



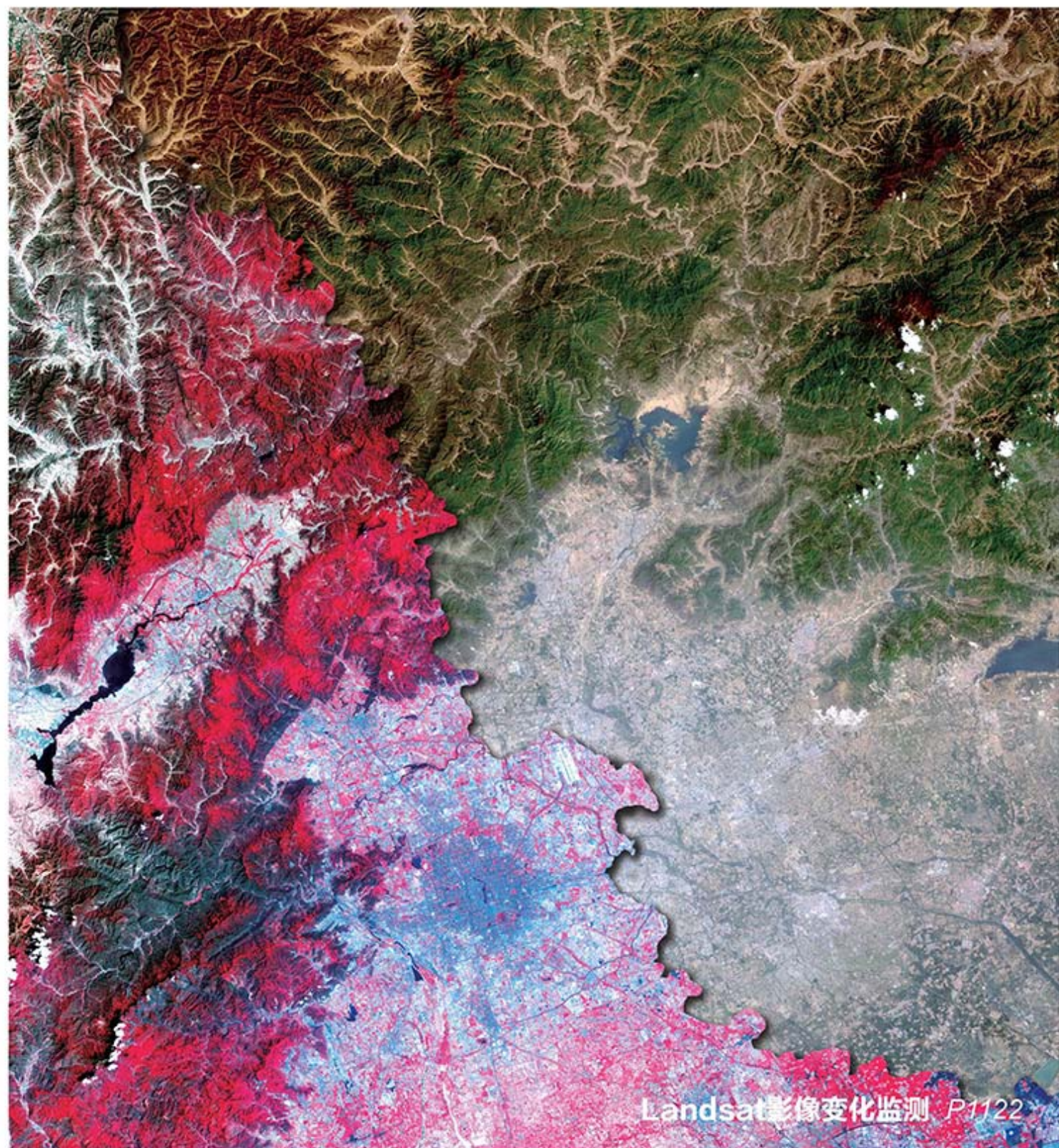
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
08
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



Landsat影像变化监测 P1122



第20卷第8期（总第232期）

2015年8月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@radi.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

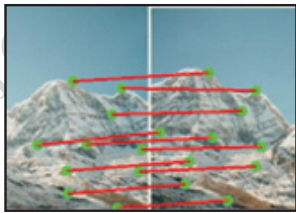
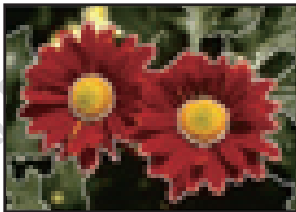
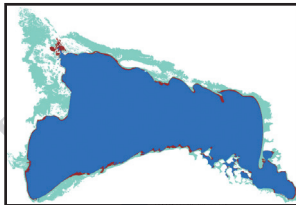
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元

利用Hough变换的匹配对提纯
(第1017页)结合格式塔完形规则的自然图
像分割(第1026页)利用长时间序列Landsat分析
博斯腾湖面积变化(第1122页)

图像处理 and 编码

CRT显示图像的色彩管理新模型

黎新伍, 王根生 0993

邻域窗口权重变分的图像修复

王猛, 翟东海, 聂洪玉, 王佳君 1000

自适应滤波窗实现距离加权图像椒盐噪声滤除

林亚明, 李佐勇, 林叶郁, 徐戈 1008

利用Hough变换的匹配对提纯

谢亮, 陈姝, 张钧, 田金文 1017

图像分析和识别

结合格式塔完形规则的自然图像分割

曾接贤, 王玉 1026

融合Kernel PCA形状先验信息的变分图像分割模型

杨建功, 汪西莉, 李虎 1035

基于2维灰度熵阈值选取快速迭代的图像分割

吴诗姘, 吴一全, 周建江, 孟天亮, 戴一冕 1042

基于图像线特征和点云面特征的水下人造目标定位

解则晓, 潘成成, 迟书凯, 魏征 1051

熵能量堆煤图像的定位与识别

袁姮, 王志宏, 姜文涛 1062

时空运动显著性的目标跟踪

谢昭, 刘玉敏, 张骏, 段士雷 1070

结合整体一致性和局部差异性的图像目标显著性检测

张小祥, 马儒宁 1083

基于Radon-经验模式分析的纹理分类

徐卓飞, 张海燕, 刘凯, 侯和平, 徐倩倩, 李利峰 1091

遥感图像处理

四叉树分块的高光谱图像分布式无损编码

王相海, 张智迪, 宋传鸣 1102

基于流形学习的彩色遥感图像分维数估算

王洪波, 罗贺, 王晓佳 1110

利用长时间序列Landsat分析博斯腾湖面积变化

孙爱民, 冯钟葵, 葛小青, 罗宇, 李山山, 闫芳, 冯旭祥 1122

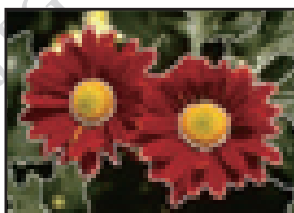
封面图片由中国科学院遥感与数字地球研究所卫星地面系统工程部李山山副研究员提供

CONTENTS

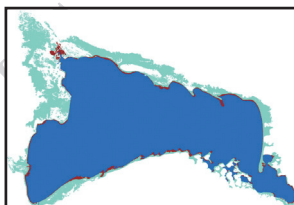
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Purifying algorithm for rough matched pairs using Hough transform (P1017)



Natural image segmentation method based on Gestalt rules (P1026)



Bosten Lake surface area changes analysis using long temporal Landsat image series (P1122)

Image Processing and Coding

- Color management model for CRT color image
Li Xinwu, Wang Gensheng 0993
- Image inpainting with weight variation of neighborhood window
Wang Meng, Zhai Donghai, Nie Hongyu, Wang Jiajun 1000
- Distance-weighted approach based on self-adaptive windows to remove salt and pepper noise in images
Lin Yaming, Li Zuoyong, Lin Yeyu, Xu Ge 1008
- Purifying algorithm for rough matched pairs using Hough transform
Xie Liang, Chen Shu, Zhang Jun, Tian Jinwen 1017

