

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **2**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年2月 第17卷 第2期(总第190期)

目次

综述

内容感知图像缩放技术综述 施美玲,徐丹(157)

图像处理和编码

引入纹理相似性的纺织品图像增强 杨学志,田晓梅,方静,卢洁(169)

保持边缘特征和增强对比度的图像缩放算法 计忠平,方美娥,王毅刚,吴向阳(178)

以图像认证为目的的分形编码数字水印算法 黄晓晴,于盛林(183)

结合运动矢量和像素递归的全局运动估计方法 赵亚湘,刘少强,樊晓平(191)

无缝栅格数据小波金字塔构建 马伯宁,冷志光,汤晓安,匡纲要(197)

图像分析和识别

伪彩色空间完全非结构化道路检测方法 胡晓辉,孙苗强,苏晓许(203)

未知环境下机器人障碍物检测技术 王文格,武凯宾,朱江,段文彬,许重阳(209)

局部 GAC 模型在医学图像分割中的应用 张建伟,方林,陈允杰,詹天明,罗春燕(215)

判别割(Dcut)的图像分割及其快速分割算法 邹小林,陈伟福,冯国灿(222)

改进的遮挡条件下瞳孔检测方法 潘林,魏丽芳,郑炳锜,余轮(229)

木材显微图像的局部水平集分割方法 汪杭军,祁亨年(236)

关键点检测的线要素综合算法 黄志坚,张金芳,徐帆江(241)

GPU 加速的高分辨率 DEM 图像地形特征线提取算法 刘洲俊,胡包钢(249)

改进 GVF 的自动 Snakes 模型 周亚男,程熙,骆剑承,沈占锋,胡晓东(256)

曲波变换用于磨粒图像不变矩的提取 张云强,张培林,任国全,王国德,徐超,李兵(263)

图像理解和计算机视觉

深度图像中基于轮廓曲线和局部区域特征的3维物体识别 吴莉婷,张宇,杨一平,田原(269)

机载 LiDAR 数据的 LZD 航带平差 王丽英,宋伟东(279)

计算机图形学

基于 Z 曲线的瓦片地图服务空间索引 聂云峰,周文生,舒坚,许虎(286)

虚拟现实和增强现实

GPU 加速的台风可视化方法 秦绪佳,张勤锋,陈坚,郑红波,徐晓刚(293)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健 月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 2 期

2012 年 2 月 16 日出版

主管单位 中国科学院
主 办 中国科学院遥感应用研究所
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

北京 9718 信箱 邮编 100101

电子信箱: jig@irsa.ac.cn

电话: 010-68407995 010-82614429

网 址: www.cjig.cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司

(中国国际书店)

(北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
CAS China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational
Mathematics
Chief editor LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
of Journal of Image and Graphics
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
E-mail: jig@irsa.ac.cn
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
Printed by Beijing Beilin Printing House

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 2 February 2012

Contents

Review

Survey on content-aware image resizing techniques Shi Meiling, Xu Dan (157)

Image Processing and Coding

Enhancement of textile image with texture similarity Yang Xuezhi, Tian Xiaomei, Fang Jing, Lu Jie (169)

Edge-preserving and contrast-enhancement image scaling Ji Zhongping, Fang Mei'e, Wang Yigang, Wu Xiangyang (178)

Watermarking method on fractal coding for image authentication Huang Xiaoqing, Yu Shenglin (183)

Global motion estimation method with motion vectors and pixel recursion Zhao Yaxiang, Liu Shaoqiang, Fan Xiaoping (191)

Seamless wavelet pyramid construction for raster data Ma Boning, Leng Zhiguang, Tang Xiao'an, Kuang Gangyao (197)

Image Analysis and Recognition

Completely unstructured road detection for pseudo-color space Hu Xiaohui, Sun Miaoqiang, Su Xiaoxu (203)

Obstacle detection for robot in unknown environment
..... Wang Wenge, Wu Kaibin, Zhu Jiang, Duan Wenbin, Xu Chongyang (209)

Application of local GAC model for medical image segmentation
..... Zhang Jianwei, Fang Lin, Chen Yunjie, Zhan Tianming, Luo Chunyan (215)

Fast image segmentations of Deut Zou Xiaolin, Chen Weifu, Feng Guocan (222)

