

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)08-1437-07

论文索引信息: 陈华华, 蒋毅飞, 章坚武, 泮一忠. 双目视觉的新颖实时局部2维地图构建方法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(8): 1437-1443

双目视觉的新颖实时局部2维地图构建方法

陈华华¹⁾, 蒋毅飞¹⁾, 章坚武¹⁾, 泮一忠²⁾

¹⁾ (杭州电子科技大学通信工程学院, 杭州 310018) ²⁾ (杭州祥明电子有限公司, 杭州 310012)

摘要: 根据轮式机器人移动的特点, 提出一种采用双目视觉的新颖实时局部2维栅格地图构建算法。首先, 提出虚拟高度线投影成像原理, 将场景均匀栅格化, 在栅格中引入虚拟高度线, 并将其投影到立体视觉系统的立体图对中产生投影线, 将求解场景点高度值的问题转化为在投影线上和水平视差搜索范围内寻找具有最大相似测度的对应点问题; 然后, 提出一种新颖的局部2维地图构建方法, 该方法以机器人所能越过的最大高度为阈值, 对高于阈值部分的虚拟高度投影线上的场景点由其在图像对中的相似测度确定其是否为障碍物区域。实验结果表明, 该方法满足机器人导航所要求的有效性和实时性, 并可应用到构建3维地图。

关键词: 双目视觉; 2维地图; 虚拟高度线; 机器人导航

Novel real-time local two dimension map building method based on binocular vision

Chen Huahua¹⁾, Jiang Yifei¹⁾, Zhang Jianwu¹⁾, Pan Yizhong²⁾

¹⁾ (College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018 China)

²⁾ (Hangzhou Xiangming Electronic Company, Hangzhou 310012 China)

Abstract: According to the characteristics of wheeled mobile robots, a novel method for real-time local two dimension (2D) map building based on binocular vision is proposed. Firstly, the principle of virtual height lines imaging in binocular vision system is proposed. The scene is partitioned into uniform grids, and virtual height line segments (VHLS) which do not exist in the scene are introduced. Each VHLS was projected into the stereo images in binocular vision system and formed a projection line segment (PLS). Finding the height of the scene is converted to finding the correspondence that has the maximum similarity metric on the PLS and in the searched horizontal disparity range. Then, a novel local 2D map building method is proposed. Similarity metric of the scene on the part of the PLS whose height is greater than the maximum which robots can overleap, is to determine whether the scene grid is an obstacle region or not.

The experiment results show that the proposed method is valid and real-time for mobile robots, and can be used for building three dimension (3D) map.

Keywords: binocular vision; two dimension map; virtual height line; robot navigation

收稿日期: 2010-02-08; 修回日期: 2010-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(60702018)。

第一作者简介: 陈华华(1975—), 男, 副教授。2005年浙江大学获信息与通信工程专业博士学位, 主要从事图像处理、计算机视觉、3维重建等研究。E-mail: iseealv@gmail.com。

0 引言

近 20 年来,地图构建一直是机器人领域的热点研究课题,它在机器人导航、定位、路径规划和避障中占据着重要地位^[1-2]。目前,用于移动机器人导航和定位的地图有多种,其中栅格地图是表达机器人移动环境最流行的方法^[1-2]。栅格地图可分为 2 维(2D)^[3-5]和 3 维(3D)^[6-8],由于轮式机器人受活动空间的限制,目前仍以 2 维地图为主。

在地图生成过程中使用的传感器主要有声呐^[9]、激光雷达^[10]和摄像机^[11],由于声呐角分辨率比较低,激光雷达价格昂贵,摄像机在地图构建中应用越来越广泛^[12]。在构建 2 维栅格地图中,多采用单摄像机来获得场景信息,利用特征匹配和三角测量相结合的方法来定位环境中的特征信息^[12],这类方法的主要困难是确定可靠的特征集、降低噪声对三角测量的敏感性,以及计算的复杂度。文献[7-8]采用双目视觉构建 3 维地图,它遵循视差计算→3 维重建的传统方法,可以得到 3 维地图,对结果的高度二值化也可以得到 2 维地图。但是视差计算往往容易产生较多的误匹配影响后续地图的准确性,并且实时性对计算机配置也提出了较高要求。