Image Analysis and Recognition

- Natural image segmentation method based on Gestalt rules
Zeng Jiexian, Wang Yu 1026
- Variational image segmentation incorporating Kernel PCA-based shape priors
Yang Jiangong, Wang Xili, Li Hu 1035
- Image segmentation based on the fast iteration for two-dimensional gray entropy threshold selection
Wu Shihua, Wu Yiquan, Zhou Jianjiang, Meng Tianliang, Dai Yimian 1042
- Underwater man-made object localization based on line feature of image and surface feature of point cloud
Xie Zexiao, Pan Chengcheng, Chi Shukai, Wei Zheng 1051
- Coal pile location and recognition method based on entropy energy
Yuan Heng, Wang Zhihong, Jiang Wentao 1062
- Spatio-temporal motion saliency for object tracking
Xie Zhao, Liu Yumin, Zhang Jun, Duan Shilei 1070
- Image target saliency detection by combining the global consistency and local difference
Zhang Xiaoxiang, Ma Runing 1083
- Texture classification based on Radon-empirical mode decomposition analysis
Xu Zhuofei, Zhang Haiyan, Liu Kai, Hou Heping, Xu Qianqian, Li Lifeng 1091

Remote Sensing Image Processing

- Lossless distributed source coding of hyperspectral images based on quadtree segmentation
Wang Xianghai, Zhang Zhidi, Song Chuanming 1102
- Estimation research for fractal dimension of color remote sensing image based on manifold learning
Wang Hongbo, Luo He, Wang Xiaojia 1110
- Bosten Lake surface area changes analysis using long temporal Landsat image series
Sun Aimin, Feng Zhongkui, Ge Xiaoqing, Luo Yu, Li Shanshan, Yan Fang, Feng Xuxiang 1122

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)08-1051-11

论文引用格式: Xie Z X, Pan C C, Chi S K, Wei Z. Underwater man-made object localization based on line feature of image and surface feature of point cloud[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(8): 1051-1061. [解则晓, 潘成成, 迟书凯, 魏征. 基于图像线特征和点云面特征的水下人造目标定位[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(8): 1051-1061.] [DOI:10.11834/jig.20150808]

基于图像线特征和点云面特征的 水下人造目标定位

解则晓, 潘成成, 迟书凯, 魏征

中国海洋大学工程学院, 青岛 266100

摘要: **目的** 针对水下人造目标的位姿参数估计问题, 提出一种基于图像线特征与点云面特征的目标定位算法。**方法** 基于对人造物体成像后的边缘特征及其本身曲面特征的认知, 将目标描述成为一种线特征与面特征的组合。首先依据指定线型对目标图像边缘进行线特征检测, 初步定位目标在图像中的位置; 然后采用 RANSAC (random sample consensus) 算法对投影到目标区域内的点云进行曲面特征检测, 得到目标参数的近似值并从视场点云中提取目标点云; 最后以超二次曲面作为目标的部件化模型, 以检测到的目标参数为初值, 建立 3 维目标尺寸和位姿估计的非线性目标函数, 将该目标函数的优化结果作为 3 维目标的定位结果。**结果** 通过水下实验对算法的有效性进行验证, 定位后的目标旋转轴角度偏差不超过 2° , 相对位置偏差不超过 1%, 单目标定位耗时不超过 5 s。**结论** 实验结果表明, 该算法的定位精度和耗时均能满足应用需要, 可有效定位未知尺寸的人造目标, 且对水下复杂环境有较强的适应性。

关键词: 机器视觉; 人造目标定位; 椭圆检测; 随机抽样一致性; 超二次曲面

Underwater man-made object localization based on line feature of image and surface feature of point cloud

Xie Zexiao, Pan Chengcheng, Chi Shukai, Wei Zheng

Engineering College, Ocean University of China, Shandong, Qingdao 266100, China

Abstract: **Objective** Accurate visual guidance information is needed when unmanned underwater robots are implementing interactive tasks. Structured light measurement system is widely used in 3D reconstruction of an underwater target because its measuring accuracy is basically unaffected by light refraction and attenuation effects. However, the positioning of an underwater target becomes more difficult considering the underwater unstructured scenarios, the overlap and occlusion between a target and other underwater objects, and the single visual and scattered measurement data. For the problem of position estimation of an underwater man-made object, a 3D object localization algorithm is proposed based on the line feature of an image and the surface feature of a point cloud. **Method** Owing to the edge characteristics of the image and surface features of man-made objects, the proposed algorithm describes the object as a combination of line feature and surface feature, and the combination is provided for the localization algorithm as prior information. First, the whole field-of-view image is seg-

收稿日期: 2014-01-14; 修回日期: 2015-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61171162); 教育部博士点专项资金项目 (20110132110010)

第一作者简介: 解则晓 (1968—), 男, 教授, 博导, 2000 年于天津大学获测试计量技术与仪器专业工学博士学位, 主要从事机器视觉和机器人运动控制及机器人测量方面的研究。E-mail: xiezexiao@ouc.edu.cn

通信作者: 潘成成, 研究生, E-mail: pccouc@163.com

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61171162); Doctoral Fund of Ministry of Education of China (20110132110010)

mented into several regions of interest (ROIs) that contain different targets, and then the edges of the ROIs are detected. According to the specified line type in prior information, the feature lines are identified from the image edges of the ROIs. The position of the target in the whole field is confirmed with the region of potential target being selected on the basis of identification results. Second, the point cloud that was projected onto the object region is extracted based on the mapping relationship between the image and the point cloud of structured light measurement system. The random sample consensus algorithm is adopted to detect the surface feature from the extracted point cloud, which includes the points of the target, other partial objects, and noise in the field of view. Meanwhile, the parameters of the surface are approximated and the points of the target are extracted. Finally, taking superquadrics as the part-based model for the 3D object, a nonlinear objective function for the 3D object parameter estimation is established using the aforementioned initial approximations. Then, the objective function is minimized using target points, and the optimized parameters can be used as localization result.

Result The reproducibility experiment indicates that the proposed algorithm for ellipse detection is robust; even semi-ellipses can be identified accurately. The validity of the proposed localization algorithm is verified through underwater experiments. For multi-targets whose symmetry axes are parallel to each other, the localization results show that the axis deviations are less than 2° . The relative position deviation of the two spheres, whose center distance is known, is no more than 1%. The time consumed for single-object localization in a complex underwater environment is no longer than 5 s. **Conclusion** Unlike other localization algorithms, the proposed algorithm needs to neither segment the point cloud from the target scene nor target offline modeling. Autonomous positioning can be achieved by simply providing the line feature in target imaging edges and the contained surface feature. To verify the validity of the proposed algorithm, some practical experiments are performed. Experimental results show that the proposed algorithm can obtain accurate localization results, is fast and effective for a man-made object of unknown size, and has good applicability to complex underwater environments.