Improved method for the pupil measurement under occlusion Pan Lin, Wei Lifang, Zheng Bingkun, Yu Lun (229)

Segmentation method of wood microscopic image based on local level set Wang Hangjun, Qi Hengnian (236)

Algorithm of line generalization with key point detection Huang Zhijian, Zhang Jinfang, Xu Fanjiang (241)

High resolution DEM topographic feature line extraction algorithm using GPU Liu Zhoujun, Hu Baogang (249)

Automatic snakes model based on modified GVF Zhou Yanan, Cheng Xi, Luo Jiancheng, Shen Zhanfeng, Hu Xiaodong (256)

Invariant moment extraction by curvelet transform for wear particle images
..... Zhang Yunqiang, Zhang Peilin, Ren Guoquan, Wang Guode, Xu Chao, Li Bing (263)

Image Understanding and Computer Vision

Three-dimensional free-form object recognition based on contour curve and local surface patches in range images
..... Wu Liting, Zhang Yu, Yang Yiping, Tian Yuan (269)

Least Z-difference strip adjustment of airborne LiDAR data Wang Liying, Song Weidong (279)

Computer Graphics

Spatial index for tile map service based on Z curve Nie Yunfeng, Zhou Wensheng, Shu Jian, Xu Hu (286)

Virtual Reality and Augmented Reality

GPU accelerated typhoon visualization method Qin Xujia, Zhang Qinfeng, Chen Jian, Zheng Hongbo, Xu Xiaogang (293)

中图法分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)02-0209-06

论文引用格式: 王文格, 武凯宾, 朱江, 段文彬, 许重阳. 未知环境下机器人障碍物检测技术 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(2): 209-214

未知环境下机器人障碍物检测技术

王文格¹, 武凯宾¹, 朱江², 段文彬¹, 许重阳¹

1. 湖南大学机械与运载工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082

摘要: 未知环境下地面的不平坦性和机器人相对障碍物位姿的不确定性会造成障碍物特征提取困难, 为了准确检测障碍物特征, 采用3维相机获取机器人周围环境的灰度图像和距离信息。在此基础上, 提出基于灰度信息和3维信息的“阈值法”进行障碍物区域的提取, 并针对3维信息“阈值法”剔除的地面与障碍物过渡区域过多, 以及机器人相对斜坡方位的不确定性引起的障碍物特征检测不准确, 提出区域的恢复算法和表面法线坡度计算。实验结果表明, 所提出的算法具有简单、有效、准确和鲁棒性强的优点。

关键词: 机器人; 3维相机; 环境感知; 障碍物

Obstacle detection for robot in unknown environment

Wang Wenge¹, Wu Kaibin¹, Zhu Jiang², Duan Wenbin¹, Xu Chongyang¹

1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Electric and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract: Because of the unevenness of terrain and the uncertainty of the position and orientation of a mobile robot, it is difficult to get the obstacle characteristics in unknown environments. In order to detect the obstacle characteristics accurately, a 3D camera is used to obtain a gray image and the depth information of the environment. Then a threshold method based on the obtained gray image and the 3D information is presented to determine the area of an obstacle. But inaccurate feature detections will still exist in the above 3D information threshold method, caused by different factors, for example, too much transition regions between the ground and the obstacle are eliminated or the relative position between the robot and the slope is uncertain. In order to solve these problems, a region recovery algorithm and a computation method of slope degree estimation are developed. Experimental results show that our algorithm has the merits of simplicity, effectiveness, accuracy and high robustness.

Keywords: robot; 3D-camera; environment perception; obstacle

0 引言

移动机器人未知环境下的障碍物检测是其周边环境感知技术研究领域中的重要组成部分, 也一直是近年来研究的重点。不少工作者对结构化环境下的障碍物检测进行了认真研究, 提出基于不同传感

器的障碍物检测方法, 如双目 CCD 计算机视觉方法^[1]、基于激光雷达的方法^[2]、基于光流的方法等^[3]。未知环境与结构化、半结构化环境有很大不同: 1) 未知环境下的障碍物种类多(主要包括坡、石块、沟), 结构特征复杂; 2) 地面不平坦, 起伏性较大; 3) 光照条件复杂, 某些障碍物与周围环境色彩相近。在未知环境中, 双目 CCD 视觉方法会面临对