事实上,环境中移动的机器人,当各障碍物达到一定高度时,机器人就不能越过,至于各障碍物的具体高度,机器人并不需要知道,它只需知道障碍物的位置以便及时做出正确的决策。基于此特点,提出一种新颖的局部 2 维栅格地图构建方法。该方法采用双目视觉,但不采用文献[7-8]的传统构建方法。首先将场景均匀栅格化,在栅格中引入虚拟高度线的概念,它们并不是真正存在的直线段,将它们投影到立体视觉系统的两个相机中,在每幅图像上产生投影线,并与场景表面产生交点,它们是虚拟高度线上确实存在并唯一可见的点,具有最大的相似测度。因此,当该点的高度值大于机器人所能越过的高度阈值时,该处存在障碍物。以机器人所能越过的最大高度为阈值,对高于阈值部分的虚拟高度投影线上的场景点由其在图像对中的相似测度确定其是否为障碍物区域。通过实验仿真,验证了该方法的有效性和实时性,并可以推广到构建 3 维地图。

1 虚拟高度线投影成像原理

当立体视觉系统确定以后,在世界坐标系(W-CS) $x_w y_w z_w$ 内其可见的水平面范围($X_{\min}, X_{\max}$)和($Z_{\min}, Z_{\max}$)也大致确定。将由($X_{\min}, X_{\max}$)和($Z_{\min}, Z_{\max}$)确定的场景平面均匀分为若干个栅格,如图 1(a)所示,则可以确定每个栅格的 x_w 和 z_w 坐标。假定世界坐标系上任意栅格内的场景高度近似相等,当栅格大小足够小时,假定总是成立的。此时,栅格中心的高度可以代表该栅格的高度。现在要确定场景中 P 点的 3 维坐标,设此栅格的世界坐标为(X_w, Z_w),则只要确认 P 点坐标 y_w ,即 P 点到水平面的高度。从而将求解 P 点的 3 维坐标转化为求解栅格高度。

可以通过引入虚拟高度线(VHL)的概念来确定 P 点坐标 y_w 。如图 1 所示。

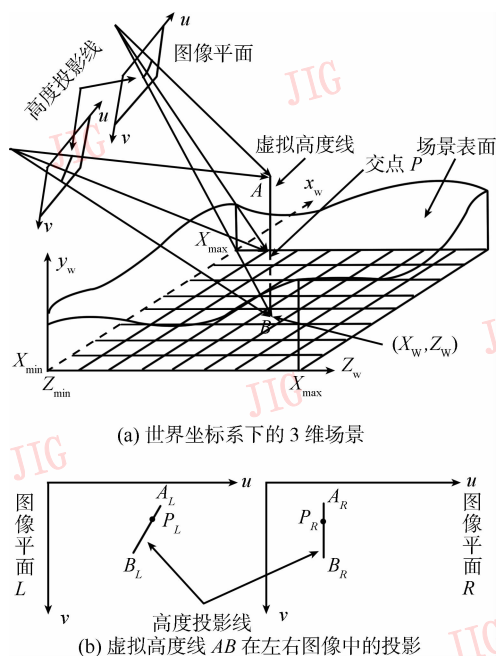


图 1 虚拟高度线投影成像原理图

Fig. 1 Principle of VHL imaging in binocular vision system

虚拟高度线是一条假想的线段,它是假设的一条在 3 维空间中过 P 点且垂直于栅格(X_w, Z_w)的线段 AB ,且它的长度范围已知。 AB 与场景表面的交点为 P ,与水平面的交点为 B 。于是,虚拟高度线上每一点的 3 维坐标都可以计算出来。将它们投影到各自的图像坐标,形成两条高度投影线 $A_L B_L$ 和 $A_R B_R$,场景点 P 在两个摄像机上的投影 P_L, P_R 在各