Key words: machine vision; man-made object localization; ellipse detection; RANSAC; superquadrics

0 引言

近年来,海洋资源的开发和利用逐渐走向深远海,对水下作业技术也提出了越来越高的要求。机器人作为一项重要的水下作业技术,要在水下无人干预的环境中执行任务,必须具备较强的自主干预能力^[1-3]。对于以水下目标为交互对象的机器人来说,目标的定位是其自主干预能力的基础。水下目标的定位依赖于目标3维信息的获取,与传统的视觉测量系统与激光测距仪相比,结构光测量系统^[4-6]的测量精度基本不受水下光线散射和衰减效应的影响,更适用于水下黑暗浑浊的环境,因此被广泛应用应于水下目标的3维重建。利用结构光测量系统对水下场景进行扫描,得到的视场点云是大规模的散乱分布的单视数据点,且目标与其他水下物体往往会相互重叠和遮挡,这些均为水下目标的定位带来困难。人造目标大多以球形、圆柱、圆锥、圆台及长方体等规则形状为主要构成部件,是最常见的机器人交互对象。水下人造物体的识别与定位除了点云数据方面的困难外,还有可能面临其尺寸未知的情况,因此需要一种能够克服上述问题的定位算法。

目前,许多国内外学者对基于3维点云的目标识别与定位方法进行了研究。Huebner等人^[7-8]提出一种基于最小包围盒的拟合与分割算法,该方法对目标点云进行最小包围盒拟合并进行分割,可将目标点云分割成若干子包围盒,适用于复杂形状目标的位姿参数估计,但是得到的位姿参数精度较低;Rusu等人^[9]采用视点特征直方图来描述目标的形状,可实现低复杂度视场中目标的位姿参数估计,但不适用于复杂场景中物体遮挡的情况。以上方法均须由人工将目标点云从视场点云中分离后才能进行位姿估计,因此不能用于水下无人干预环境中的目标识别与定位。

汪霖等人^[10]以超二次曲面作为目标的部件化模型,利用数据点到目标模型的均方距离建立目标函数,将目标函数的优化结果作为3维目标的姿态估计结果,该方法精度较高,参数估计一致性好,但需对目标进行离线建模,且无法用于未知尺寸的目标;Biegelbauer等人^[11]采用超二次曲面对目标进行建模,利用分层RANSAC(random sample consensus)算法对单视点云检测得到目标的多个假设位姿,最终通过投票选出拟合质量最优的目标位姿,具有较高的稳定性,但是该方法同样需要离线建模,且需移

除目标之外的点云以提高算法速度。

现有的目标定位方法,或者需要对点云场景进行分割,或者需要离线建模,对于水下无人环境中人造目标的定位都有其局限性。为此,提出一种基于目标图像线特征与点云面特征的人造目标定位算法,以达到自主精确估计水下未知尺寸的人造目标的位姿参数的目的。算法主要针对以规则形状为主要部件的人造目标,整个运算过程仅需提供简单的组合信息。算法首先确定目标在图像中的区域;然后从投影到图像目标区域的局部点云中检测曲面,并提取目标点云;最后通过超二次曲面拟合确定目标的尺寸位姿参数。

由于矩形、圆柱面等成像后所形成的边缘特征为直线,球形、圆柱底面等成像后则呈椭圆线边缘特征,这类线特征形状规则,且不随物体位姿变化而变换,人造目标成像后通常呈现这类线边缘特征,而水下物体如沙石、植被等成像后的边缘特征不规则,因此使用直线和椭圆线等规则的线特征来区分人造目标与水下物体。人造目标在图像中的区域确定以后,可以将映射到目标区域中的局部点云从视场点云中分离。局部点云中同时包含人造目标数据点和部分其他水下物体的数据点,采用RANSAC算法^[12]对局部点云进行面特征检测,获取目标的近似尺寸和位姿参数,并提取目标点云。超二次曲面作为一种参数模型^[13],可以用统一的参数描述不同的规则形状,同时能够反映物体的惯性平衡,以其为部件的3维目标适于机械手抓取,因此利用超二次曲面的参数模型建立目标函数以优化目标参数。在拟合超二次曲面过程中为达到快速收敛的目的,使用超二次曲面标准方程和尺度因子结合的形式,并使用LM优化算法^[14]优化目标函数,快速准确地得到水下目标位姿参数。实验结果表明该算法仅需指定目标成像后边缘线与其本身的曲面类型,就可得到目标的尺寸和位姿参数,适用于水下复杂环境中未知尺寸人造目标的定位。

1 基于图像线特征的目标粗定位

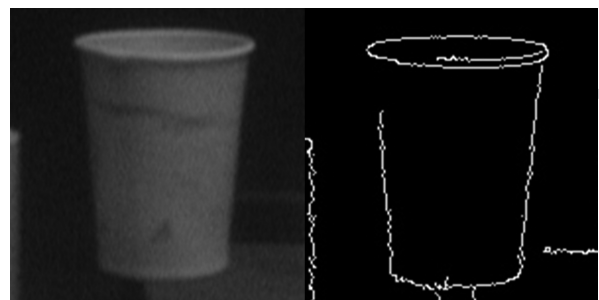
采用结构光测量系统进行扫描时,待定位目标在整个视场中往往占有很小的比例,直接从视场点云中目标进行位姿参数估计是困难的,为此提出基于图像线特征的目标粗定位方法,以确定目标在

视场中的区域。

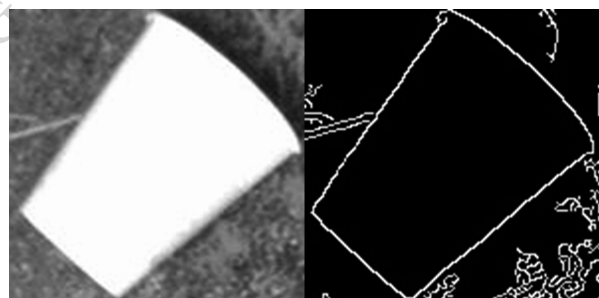
对目标进行粗定位的前提是图像分割和边缘检测。图像分割是将图像分割成包含目标的若干封闭区域,边缘检测是识别图像中灰度变化明显的点,采用自动阈值算法和Canny算子分别进行图像分割和边缘检测,两种方法简单易行,多数场景下都是快速有效的。经上述过程处理后,可对封闭区域内的图像边缘进行直线和椭圆线识别,以判断该区域是否包含待定位目标。目前有多种算法可实现直线检测,如霍夫变换等,本文不再赘述,下面着重介绍椭圆线的检测方法。

圆柱或圆锥成像后的底面边缘呈椭圆线特征,由于姿态不同,椭圆边缘线的尺寸、方向也不同,且有时因为自身遮挡而形成半椭圆线特征(如图1),针对这种情况采用基于RANSAC算法的椭圆线检测方法。首先求取每一个图像边缘点的单位法矢量,即获取以该边缘点为中心的9个像素范围内的所有边缘点,使用这些边缘点拟合一条最小二乘直线,以该直线的单位法向量近似表示该边缘点的法矢量。那么封闭区域内边缘点可用的图像坐标 (u, v) 和法矢量 (p, q) 来表示。平面二次曲线^[15]的方程为

$$f(u, v) = u^2 + Auv + Bv^2 + Cu + Dv + E = 0 \quad (1)$$



(a) 完整的椭圆边缘线



(b) 由于自身遮挡形成半椭圆边缘线

图1 不同姿态的纸杯形成不同的椭圆边缘线

Fig. 1 Different elliptic edges are formed with different gestures of the paper cup

根据隐函数求导公式可得

$$\frac{q}{p} = \frac{f_v}{f_u} = \frac{Au + 2Bv + D}{2u + Av + C} \quad (2)$$

一个边缘点的坐标和法矢量分别可以约束二次曲线的一个参数,那么至少需要 3 个边缘点才能确定一条二次曲线。利用随机抽样的 3 个边缘点的坐标和法矢量,依据式(1)(2)建立非齐次线性方程组

$$\begin{bmatrix} u_i v_i & v_i^2 & u_i & v_i & 1 \\ & \vdots & & & \\ u_i - \frac{q_i}{p_i} v_i & 2v_i & -\frac{q_i}{p_i} & 1 & 0 \\ & \vdots & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -u_i^2 \\ \vdots \\ 2\frac{q_i}{p_i} u_i \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $i=1,2,3$ 。解式(3)可得到一条二次曲线 $\Lambda = \{A, B, C, D, E\}$, 当满足 $A^2 - 4B < 0$ 时, Λ 为椭圆线。