收稿日期: 2011-04-02; 修回日期: 2011-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51075137)

第一作者简介: 王文格(1966—), 男, 教授, 2003年于湖南大学获机械工程专业博士学位, 主要研究方向为图像视觉检测和机电控制。E-mail: wangwg@hnu.edu.cn

应点匹配算法复杂、精度低等问题;激光雷达方法可获得被测物体 3 维信息,但其面扫描速度慢、能耗较高,难以适用;基于光流的方法无法提供目标的 3 维信息,而且当机器人与环境处于相对静止状态时会失效^[4-5]。

近年发展起来的 3 维成像设备,如 SR2、SR-3000^[6-9]能够获得场景的灰度图像及每个像素点对应空间点的距离信息,实时性好、功耗低,信息完整,在颜色单一、光照条件复杂的环境中也能够获得良好效果。有研究人员将其用于室内结构或半结构环境下的障碍物检测,通过计算出地平面的方程然后再计算特征点到该平面的距离来判断是否为障碍物点^[10]。这种方法不适用于地面具有明显起伏的未知环境,比如当机器人在坡面上行驶时,只要整个斜坡的坡度小于机器人的攀爬能力是可以通行的,不能简单的通过高度判断为不可通行区域。

本文采用 3 维相机 SR-3000,辅以 Xsens 公司 MTi 惯性测量系统(AHRS),用于机器人未知环境下的障碍物检测,目的是解决复杂环境下地面不平坦性和机器人相对障碍物位姿不确定性引起的障碍物特征检测困难问题。提出结合 3 维相机灰度图像和 3 维信息(标定后由距离信息可获得 3 维信息)的障碍物检测算法,首先采用 3 维信息“阈值法”^[11]提取障碍物区域,再对其进行二次分析提取障碍物个体。用表面法线方法计算较大障碍物坡度,对沟类负高度障碍物用 Canny 算子检测边缘并计算宽度,使机器人能够正确判断是否可以跨越障碍。

1 障碍物区域提取

借鉴人类行走时的思维,将相机获得的未知环境下场景图像划分为天空(理解为移动机器人无法达到的高度)、远景(理解为超出视线范围)、地面和障碍物区域。采用 3 维信息“阈值法”剔除不感兴趣的区域以突出障碍物区域,然后利用区域恢复算法还原过多剔除部分,再对障碍物个体进行初步归类,从而完成障碍物区域的提取。

1.1 3 维信息“阈值法”原理

3 维信息“阈值法”,存在两点不足:1)只考虑了正障碍物(斜坡和石块),没有考虑负障碍物(沟);2)阈值 H_D (去地面阈值)固定,过多的去掉了灰度图像中属于障碍物区域的像素点。这里将传统 3 维信息“阈值法”称为“阈值法 1”,当灰度图像中

负高度像素数目高于正常统计数目 N_T 时,认为存在负障碍物,采用如下算法提取负障碍物区域:

1)将高度值大于零的对应像素点灰度值赋零(去地面以上区域),即

$$\text{If } y_{i,j} > 0, \text{ then } I_{i,j} = 0 \quad (1)$$

2)如果像素深度值大于阈值 D_A ,对应像素点灰度值赋零(去远景),即

$$\text{If } z_{i,j} > D_A, \text{ then } I_{i,j} = 0 \quad (2)$$

称上述补充算法为“阈值法 2”。

1.2 障碍物区域恢复算法

“阈值法 1”会将图像中障碍物区域高度值较小部分去除(若 $y_{i,j} \leq H_D$, 则 $I_{i,j} = 0$),为准确提取障碍物特征,需要恢复这些区域。SR-3000 相机标定采用针孔相机模型。

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

相机坐标系与机器人坐标系是上下平移关系,为简化,将相机坐标系作为机器人坐标系,但因地面的不平坦性,相机坐标系(机器人坐标系)相对水平地面有俯仰和横滚角度^[12],需要进行坐标系变换。坐标系变换的效果相当于使相机坐标系的 $X-Z$ 平面(与高度方向垂直的平面)与水平地面平行,此时相机坐标系中障碍物的 3 维坐标与不存在地面俯仰情况时相机坐标系中的 3 维坐标是等效的。