自的高度投影线上。假定对虚拟高度线的投影是在立体图像对外极线校正后进行的,这样,任意3维空间点在左右图像中的对应点具有相同的纵坐标。2维图像中 $A_L B_L$ 和 $A_R B_R$ 上的每一组对应点就对应3维空间中虚拟高度线 AB 上的一个高度值,由于 AB 上只有 P 点是唯一确实存在且被摄像机可见的,即 $A_L B_L$ 和 $A_R B_R$ 上只有 P_L 和 P_R 是真实存在于2维图像对中的对应点,其余对应点都是虚拟的。因此,对应点 (P_L, P_R) 在所有 $A_L B_L$ 和 $A_R B_R$ 上的对应点簇中具有最大相似测度,求解 P 点高度值的问题就转化为 (P_L, P_R) 是否具有最大相似测度的对应点问题,即在立体图对之间寻找证据来证实或者证伪虚拟高度线上是否存在场景点。 (P_L, P_R) 作为对应点,除了在 $A_L B_L$ 和 $A_R B_R$ 上具有最大相似测度,在水平扫描线上也具有最大相似测度。获得了对应点 (P_L, P_R) ,也即获得了 P 点的高度值。

本文中采用零均值归一化交叉相关(ZNCC)作为相似测度。在实际环境中存在增益、亮度偏差等因素影响,左右两幅图像也难免会有偏差。在对应点匹配过程中也会存在误差。因此,需要设定某个阈值来选取判断对应点是否对应。绝对误差和(SAD)、差值的平方和(SSD)得到的是像素之间的灰度差,很难选取准确的阈值;ZNCC属于相似性测度,更容易选取准确的阈值。

虚拟高度线投影成像中存在一种特例,当 (X_w, Z_w) 处的虚拟高度线 AB 与规则几何物体表面重合时,如图2(a)所示,场景与 AB 的交点数有许多个,即高度线与物体表面重合的线段 PB 上的所有点都是交点,它们是确实存在且被摄像机可见的,其投影线段 $P_L B_L$ 和 $P_R B_R$ 上所有对应点均具有较大相似测度,且在水平方向具有最大相似测度。而在只具有最大高度的对应点才是物体最高点的投影,其对应的高度值为物体的高度。虚拟高度线 CD 与 AB 具有相同 X_w 坐标,但深度坐标 Z_w 不同。因为数字图像的离散化特点,投影线上每点的图像坐标值需量化为整数,如图2(b)所示,则投影线上连续多个像素点具有相同的图像横坐标 U ,以及图像本身量化误差的影响,在投影过程中,虚拟高度线 CD 与 AB 在图像中的投影线会产生重合。因此,即使虚拟高度线是穿过障碍物(如图2(a)中的虚拟高度线 CD),而不与物体表面重合,但其投影到障碍物表面上的所有对应点也均具有较大相似测度,且在水平方向具有最大相似测度。

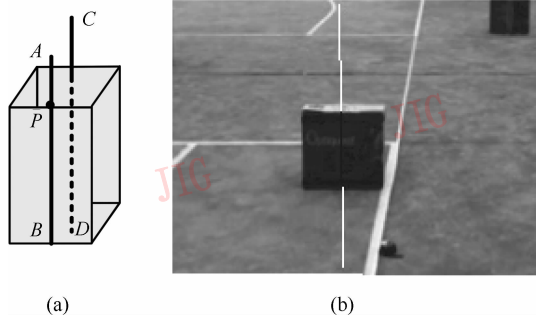


图2 虚拟高度线投影成像特例

Fig.2 The special case of the projection of VHL

2 局部2维栅格地图构建方法

2维栅格地图中每个栅格可以表示为占有(occupied)、空缺(empty)和未知(unknown)3种状态^[5,13],栅格标记为占有状态表示该处有障碍物,标记为空缺状态表示该处无障碍物,标记为未知状态需要机器人在移动过程中进一步观察。对于局部2维栅格地图主要是检测出这3个区域,并标记为相应状态。

假设机器人所能越过的高度为 H_l ,当场景中存在高度高于 H_l 的物体时,机器人不能逾越,该区域存在障碍物,其所在的区域标记为占有状态,在图1(a)中表现为 P 的高度值高于 H_l ;高度低于 H_l 的物体,则为非障碍物,其所在区域标记为空缺状态,在图1(a)中表现为 P 的高度值低于 H_l ;对于场景中机器人看不见的区域标记为未知状态,在图1(a)中表现为障碍物后的遮挡区和视野以外的区域。