其椭圆心坐标为 $\left(\frac{2BC - AD}{A^2 - 4B}, \frac{2D - AC}{A^2 - 4B}\right)$, 半长半轴分别为

$$a = \sqrt{\frac{2(ACD - BC^2 - D^2 + 4BE - A^2E)}{(A^2 - 4B)(B - \sqrt{A^2 + (1-B)^2 + 1})}} \quad (4)$$

$$b = \sqrt{\frac{2(ACD - BC^2 - D^2 + 4BE - A^2E)}{(A^2 - 4B)(B + \sqrt{A^2 + (1-B)^2 + 1})}} \quad (5)$$

求取边缘点 (u, v) 在椭圆上的投影 (u', v') , 并根据设定的偏差条件判断该点是否在椭圆上, 即当 (u, v) 和 (u', v') 的距离小于距离偏差 β , 且该点的法矢量 (p, q) 与 (f_u, f_v) 的夹角小于角度偏差 α 时, 认为该边缘点位于椭圆上。当参与拟合椭圆的 3 个边缘点都满足偏差条件时, Λ 为候选椭圆。

选定最优椭圆之前需对候选椭圆其进行排序, 由于椭圆的大小未知, 仅根据候选椭圆上边缘点数进行排序会导致误识别。考虑到图像上的椭圆周长是以像素为单位, 边缘点在图像中又表现为像素, 边缘点数可近似表示椭圆线的长度, 那么两者的比值则可以表征椭圆线的完整度。因此提出按椭圆上边缘点数与其周长比例大小进行排序, 以选取最完整的候选椭圆为最优。设候选椭圆上的边缘点数为 N , 其周长为

$$L = \pi[1.5(a + b) - \sqrt{ab}] \quad (6)$$

将候选椭圆的评价系数定义为

$$\sigma = \frac{N}{L} \quad (7)$$

按式(7)计算每个候选椭圆的评价系数并对其进行排序, 选择评价系数最大的候选椭圆为最优, 当最优椭圆的评价系数高于设定的系数阈值 $\sigma_{\min}$ 时, 可认为分割区域中存在椭圆。为提高算法速度, 当随机抽样得到的椭圆满足 $\sigma > 0.8$ 时, 可认为该候选椭圆为一个完整椭圆, 此时无需再对椭圆进行排序而直接选择该椭圆为最优。

将距离偏差 β 和角度偏差 α 分别设为 3 pixel 和 6° , 椭圆的评价系数阈值 $\sigma_{\min}$ 设为 0.4。分别以边缘点数和本文评价系数对图 1(b) 进行椭圆检测的结果如图 2 所示, 以边缘点数排序得到的最优椭圆上有 181 个边缘点, 边缘点数与椭圆周长之比为 0.298; 以本文评价系数排序得到最优椭圆上有 138 个边缘点, 边缘点数与周长之比为 0.434, 显然本文方法能得到正确的椭圆。以本文评价系数对图 1(a) 边缘进行 50 次相互独立的椭圆检测, 由图 3 可知最优椭圆的评价系数均保持在 0.6 附近, 证明提出的椭圆检测算法具有鲁棒性。



(a) 边缘点数排序 (b) 本文评价系数排序

图 2 不同排序方法得到的最优椭圆

Fig. 2 Optimal ellipses voted by different evaluation coefficient

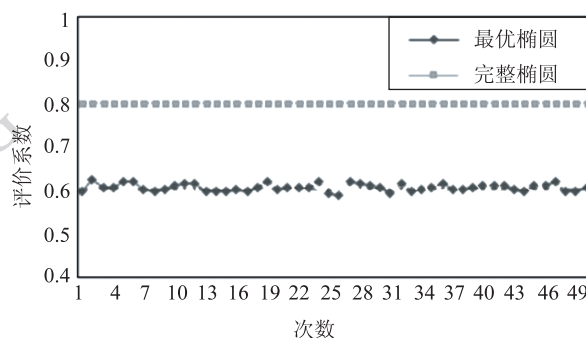


图 3 对图 1(a) 进行 50 次独立检测得到的最优椭圆系数

Fig. 3 The coefficients of detected optimal ellipse in Fig. 1(a) through 50 independent tests

使用霍夫变换对分割区域内的图像边缘进行直线检测, 有时会检测到多条直线, 而其中的有些直线

不属于目标边缘,因此需要对其进行筛选。考虑到同一目标的椭圆线与直线边缘存在近似相切的位置关系,采用直线到椭圆的距离来判定直线是否属于定位目标。假设直线方程为 $u + A'v + B' = 0$, 首先求出椭圆 Λ 上的法矢量与直线垂直的点,根据式(2)建立

$$\frac{Au + 2Bv + D}{2u + Av + C} = A' \quad (8)$$

与式(1)联立即可得到两点坐标 (u_1, v_1) 和 (u_2, v_2) 。然后求出两点到直线的距离 d_1 和 d_2 。最后根据设定的距离阈值 $d_{\max}$ 进行判定,当满足 $\min(d_1, d_2) < d_{\max}$ 时,可认为直线与椭圆相切,即该直线属于目标边缘。

通过直线和椭圆线检测的结果可判断图像分割区域内是否存在这两种类型的特征线,并依据提供的线特征信息判断该区域内是否存在待定位目标。如果分割区域包含待定位目标,那么根据结构光测量模型中视场点云和视场图像的投影关系,可知映射到分割区域的局部点云包含待定位目标点云,那么在后续的工作中仅需对局部点云进行处理即可。

2 基于点云面特征的目标二次定位

采用 RANSAC 算法对局部点云进行曲面特征检测,初步实现以平面、球面、圆柱面、圆锥面等为部件的目标尺寸与位姿参数估计,即目标的二次定位。

2.1 计算数据点法矢量

数据点的法矢量为曲面在该点的微切平面的法向量。采用 k 近邻查询算法^[16],获取局部点云中任意数据点的 k 近邻点集。利用该数据点与其 k 近邻点集拟合最小二乘平面,以该平面的法向量来近似表示数据点法矢量。

2.2 面特征检测算法

典型空间曲面通常只有 3~7 个参数,每个数据点的空间坐标和法矢量可分别约束曲面的一个参数,因此估计典型曲面参数通常仅需要两个或者 3 个采样点。使用尽量少的数据点来估计曲面参数,可以提高每一次随机抽样的数据点位于同一曲面上的概率,而多出的数据点信息可以用于筛选评价系数较低的曲面,因此随机抽样 3 个数据点来估计曲

面参数。

1) 平面。使用 3 个数据点 $\{p_1, p_2, p_3\}$ 的坐标拟合空间平面并得到平面法向量 ν , 当且仅当 3 个数据点的法矢量 n_1, n_2, n_3 与 ν 的夹角都小于 α 时,认为该平面为一候选平面。

2) 球面。球面以球心坐标 c 和半径 r 表示。 $p + t\mathbf{n}$ 为直线的参数化表示, t 为参数, t 被赋值后, $p + t\mathbf{n}$ 表示直线上一点。以直线 $p_1 + t_1\mathbf{n}_1$ 和 $p_2 + t_2\mathbf{n}_2$ 的公垂线段的中点为球心坐标 c , 由 $r = (|p_1 - c| + |p_2 - c|)/2$ 得出球体半径。当 3 个数据点到球面的距离都小于 β , 且其法矢量的角度偏差都小于 α 时,认为该球面为候选球面。