在理想情况下(假设障碍物表面为平面且与水平地面垂直),坐标变换后以像素为单位的图像坐标系上像素点 $m_{i,j}$ 坐标为 (i, j) ,对应障碍物上某点(某区域)在相机坐标系中的 3 维坐标为 $(x_{i,j}^c, y_{i,j}^c, z_{i,j}^c)$ 。其相邻行同列像素点 $m_{i,j+1}$ 若也为障碍物上的点,则 $z_{i,j+1}^c = z_{i,j}^c$,由式(3)可计算得

$$y_{i,j}^c = \frac{(j - v_0)z_{i,j}^c}{\alpha_v}, \quad y_{i,j+1}^c = \frac{(j + 1 - v_0)z_{i,j}^c}{\alpha_v} \quad (4)$$

式中, α_v, v_0 为相机的内部参数,标定后可获得, $z_{i,j}^c$ 为相机灰度图像上第 i 行,第 j 列像素的深度数值,那么像素点 $m_{i,j}$ 与相邻行同列像素点 $m_{i,j+1}$ 的理想高度差为

$$\Delta y = y_{i,j}^c - y_{i,j+1}^c = \frac{z_{i,j}^c}{\alpha_v} \quad (5)$$

实际情况下具有的高度差为

$$\Delta y_1 = |y_{i,j}^c - y_{i,j+1}^c| \quad (6)$$

所以,当 $\frac{\Delta y_1}{\Delta y} \geq A_T$ (A_T 为设定阈值) 时认为该像素点

为障碍物区域成像点;若 $\frac{\Delta y_1}{\Delta y} < A_T$, 则认为像素点

$m_{i,j+1}$ 属于地面区域成像点, 算法过程如下:

1) 扫描灰度图像障碍物区域, 标记每个区域, 并记录每个区域的最高点、最左点与最右点坐标。

2) 从障碍物区域最左点像素位置 (i, j) ($I_{i,j} = 255$) 所在列开始, 判断同列下一行像素点 $(i, j+1)$ 是否隶属于障碍物且 $y_{i,j+1} > 0$, 都满足, 则 $I_{i,j+1} = 255$ 。再根据像素点 $(i, j+1)$ 判断下一个像素点 $(i, j+2)$, 直到不满足条件为止。

3) 当前列判断结束后, 判断障碍物区域的下一列, 直到障碍物区域最右像素点所在列。

4) 算法结束。

1.3 障碍物初步归类

完成障碍物区域提取后, 通过聚类方法获得独立的障碍物个体, 借助灰度图像像素点与3维环境之间建立的一一对应关系, 以欧氏距离相似准则, 对图像中障碍物区域当前相邻两点距离进行比较, 如果距离在一定范围内, 则认为两点属于同一障碍物。欧氏距离计算公式为

$$l = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (7)$$

式中, (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) 为像素点3维坐标。

沟类负障碍物高度比水平面低, 而石块和斜坡高度都要高于水平面, 这里考虑面积深度比 A/d 计算障碍物个体大小^[11], 区分斜坡和石块。若面积深度比 A/d 大于阈值 S_T , 则认为该障碍物个体为斜坡, 需要计算区域坡度判断机器人是否可以攀爬, 小于阈值则认为属于石头类。

$$A/d = M/d_k = \sum_c \sum_a T(i, j) / d_k(i_k, j_k) \quad (8)$$

像素 (i, j) 属于障碍物区域时 $T(i, j) = 1$; 当像素 (i, j) 不属于障碍物区域时 $T(i, j) = 0$ 。式中 M 为障碍物个体像素总数, d_k 为障碍物坐标中心像素深度值。 a, b, c, d 依次为障碍物个体最低点、最高点、最左点、最右点像素坐标。

2 表面法线坡度计算

传统坡度指地形图中某点高程值在某个方向的变化率^[13], 这里指区域坡度、斜坡与水平地面之间

的夹角。通常障碍物区域坡度计算多采用先计算每一个像素点的坡度然后求和, 再求平均值的平均坡度法^[14-15]。此方法虽然简单, 但由于机器人相对障碍物的方位不确定性会造成坡度计算偏小。如图1所示, 相机正对斜坡时, 假设 AB 线段区域在相机上成像是同列的3个像素, 在相机旋转 φ 角斜对斜坡时, 相机上同列的3个像素是线段 AC 区域。显然相机正对时求得的坡度 α 和斜对时求得的坡度 β 是两个不同的角度, 由几何知识可得

$$\cos \varphi = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \quad (\alpha, \beta \in 0 \sim \pi/2) \quad (9)$$

