *Image Understanding* [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1998: 366-374. [王润生. *图像理解* [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998: 366-374.]
- [11] Dai Kexue, Li Guohui, Tu Dan, et al. Prospects and current studies on background subtraction techniques for moving objects detection from surveillance video [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11(7): 919-927. [代科学, 李国辉, 涂丹, 等. 监控视频运动目标检测减背景技术的研究现状和展望[J]. *中国图象图形学报*, 2006, 11(7): 919-927.]
- [12] Li Gang, Qiu Shangbin, Lin Ling, et al. New moving target detection method based on background differencing and cotermious frames differencing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(8): 961-964. [李刚, 邱尚斌, 林凌, 等. 基于背景差法和帧间差法的运动目标检测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(8): 961-964.]
- [13] Wang Xiaotong. Study of principle of measuring ship motion elements based on optical flow field [J]. *Navigation of China*, 2004, 59(2): 7-10. [王孝通. 基于光流法的舰船运动要素测定原理研究[J]. *中国航海*, 2004, 59(2): 7-10.]
- [14] Fleet D J, Jepson A D. Computation of component image velocity from local phase information [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 5(1): 77-104.
- [15] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Real-time tracking of non-rigid objects using mean shift [C] // *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Hilton Head, SC, USA: IEEE Computer Society, 2000: 142-149.
- [16] Peng Ningsong, Yang Jie, Liu Zhi, et al. Automatic selection of kernel-bandwidth for mean-shift object tracking [J]. *Journal of Software*, 2005, 16(9): 1542-1550. [彭宁嵩, 杨杰, 刘志, 等. Mean-Shift跟踪算法中核函数窗宽的自动选取[J]. *软件学报*, 2005, 16(9): 1542-1550.]
- [17] Shan C, Tan T, Wei Y. Real-time hand tracking using a mean shift embedded particle filter [J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40(7): 1958-1970.
- [18] Niu Yan. Discussion about perspective transform [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2001, 13(6): 550-552. [牛彦. 关于透视变换的研究[J]. *计算机辅助设计与图像学报*, 2001, 13(6): 550-552.]