3) 圆柱面。圆柱面参数包括圆柱半径 r 、轴线方向矢量 ν 及轴线上任意一点 a 。轴线方向矢量由 $\nu = \mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2$ 求得, 由 $p_1 + t_1\mathbf{n}_1 - (p_2 + t_2\mathbf{n}_2) = t_3\nu$ 求得 t_1, t_2, t_3 后, 令 p_1 在轴线上的垂足 $p_1 + t_1\mathbf{n}_1$ 为轴线上一点, 圆柱半径由 $r = (|t_1\mathbf{n}_1| + |t_2\mathbf{n}_2|)/2$ 得到。当 3 个数据点到圆柱面的距离小于 β , 且其法矢量的角度偏差小于 α 时,该圆柱面为候选圆柱面。

4) 圆锥面。圆锥面参数包括圆锥轴线方向矢量 ν , 顶点 c 及母线与轴线夹角 ω 。每个数据点及其法矢量可以确定一个平面 $\mathbf{n}(x - p) = 0$, 以 3 个平面的交点作为圆锥的顶点 c , 轴线的方向矢量 ν 可由点集 $\left\{c + \frac{p_1 - c}{|p_1 - c|}, \dots, c + \frac{p_3 - c}{|p_3 - c|}\right\}$ 构成的平面的方向量确定, 并通过 $\omega = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \arccos\left(\frac{p_i - c}{|p_i - c|} \cdot \nu\right)$ 求出母线与轴线的夹角。最后判断该圆锥是否满足候选圆锥的偏差条件。

2.3 曲面参数的近似值

使用偏差条件判断数据点是否属于候选曲面, 可以得出每个候选曲面上的点的数量 N , 采用评价系数

$$\sigma = N \quad (9)$$

对候选曲面进行评价, 选取评价系数最高的候选曲面为最优。当且仅当最优曲面上的数据点数大于设定的阈值 $N_{\min}$ 时, 才认为点云中存在该类型的曲面。

以长方体为例, 通过最优曲面的参数和曲面上的数据点对曲面位姿参数进行估计, 其他形状可照此法。当局部点云存在两个或者 3 个相互垂直的平

面时,认为存在长方体。假设两个互相垂直的平面的质心和法矢量分别为 c_1, ν_1 和 c_2, ν_2 , 可由 $\nu = \nu_2 \times \nu_1$ 得到矩形的旋转轴方向, 并通过 $c_1 + t_1 \nu_1 - (c_2 + t_2 \nu_2) = t_3 \nu$ 求出 t_1, t_2, t_3 后, 以 $l = |2t_2|$ 和 $w = |2t_1|$ 作为矩形的长和宽, 以两个平面的点云即目标点云在旋转轴线上的投影范围为矩形高度 h , 以投影范围的中点为长方体的中心 c 。

目标的位姿可通过建立点云坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 和目标坐标系 $OXYZ$ 的关系进行估计。目标坐标系根据笛卡尔坐标系右手法则确定, 以长方体中心 c 为原点 O , 以空间矩形的长, 宽和高所在方向为 X 轴、 Y 轴和 Z 轴。那么曲面中心 c 为原点, 以曲面轴线 ν 为 Z 轴方向, 由于构成长方体的两个平面并非严格垂直, 分别以 ν_1 和 $\nu_1 \times \nu$ 为 Y 轴和 X 轴的方向, 建立目标坐标系, 如图 4 所示。

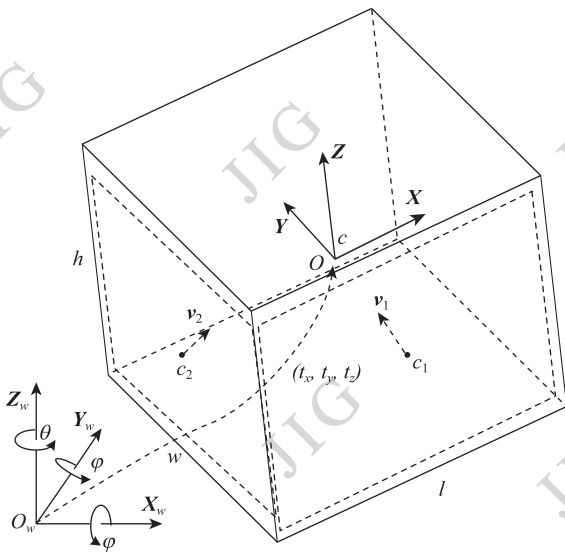


图 4 根据两个空间平面的参数确定目标坐标系

Fig. 4 The object coordinate system is created according to the parameters of the two planes

点云坐标系中的点 x_w 和目标坐标系中的点 x 可通过旋转 R 和平移 T 建立关系

$$x = R \cdot x_w + T \quad (10)$$

式中, R 为 3×3 正交矩阵, $T = [t_x, t_y, t_z]^T$ 。由以下关系可求出 3 个角元素 (θ, φ, ψ) , 即

$$R = \begin{bmatrix} c\theta c\varphi & s\theta c\varphi + c\theta s\varphi s\psi & s\theta s\varphi - c\theta s\varphi c\psi \\ -s\theta c\varphi & c\theta c\varphi - s\theta s\varphi s\psi & c\theta s\varphi + s\theta s\varphi c\psi \\ s\varphi & -c\varphi s\psi & c\varphi c\psi \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, s 代表 $\sin$, c 代表 $\cos$ 。最终得到长方体的位

姿参数 $\theta, \varphi, \psi, t_x, t_y$ 和 t_z 。

3 基于超二次曲面的目标参数优化

基于 RANSAC 算法的目标二次定位方法可以得到目标参数估计值和提取目标点云, 在该方法的基础上给出基于超二次曲面的目标位姿参数优化方法, 提高目标定位精度。

3.1 超二次曲面

超二次曲面是一类由基本二次曲面和实体扩展而来的参数曲面, 其表面上的数据点坐标为

$$x = \begin{bmatrix} a_1 \cdot \cos^{\varepsilon_1}(\eta) \cdot \cos^{\varepsilon_2}(\omega) \\ a_2 \cdot \cos^{\varepsilon_1}(\eta) \cdot \sin^{\varepsilon_2}(\omega) \\ a_3 \cdot \sin^{\varepsilon_2}(\eta) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$-\frac{\pi}{2} \leq \eta \leq \frac{\pi}{2},$$

$$-\pi \leq \omega < \pi$$

式中, ε_1 和 ε_2 为形状参数, a_1, a_2 和 a_3 表示超二次曲面沿 X 轴、 Y 轴和 Z 轴的尺寸参数, η 和 ω 分别表示纬度参数和经度参数。通过式 (12) 可以得到超二次曲面的标准方程为

$$F(x) = \left\{ \left[\left(\frac{x}{a_1} \right)^{\frac{2}{\varepsilon_2}} + \left(\frac{y}{a_2} \right)^{\frac{2}{\varepsilon_2}} \right]^{\frac{\varepsilon_1}{2}} + \left(\frac{z}{a_3} \right)^{\frac{2}{\varepsilon_1}} \right\} \quad (13)$$

当 $F(x) > 1$ 时, 表示点 x 在超二次曲面的外部; $F(x) < 1$ 时, x 在曲面内部; $F(x) = 1$ 时, x 在曲面上。

对超二次曲面进行全局变形可增强其几何表现能力, 仅考虑沿 Z 轴锥化。设 $x = [x, y, z]^T$ 为超二次曲面上一点, 锥化后该点的坐标为

$$x_t = \left[\left(\frac{k_x}{a_3} z + 1 \right) x, \left(\frac{k_y}{a_3} z + 1 \right) y, z \right]^T \quad (14)$$

式中, k_x 和 k_y 为锥化系数, 满足 $-1 \leq k_x, k_y \leq 1$ 。经过锥化后的超二次曲面经过刚体变换后可以表示空间任意位姿的球、圆柱、圆锥、矩形等, 变换后的坐标 x_w 与 x_t 满足式 (10)。