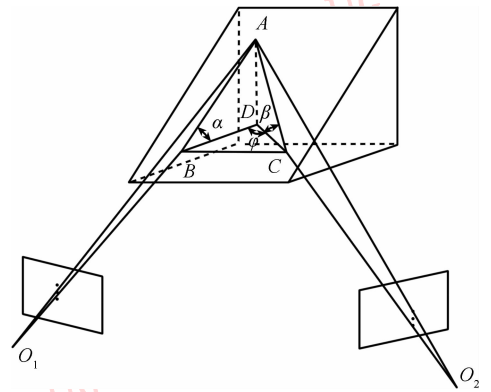


图1 斜坡成像
Fig.1 Slope imaging

由于 $\cos \varphi \leq 1$, $\sin \beta \leq \sin \alpha$, 所以 $\beta \leq \alpha$ 。测量坡度比实际坡度值要小, 会把一些与水平面夹角大于阈值 $slop_T$ 的不可攀爬斜坡误认为可攀爬, 机器人存在潜在危险。

这里用表面法线方法计算坡度, 即假想障碍物区域为一平面, 计算此平面法线与水平地面法线夹角作为斜坡的坡度。设在姿态变换后的机器人坐标系下, 障碍物成像部分拟合平面方程为

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (10)$$

将上式两边除以 D 令

$$A/D = A', \quad B/D = B', \quad C/D = C' \quad (11)$$

则式(11)可以写为

$$A'x + B'y + C'z + 1 = 0 \quad (12)$$

相同标记的障碍物个体区域假设有 n 个点, 要拟合的平面可以表示为以下形式

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A' \\ B' \\ C' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

所以得到

$$\begin{bmatrix} A' \\ B' \\ C' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i z_i & \sum_{i=1}^n y_i z_i & \sum_{i=1}^n z_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^n x_i \\ -\sum_{i=1}^n y_i \\ -\sum_{i=1}^n z_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

即可求得法线向量 $\mathbf{m} = (A, B, C)$, 平面法线与水平地面单位法线向量 $\mathbf{b} = (0, 0, 1)$ 的夹角为

$$\alpha = \arccos \frac{\mathbf{m} \cdot \mathbf{b}}{|\mathbf{m}|} \quad (15)$$

为检验算法的正确性, 排除其他不确定性因素的干扰, 在室内环境人为搭建斜坡场景, 如图 2 所示, 绿色线框内为计算时选用的像素点。当机器人从右侧、左侧(相机左倾、右倾)不同角度侧视斜坡时, 利用表面法线计算坡度, 并与平均坡度法进行比较, 结果如表 1 所示。

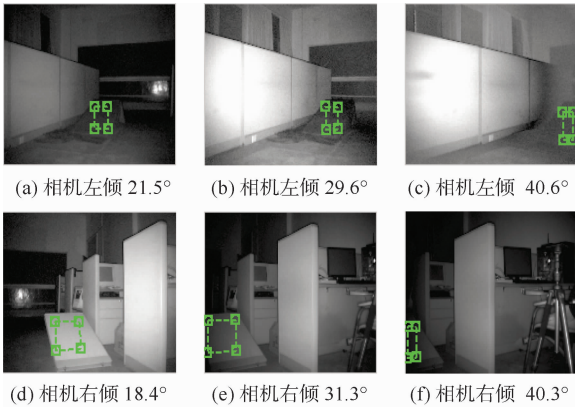


图 2 坡度计算实验

Fig. 2 Slope computation experiment

表 1 坡度计算结果

Table 1 Slope computation results

相机与斜坡方位	平均坡度法	表面法线法	实际坡度
相机左倾 21.5°	21.2°	22.4°	22.9°
相机左倾 29.6°	19.8°	22.1°	22.9°
相机左倾 40.6°	16.4°	23.1°	22.9°
相机右倾 18.4°	31.4°	32.2°	33.4°
相机右倾 31.3°	28.5°	32.8°	33.4°
相机右倾 40.3°	25.1°	31.9°	33.4°