根据线性摄像机成像模型文献[14-15],可以求得任意物点在参考摄像机的摄像机坐标系(C-CS)下的3维坐标 (X_c, Y_c, Z_c) ,如式(1)所示。其中 Z_c 为光轴, d 是像素点 (U, V) 的视差值。 (U_0, V_0) 是图像中心坐标, b 是基线长度, f 是焦距,它们为摄像机内部参数,可由摄像机标定获得。

$$\begin{cases} X_c = \frac{b \times (U - U_0)}{d} \\ Y_c = \frac{b \times (V - V_0)}{d} \\ Z_c = \frac{b \times f}{d} \end{cases} \quad (1)$$

假设摄像机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 在全局坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 的位置关系如图3所示。可以获得

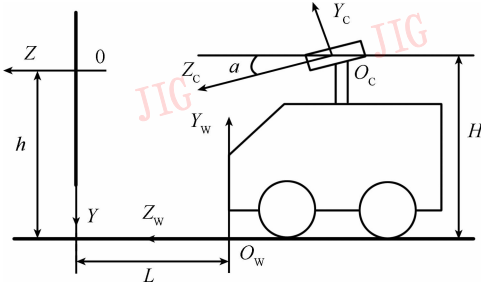


图3 摄像机坐标系与世界坐标系

Fig. 3 Relationship between the C-CS and the W-CS

$$\begin{cases} X_c = X_w \cos \gamma + Y_w \sin \gamma - D_x \\ Y_c = (-X_w \sin \gamma + Y_w \cos \gamma) \cos(\alpha + \beta) + \\ Z_w (\cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \cos \beta) - \\ (D_y \cos \alpha + D_z \sin \alpha) \\ Z_c = (X_w \sin \gamma - Y_w \cos \gamma) \sin(\alpha + \beta) + \\ Z_w (\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \gamma) + \\ D_y \sin \alpha - D_z \cos \alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中, α 是轴 $O_c Z_c$ 与轴 $O_w Z_w$ 的夹角, β 是轴 $O_c X_c$ 绕轴 $O_c Z_c$ 的旋转角 (即俯仰角是 $\alpha + \beta$), γ 是轴 $O_c X_c$ 绕轴 $O_c Z_c$ 的旋转角。(D_x, D_y, D_z) 是摄像机坐标系原点在世界坐标系中的位置。

对式(1)、(2)进行变换, 得到

$$\begin{cases} d = bf / [(X_w \sin \gamma - Y_w \cos \gamma) \sin(\alpha + \beta) + \\ Z_w (\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \gamma) + \\ D_y \sin \alpha] \\ V = V_0 - [d(-X_w \sin \gamma + Y_w \cos \gamma) \cos(\alpha + \beta) + \\ \beta) + Z_w (\cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \cos \beta)] / b \\ U = U_0 + \frac{d(X_w \cos \gamma + Y_w \sin \gamma)}{b} \end{cases} \quad (3)$$

(X_w, Z_w) 处虚拟高度线 AB 的高度 Y_w 的范围是已知的, 可以通过式(3)求出其在图像中的投影点坐标 (U, V)。由于障碍物的高度阈值为 H_l , 设置占有状态判断高度域范围为 $[H_l, H_{l+h}]$ 。当某个障碍物的高度 $Y_w \geq H_l$ 时, 此障碍物所在栅格的虚拟高度线的所有对应点中必定存在至少一个以上对应点, 其在投影线上具有较大相似测度, 且在水平视差搜索范围内具有最大相似测度。因此, 2 维地图中栅格是否标记为占有状态, 就转化为 AB 上在高度域 $[H_l, H_{l+h}]$ 范围内是否具有超过预先设定的相似测度阈值 C , 且在水平视差搜索范围内具有最大相似测度的对应点, 即是在立体图对之间寻找证据来证