因此任意位姿的超二次曲面的标准方程为

$$F(x_w) = F(x_w; a_1, a_2, a_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \theta, \varphi, \psi, t_x, t_y, t_z, k_x, k_y) \quad (15)$$

超二次曲面可表示成

$$\Lambda = \{a_1, a_2, a_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \theta, \varphi, \psi, t_x, t_y, t_z, k_x, k_y\} \quad (16)$$

3.2 目标函数及参数优化

目标二次定位得到的目标参数经过简单转换可变为超二次曲面的尺寸参数和锥化系数, 如表1, 位姿参数则无需转换。将得到的模型参数及3维数据点代入式(13), 可建立目标的超二次曲面参数估计目标函数。假设超二次曲面 Λ 上有 N 个数据点 $x_{w,i}, i=1, \dots, N$, 那么模型应当满足

$$\min \sum_{i=1}^N [F(x_{w,i}; \Lambda) - 1]^2 \quad (17)$$

表1 目标参数与超二次曲面的尺寸参数和锥化系数

Table 1 Object parameters and the size parameters and tapering coefficients of superquadrics

目标类型	尺寸参数	锥化参数
球	$a_1 = a_2 = a_3 = r$	$k_x = k_y = 0$
圆柱	$a_1 = a_2 = r, a_3 = h/2$	$k_x = k_y = 0$
圆锥	$a_1 = a_2 = h \times \tan \omega / 2$ $a_3 = h/2$	$k_x = k_y =$ $a_3 \times \tan \omega / a_2$
长方体	$a_1 = l/2, a_2 = w/2, a_3 = h/2$	$k_x = k_y = 0$

结构光测量系统得到点云为单视点云, 该类型的点云无法提供目标完整的表面信息, 因此仅使用标准方程建立的目标函数不能形成足够多的约束, 导致优化后的模型参数不够精确。采用标准方程与尺度因子结合的形式^[17]建立目标函数, 即

$$R = \sqrt{a_1 a_2 a_3} (F(x_{w,i}; \Lambda) - 1) \quad (18)$$

该目标函数在满足 $\min \sum R^2$ 的情况下可使尺寸参数 a_1, a_2 和 a_3 最小。使用LM算法优化后的模型参数 Λ 即为目标尺寸和位姿参数。

4 实验验证

通过实际实验, 对提出的3维目标定位算法的有效性进行验证。实验中的图像和点云由结构光系统对水下场景测量得到, 实验装置由摄像机、激光器和振镜组成, 水下环境在实验水箱中模拟, 实验装置与场景如图5所示。结构光测量系统获取的灰度图像分辨率为 576×768 像素, 视场点云因受目标类型与视场复杂度影响, 其数据点的数量不固定。在实验中如非另行说明, 系统测量距离约为1.3 m, 点云偏差为 ± 1 mm, 椭圆检测时距离

偏差 β 和角度偏差 α 分别设为3 pixel和 6° , 椭圆的评价系数阈值 $\sigma_{\min}$ 设为0.4; 曲面检测时 β 和 α 分别设为3 mm和 6° , 曲面上数据点数的阈值 $N_{\min}$ 设为400个。

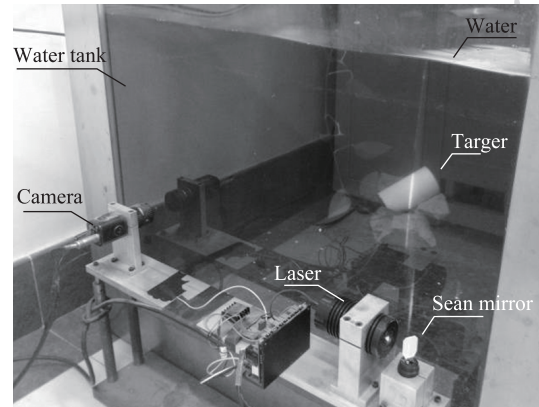


图5 结构光测量系统与水下实验场景

Fig. 5 Structured light 3D measurement system and underwater experiment scene

4.1 多目标定位实验

将瓷杯、球、保鲜盒及收纳盒等4个不同形状的人造目标置于水箱中, 利用结构光测量系统对其进行扫描后得到的图像和点云如图6所示, 其中视场点云中的数据点数为22 801个。场景中的各目标均可由单个超二次曲面表示, 已知球体半径为30.177 mm, 瓷杯杯体的半径和高约为40 mm和100 mm, 收纳盒的高约74 mm, 轴线母线夹角约 9° , 收纳盒的长、宽和高约为96 mm, 100 mm和76 mm。利用本文算法对视场中各目标依次进行目标粗定位、二次定位和参数优化, 最终得到目标的尺寸及位姿参数, 在整个运算过程中将目标尺寸视为未知, 已知的尺寸参数用作定位结果的比较。



图6 多目标视场的图像与点云

Fig. 6 The image and point cloud of multi-objective field

实现目标粗定位的前提是判断分割区域内是否存在指定的线特征信息。依次对分割区域内的图像边缘进行直线和椭圆线检测,为保持图像整洁性,仅在图 7 中显示检测到的椭圆线,其中检测到的瓷杯口沿、球的边缘、保鲜盒口沿及收纳盒上的图案形成的椭圆线评价系数依次为 0.66,0.56,0.59 和 0.57,椭圆线上的边缘点数依次为 132,109,158 和 97。根据检测到的椭圆线和直线可得到包含人造目标的 4 个分割区域,目标区域在图 7 中用矩形框表示。然后根据图像与点云的投影关系,可将目标区域对应的点云分离出来,从而实现目标的粗定位。

分别对投影到各目标区域中的局部点云进行圆柱面、球面、圆锥面和长方体检测,即二次定位,得到各目标参数的近似值并提取目标点云。然后将目标参数转换成超二次曲面参数并进行优化,最终得到的各目标的尺寸参数、形状参数和位姿参数如表 2

所示。利用优化后的目标参数生成超二次曲面,其在点云中的定位效果图如图 8 所示。由图 8 可知,经参数优化的超二次曲面能够正确与相应的目标点云融合。

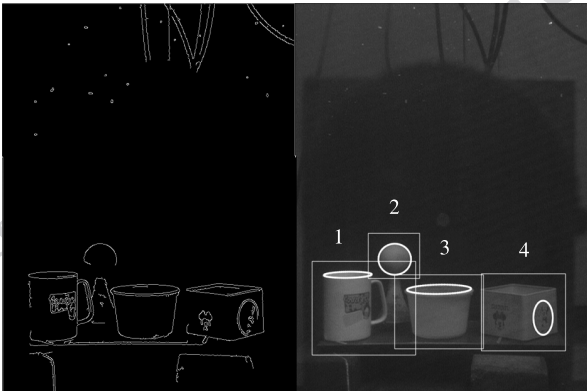


图 7 图像边缘及粗定位效果图

Fig. 7 Effect diagram of image edge and coarse localization

表 2 图 6 中各目标的尺寸参数、形状参数和位姿参数
Table 2 Size, shape and pose parameters of the objects in Fig. 6

目标	a_1/mm	a_2/mm	a_3/mm	ε_1	ε_2	k_x	k_y	θ/rad	φ/rad	ψ/rad	t_x/mm	t_y/mm	t_z/mm
瓷杯	40.21	40.21	49.41	0.1	1	0	0	-1.074	1.552	-0.421	508.1	1 185.0	-89.2
球	30.12	30.12	30.12	1	1	0	0	0.0	-0.0	0.0	1.05	-331.1	-1 297.0
保鲜盒	50.02	50.02	37.27	0.1	1	-0.117	-0.117	0.282	1.54	-1.581	580.1	1 101.9	-91.0
收纳盒	47.04	50.84	37.78	0.1	0.1	0	0	0.4	1.53	-1.1	1 006.4	683.5	-113.1