由表 1 实验结果可知, 像素平均坡度法计算区域坡度会因相机左倾或者右倾的角度变化产

生不同程度的计算偏差。当相机倾角逐渐增大时, 计算值与实际值的偏差呈增大趋势, 而采用表面法线方法并不会受此干扰, 可见本文的坡度计算方法可以消除机器人相对斜坡方位的不确定性带来的影响。

3 沟宽度计算

机器人可跨越宽度小于 W_T 的壕沟, 计算沟的实际宽度是判断规避或跨越的前提。图 3 为理想沟与机器人的几何位置关系, 机器人首先扫描出灰度图像中沟的最左像素点 N 和最右像素点 M 。线段 AB 长度为图像上测得的沟的最大宽度 (A, B 为图像上沟边缘的同列像素点), 而线段 AC 长度才是沟的真实最大宽度 W_{ditch} , 由几何知识可得

$$W_{ditch} = \frac{AC}{\sin \theta} = \frac{|z_A - z_B| \times |x_M - x_N|}{\sqrt{(z_M - z_N)^2 + (x_M - x_N)^2}} \quad (16)$$

式中, z_A, z_B 为 A, B 像素点的深度值, (x_M, y_M, z_M) 、 (x_N, y_N, z_N) 为沟最右、最左像素点 M, N 的 3 维坐标。

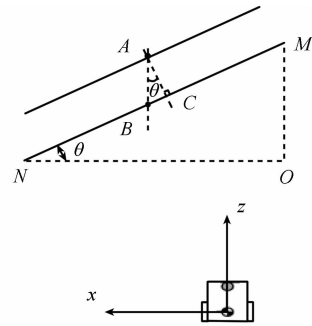


图 3 沟与机器人几何位置关系

Fig. 3 The geometrical relations between robot and ditch

4 实验结果

相机 SR-3000 功耗仅为 1 W, 视场范围 $47.5^\circ \times 39.6^\circ$, 在最大有效测量距离 7.5 m 处成像面积 6.5 m(宽) \times 5 m(高), 成像精度 12.8 cm², 精度适中。MTi 惯性测量系统用于获取机器人相对水平地面的俯仰和横滚角度。以某巡视机器人作为实验平台, 在 VC++ 环境下实现本文算法, 算法流程如图 4 所示, 几个参数的取值如下: H_A (去天空阈值) = 4 m, H_D (去地面阈值) = 5 ~ 10 cm, D_A (去远景阈值) = 5 m, $A_T = 0.2 \sim 0.6$ 。

表 2 斜坡特征提取结果

Table 2 Results of slope features detection

斜坡特征	去地面后计算值	区域恢复后计算值	实际值
斜坡距离/m	3.09	3.21	3.30
斜坡高度/cm	71	79	83
斜坡坡度/(°)	31	32	30

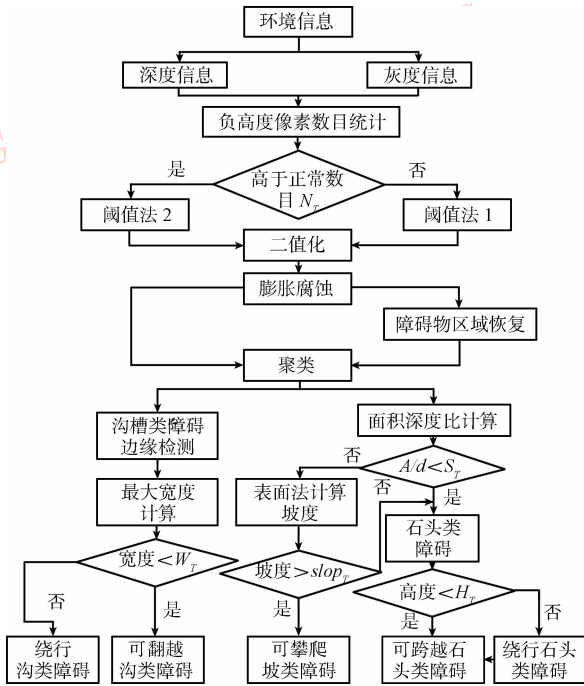


图 4 算法流程图

Fig. 4 Algorithm flow chart

场景 1 如图 5(a) 所示,沙地与斜坡灰度相近,传统图像处理方法难以实现目标、地面及远景准确区分。采用“阈值法 1”,去除天空、远景、地面如图 5(b) 所示,斜坡后部区域在 5 m 以内,所以没有去掉。二值化图 5(b) 后对离散分布的孤立点、噪声点,采用腐蚀与膨胀消除,结果如图 5(d) 所示;再利用区域恢复算法还原去地面时误被剔除的斜坡底部区域,产生的离散点用腐蚀与膨胀消除,结果如图 5(e) 所示;最后用表面法线方法计算坡度,斜坡相关特征见表 2。

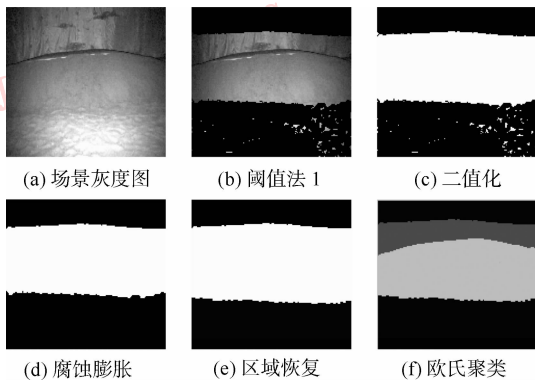


图 5 斜坡场景障碍物提取过程

Fig. 5 Detecting process for slope obstacle

场景 2 如图 6(a) 所示沟场景,采用“阈值法 2”去除天空、远景、地面以上区域如图 6(b)(c) 所示。图 6(d)(e) 为二值化、聚类后结果,用 Canny 算子提取图 6(e) 沟的边缘,并用式 (16) 计算其最大宽度。沟相关特征见表 3,其中沟距离为沟到机器人最近距离。

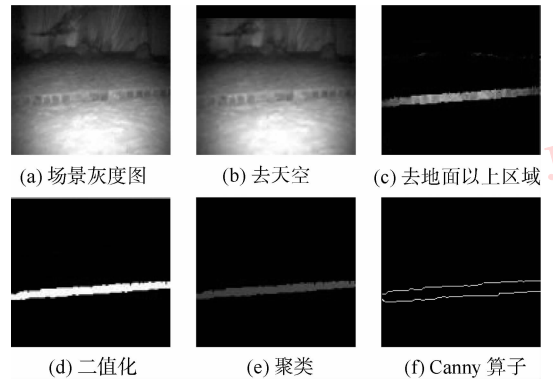


图 6 沟场景障碍物提取过程

Fig. 6 Detecting process for ditch obstacle

表 3 沟特征提取结果

Table 3 Results of ditch features detection

	沟深/cm	沟宽/cm	沟距离/m
计算值	12.5	34	2.25
实际值	18	35	2.31

场景 3 如图 7 所示石块场景,若去地面阈值 H_D 比较小 ($H_D = 5$ cm),则由于地面的起伏性,一些突起点或区域会误判为障碍物区域如图 7(b) 所示。采用比较大的去地面阈值 ($H_D = 10$ cm) 如图 7(c) 所示,障碍物底部部分区域也被去除掉。为准确计算石块高度和最大宽度,利用区域恢复算法进行还原,还原过程中有少许干扰点,用腐蚀膨胀方法消除结果如图 7(e) 所示,最后进行聚类如图 7(f) 所示,相关特征属性见表 4。