图 8 图 6 中各目标的定位效果图

Fig. 8 Localization effect diagram of the objects in Fig. 6

为使目标参数更为直观,将目标的形状参数按表 1 进行转换,位姿参数表示成中心坐标与旋转轴方向矢量的形式列于表 3 中,其中圆锥面参数 r 表示通过圆锥中心的截面半径。由于无法获知各目标的真实位姿参数,而考虑到各目标是被事先放置在水下的一块玻璃板上,瓷杯、保鲜盒和收纳盒的旋转轴应该是平行的,因此通过计算各

旋转轴间的角度来间接验证定位的正确性。根据表 3 中位姿参数计算得到的瓷杯与保鲜盒、瓷杯与收纳盒、保鲜盒与收纳盒各自旋转轴间夹角分别为 1.64° , 1.59° 和 1.08° , 夹角均小于 2° , 因此本文算法能够正确有效定位水下环境中不同曲面类型的人造目标。

4.2 定位精度验证实验

为验证本文算法的定位精度,对带有两个球体的目标进行水下扫描,测量得到的图像与点云效果图如图 9 所示。两个球体的半径及球心距离已事先由三坐标测量机精确测量,其中左球、右球半径分别为 30.183 mm 和 30.164 mm,两球间距离为 151.647 mm。利用本文算法对两个球体进行 50 次相互独立的定位实验,通过计算球心的位置偏差、球体半径和球心距离的均值、标准差、最大偏差来评价算法的定位精度。

表3 目标定位结果

Table 3 Results of localization

图像区域	曲面类型	数据点数	目标	尺寸参数			位姿参数	
				r/mm	$\omega/(\circ)$	h/mm	中心坐标	旋转轴方向
1	圆柱	2 636	瓷杯	40.21	—	98.82	(65.46, 416.89, 1 221.6)	(0.999, 0.008, 0.017)
2	球面	521	球	30.12	—	—	(-2.57, 330.02, 1 297.7)	(1.0, 0.0, 0.0)
3	圆锥	1 688	保鲜盒	50.02	8.89	74.54	(83.31, 265.48, 1 217.2)	(0.999, 0.03, -0.0)
4	长方体	3 265	收纳盒	l/mm	w/mm	h/mm	(86.84, 127.88, 1 212.6)	(0.999, 0.035, 0.018)
				94.08	101.8	75.56		

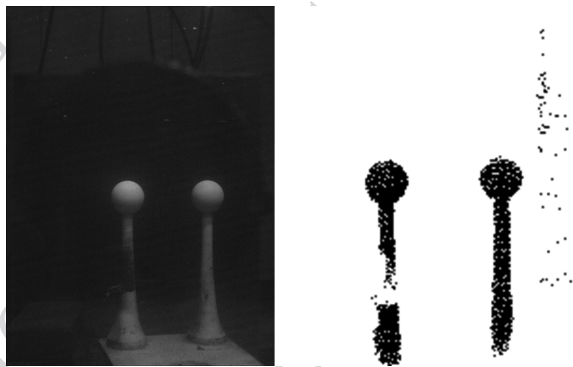
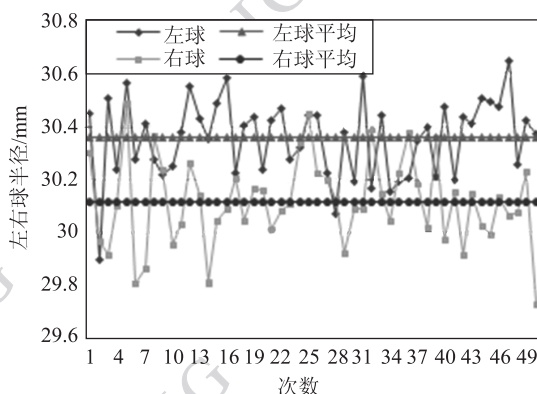


图9 目标图像及点云

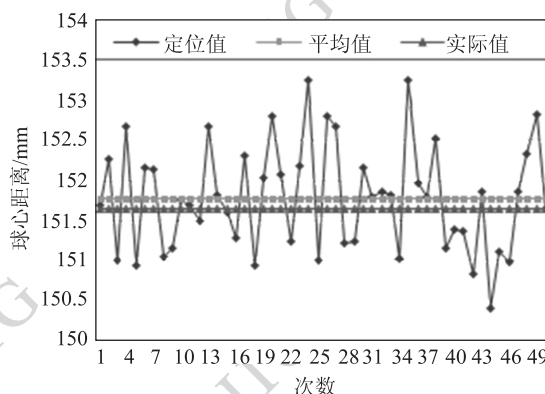
Fig. 9 Image and point cloud of object

以50次独立定位实验得到球心的3个坐标分量的均值为球心坐标的基准,求取50次定位得到的球心到该基准的距离作为位置偏差,其中左球心

位置的最大偏差为1.63 mm,右球心位置的最大偏差为1.70 mm,均不超过2 mm;实验得到左右球体半径及半径均值如图10(a)所示,其中左右球半径均值分别为30.356 mm和30.118 mm,分别与真实半径相差+0.173 mm和-0.064 mm,标准差为0.146 mm和0.164 mm,最大半径偏差分别为-0.46 mm和-0.38 mm,均保持在 ± 0.5 mm以内;50次定位实验得到球心距离、平均球心距离、真实球心距离如图10(b)所示,其中平均球心距离为151.785 mm,与真实球心距离相差+0.138 mm;球心距离的标准差为0.671 mm,最大偏差为+1.473 mm,即球心距离的相对误差最大不超过1%,根据以上实验结果可知本文算法定位精度高。



(a) 左右球的半径与平均半径



(b) 实验得到的球心距离、平均距离和实际距离

图10 左右球半径及球心距离的重复性定位实验结果

Fig. 10 Reproducibility localization experiment results of left sphere's and right sphere's radius and center distance

4.3 复杂水下环境中定位实验

为验证本文算法适用于水下复杂环境中人造目标定位,将多个石块及植物置于水中,使其对待定位目标形成不同程度的遮挡,并减少射入水箱的光线,

以模拟水下昏暗浑浊的复杂环境。图11是以瓷杯为定位目标的水下场景,通过图11可知石块对圆柱面造成部分遮挡,且植物茎部与圆柱面重叠,这些因素都为瓷杯的定位带来困难。



图 11 水下复杂视场的图像与点云
Fig. 11 Image and point cloud of underwater complex field

鉴于对瓷杯杯体的成像边缘与曲面类型的认知,指定算法的先验信息为:目标区域至少包含一条直线或一条椭圆线,且目标曲面类型为圆柱面。利用本文算法对瓷杯进行定位。由于植物颈部和杯身的重叠效果,瓷杯在图像被分割成两个区域(如图 12 所示),区域 1 包含一条直线,区域 2 包含一条椭圆线,两个区域都满足先验信息中对目标区域线特征的要求,因此目标区域包含图 12 中的两个分割区域。根据点云与图像的映射关系,逐个计算数据点在图像上的投影点,如果投影点位于两个分割区域中的任意一个区域的范围内,将该数据点视为局部数据点。遍历所有的数据点后,得到包含瓷杯杯体数据的局部点云。

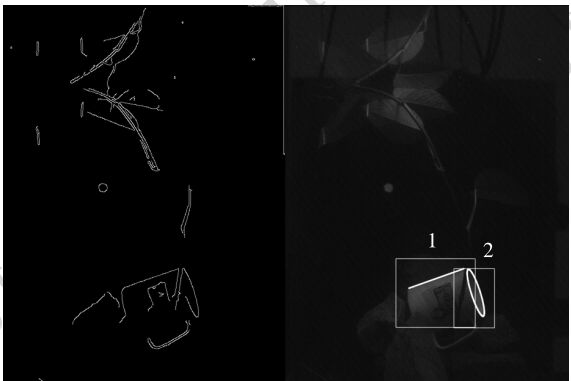


图 12 图像边缘与粗定位效果图
Fig. 12 Effect diagram of image edge and coarse localization

按照先验信息指定的曲面类型对局部点云进行圆柱面检测,并以超二次曲面为模型进行优化,最终得到的目标参数如表 4 所示,定位效果图如图 13 所示。由于瓷杯的真实位姿是未知的,在专业逆向工程软件 Imageware12.1 中对圆柱点云进行拟合,得