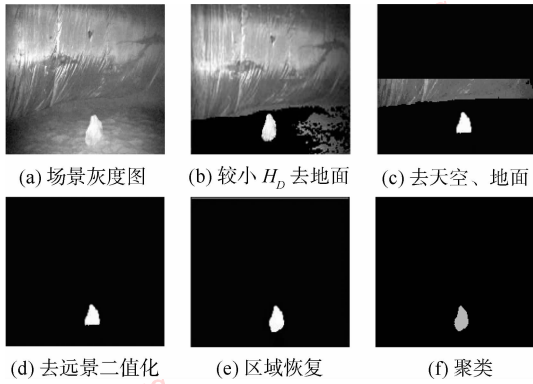


图 7 石头场景障碍物提取过程

Fig. 7 Detecting process for stone obstacle

表 4 石头特征提取结果

Table 4 Results of stone features detection

石头特征	去地面后计算值	区域恢复后计算值	实际值
高度/cm	27	36	37
宽度/cm	28	29	30
距离/m	2.75	2.77	2.80

5 结论

未知环境的随机性、复杂性会造成移动机器人障碍物检测的不准确,采用 3 维相机 SR-3000,基于灰度图像和 3 维信息,利用 3 维信息“阈值法”;根据高度和距离信息逆向寻找障碍物区域,并针对 3 维信息“阈值法”较多的剔除障碍物底部区域,提出区域恢复算法,针对机器人相对斜坡障碍物方位不确定性引起的坡度计算不准确,提出表面法线坡度计算。实验结果表明,算法具有较好的鲁棒性,在不调整机器人姿态情况下能够较准确地计算障碍物特征属性,对提高移动机器人自主导航能力具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] Novak G, Bais A, Mählknecht S. Simple stereo vision system for real-time object recognition for an autonomous mobile robot [EB/OL]. (2004-12-06) [2011-05-20]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1437710.
- [2] Cai Z X, Xiao Z, Yu J X. Real-time detection of dynamic obstacles based on laser radar [J]. Control Engineering of China, 2008, 15(2): 200-203. [蔡自兴,肖正,于今霞.基于激光雷达的动态障碍物检测实时检测[J].控制工程,2008,15(2):200-203.]
- [3] Yang W J, Hu M H, Yang J Y. An optical flow-based obstacle estimation algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(5): 80-82. [杨文杰,胡明昊,杨静宇.一种基于光流的障碍物估计算法[J].计算机工程与应用,2006,42(5):80-82.]
- [4] Wang R B, Zhao Y B, Li L H, et al. Approach review of obstacle detection for intelligent vehicle [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(11): 109-114. [王荣本,赵一兵,李琳辉,等.智能车辆的障碍物检测研究方法综述[J].公路交通科技,2007,24(11):109-114.]
- [5] Olson C F, Matthies L H, Schoppers M, et al. Rover navigation using stereo ego-motion [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2003, 43(4): 215-219.
- [6] Lange R, Seitz P. Solid-state time-of-flight range camera [J]. IEEE Journal of Quantum Electron, 2001, 37(3): 390-397.
- [7] Hussmann S, Liepert T. 3D-TOF robot vision system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(1): 141-146.
- [8] Hussmann S, Schauer D, MacDonald B. Integration of a 3D-TOF camera into an autonomous mobile robot system [EB/OL]. (2009-05-05) [2011-05-20]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5168510.
- [9] Oggier T, Lehmann M, Kaufmann R, et al. An all-solid-state optical range camera for 3D real-time imaging with sub-centimeter depth resolution [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5249: 534-545.
- [10] Bostelman R V, Hong T H, Madhavan R. Towards AGV safety and navigation advancement obstacle detection using a TOF range camera [EB/OL]. (2005-07-18) [2011-05-20]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1507450.
- [11] Duan W B. The research on 3D environment perception system under uncertain environment for mobile robot [D]. Changsha: Hunan University, 2010. [段文彬.未知环境下移动机器人三维环境感知系统的研究[D].长沙:湖南大学,2010.]
- [12] Wang R B, Li L H, Jin L S, et al. Study on binocular vision based obstacle detection for intelligent vehicle [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(12): 2158-2163. [王荣本,李琳辉,金立生,等.基于双目视觉的智能车辆障碍物检测技术研究[J].中国图象图形学报,2007,12(12):2158-2163.]
- [13] Liu H J, Lu J F, Yang J Y. Rough terrain traversability analysis based on relative features [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2006, 21(1): 58-63. [刘华军,陆剑锋,杨静宇.基于相对特征的越野地形可通行性分析[J].数据采集与处理,2006,21(1):58-63.]
- [14] Xu L, Cao L, Ju H H, et al. Traversability-based lunar rover autonomous navigation in three-dimensional terrain [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(2): 2852-2856. [徐璐,曹亮,居鹤华,等.基于三维通行性的月球车自主导航[J].系统仿真学报,2007,19(2):2852-2856.]
- [15] Donald G. Traversability analysis and path planning for a planetary rover [J]. Autonomous Robots, 1999, 6(2): 131-146.