到圆柱半径为 39.58 mm,高度为 99.87 mm,底面中心为(89.27, 288.15, 1 139.7),而经本文算法定位后的圆柱半径为 39.98 mm,高度为 98.43 mm,底面中心位置为(89.53, 288.60, 1140.38),经比较圆柱半径差为 -0.4 mm,高度差为 -1.44 mm,底面中心距离为 0.843 mm,得到了理想的定位结果。定位过程中对算法的 3 个阶段进行计时,其中目标的粗定位耗时 4.43 s,目标的二次定位耗时 0.42 s,参数的非线性优化耗时 0.04 s,整个运算过程耗时 4.89 s,表明本文算法对于复杂环境中单目标的定位耗时不超过 5 s,满足机械手抓取对目标定位耗时的要求。以上实验结果表明,本文算法在水下复杂环境中同样能实现人造目标的定位,定位精度和耗时均满足应用要求,有较强的环境适应能力。

表 4 图 11 中圆柱的定位结果

Table 4 Localization results of the cylinder in Fig. 11						
a_1/mm	a_2/mm	a_3/mm	ε_1	ε_2	k_x	k_y
39.98	39.98	49.22	0.1	1	0	0
θ/rad	φ/rad	ψ/rad	t_x/mm	t_y/mm	t_z/mm	
0.267 7	0.290 3	-1.271 3	352.0	945.01	-563.0	



图 13 图 11 中圆柱定位效果图
Fig. 13 Localization effect diagram of the cylinder in Fig. 11

5 结 论

针对水下人造目标的位姿估计问题,提出基于图像线特征和点云面特征的 3 维目标定位算法。算法以目标成像后的边缘特征及其本身的曲面特征为依据,依次对图像和点云进行目标检测:1)提出基

于RANSAC算法的椭圆边缘线检测方法,结合直线检测算法对图像的分割区域进行目标检测,可实现目标的粗定位;2)采用基于RANSAC算法的曲面检测方法对局部点云进行曲面检测,可得到曲面尺寸参数和位姿参数的近似值及点云中的目标数据点;3)利用曲面尺寸参数和位姿参数的近似值建立目标的超二次曲面参数估计目标函数,将曲面的尺寸参数和位姿参数进行全局优化,最终实现水下目标的位姿估计。实验结果表明,本文算法适用于以超二次曲面为部件的人造目标,能够有效估计未知尺寸目标的位姿参数,定位精度高,且对水下复杂环境有较强的适应性。由于本文算法适用的目标类型较为有限,下一阶段将扩展算法以能够实现更多轴对称结构曲面及复杂类型曲面的水下目标自主定位,并进一步提高算法的速度、精度及稳定性。

参考文献 (References)

- [1] Prats M, Ribas D, Palomeras N, et al. Reconfigurable AUV for intervention missions: a case study on underwater object recovery [J]. *Intelligent Service Robotics*, 2012, 5(1):19-31. [DOI: 10.1007/s11370-011-0101-z]
- [2] Prats M, Juan C, Garcia J, et al. Towards specification, planning and sensor-based control of autonomous underwater intervention [C]//proceedings of Preprints of the 18th IFAC World Congress. Milano, Italy: Catholic University of the Sacred Heart, 2011: 10361-10366. [DOI: 10.3182/20110828-6-IT-1002.02456]
- [3] Sanz P J, Ridao P, Oliver G, et al. TRIDENT: a framework for autonomous underwater intervention mission with dexterous manipulation capabilities [C]//The 7th Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles. Lecce, Italy: University of Salento, 2010: 187-192. [DOI: 10.3182/20100906-3-IT-2019.00034]
- [4] Prats M, Fernandez J J, Sanz P J. An approach for semi-autonomous recovery of unknown objects in underwater environments [C]//Proceedings of the 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. Brasov: IEEE, 2012:1452-1457. [DOI: 10.1109/OPTIM.2012.6231874]
- [5] Xie Z X, Liu P. Underwater 3D structured light system based on refraction compensation [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2012, 23(4):745-750. [解则晓,刘鹏. 基于折射补偿的水下结构光三维测量系统[J]. 光电子激光,2012,23(4):745-750.]
- [6] Xie Z X, Li X Y, Xin S H. Underwater line structured-light self-scan three-dimension measuring technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(8): 2010-2014. [解则晓,李绪勇,辛少辉. 水下线结构光自扫描三维测量技术[J]. 中国激光,2010,37(8):2010-2014.] [DOI: 10.3788/CJL20103708.2010]
- [7] Huebner K, Ruthotto S, Kragic D. Minimum volume bounding box decomposition for shape approximation in robot grasping [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, CA: IEEE, 2008: 1628-1633. [DOI:10.1109/ROBOT.2008.4543434]
- [8] Huebner K, Kragic D. Selection of robot pre-grasps using box-based shape approximation [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nice, France: IEEE, 2008: 1765-1770. [DOI: 10.1109/IROS.2008.4650722]
- [9] Rusu R B, Bradski G, Thibaux R, et al. Fast 3D recognition and pose using the Viewpoint Feature Histogram [C]//Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei: IEEE, 2010:2155-2162. [DOI: 10.1109/IROS.2010.5651280]
- [10] Wang L, Cao J F, Han C Z. Superquadrics Model-based 3D object localization algorithm [J]. *Robot*, 2013, 35(4): 439-448. [汪霖,曹建福,韩崇昭. 基于超二次曲面模型的3维目标定位算法[J]. 机器人, 2013, 35(4): 439-448] [DOI: 10.3724/SP.J.1218.2013.00439]
- [11] Biegelbauer G, Vincze M, Wohlkinger W. Model-based 3D object detection: Efficient approach using superquadric [J]. *Machine Vision and Applications*, 2010,21: 497-516. [DOI: 10.1007/s00138-008-0178-3]
- [12] Schnabel R, Wahl R, Klein R. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection [J]. *Computer Graphics Forum*, 2007, 26(2): 214-226. [10.1111/j.1467-8659.2007.01016.x]
- [13] Alan H B. Superquadrics and angle preserving transformations [J]. *Computer Graphics Applications*, 1981, 18: 21-30. [DOI: 10.1109/MCG.1981.1673799]
- [14] Moré J J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory [M]//Numerical Analysis. Berlin Heidelberg: Springer, 1978: 105-116. [DOI: 10.1007/BFb0067700]
- [15] Xie Z X, Gao X, Cui J. Extraction algorithm of circular targets used for mobile three-dimensional measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(12): 166-171. [解则晓,高翔,崔健. 移动式三维测量用圆形标记点提取算法[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 166-171.] [DOI: 10.3788/CJL201340.1208002]
- [16] Liu Y, Zhu Z Y, Shi S J. Novel strategy for spatial k-NN query [J]. *Journal of Shanghai JiaoTong University*, 2001, 35[9]: 1298-1302. [刘宇,朱仲英,施颂椒. 空间k近邻查询的新策略[J]. 上海交通大学学报,2001,35(9): 1298-1302.] [DOI: 10.3321/j.issn:1006-2467.2001.09.007]
- [17] Solina F, Bajcsy R. Recovery of parametric models from range images: the case for superquadrics with global deformations [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(2):131-147. [DOI: 10.1109/34.44401]