实或者证伪虚拟高度线上是否存在高度超过 H_l 的场景点。而对于不存在超过预先设定的相似测度阈值 C 的对应点, 即栅格高度 $Y_w < H_l$ 的情况, 设置空缺状态判断高度域 $[H_d, H_l)$, H_d 为小于 0 的值, 同样进行上述判断过程, 如果具有超过预先设定的相似测度阈值 C 且在水平视差搜索范围内具有最大相似测度的对应点, 则栅格为空缺状态。当某一栅格在高度域 $[H_l, H_{l+h}]$ 和 $[H_d, H_l)$ 均无超过预先设定的相似测度阈值 C 的对应点, 则此栅格为未知状态。在构建 2 维栅格地图的过程中, 先对每个栅格在高度域 $[H_l, H_{l+h}]$ 内进行是否具有超过预先设定的相似测度阈值 C 且在水平视差搜索范围内是否具有最大相似测度的对应点判断, 如果有对应点, 则标记为占有状态, 然后进行下一个栅格判断; 反之, 则对此栅格在高度域 $[H_d, H_l)$ 内再进行上述判断, 如果有对应点, 则标记为空缺状态, 并进行下一个栅格判断; 反之, 则标记为未知状态。由于式(3)计算得到的 U 值和理论视差值 d 多为浮点数, 如果对 U 和 d 取为整数, 则会出现两个不同位置栅格 (X_{w1}, Z_{w1}) 和 (X_{w2}, Z_{w2}) 处虚拟高度线在图像上生成的投影线重合, 导致重复求解相同像素的相似测度, 有时造成遮挡区域或者障碍物区域周围扩展出一两个零星的栅格。因此, 必须对图像亮度进行插值。本文采用线性插值。

3 实验结果与分析

为了验证算法的有效性, 便于定量描述结果的准确性, 对各种人工场景进行大量的实验。图 4 的图像分辨率为 720×480 , 图 (a) 实验中所选取的场景范围如下: X_w 的范围为 $-4.5 \sim 4.5$ m, Z_w 的范围为 $3.3 \sim 12.3$ m; 图 (b) 实验中所选取的场景范围如下: X_w 的范围为 $-4.5 \sim 4.5$ m, Z_w 的范围为 $5 \sim 17$ m; 图 (c) 实验中所选取的场景范围如下: X_w 的范围为 $-4.5 \sim 4.5$ m, Z_w 的范围为 $4 \sim 13$ m。

3 组实验中所构建的 2 维栅格地图所采用的栅格大小为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, 前两组障碍物的高度阈值选取 $H_l = 30 \text{ cm}$, 第 3 组障碍物的 $H_l = 40 \text{ cm}$, 占有状态判断高度域为 $[H_l, 100 \text{ cm}]$, 空缺状态判断高度域为 $[-5 \text{ cm}, H_l)$, 相似测度阈值 $C = 0.90$, 相似测度采用基于窗口的 ZNCC, 窗口大小为 7 个像素。为减少 ZNCC 在地面像素的误匹配, 算法先假设可视区内均为可通行区, 在高度域 $[H_l, 100 \text{ cm}]$ 范围

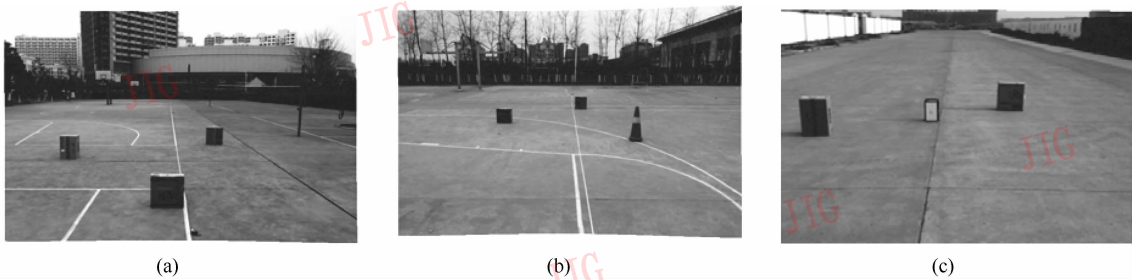


图 4 3 组实验场景的左图
Fig. 4 Left images of the experiments

内确定可视区内的障碍物所在的区域,标记为占有状态,在该区域的后方即深度正方向搜索至不存在遮挡区域或障碍物,搜索停止。算法采用 C++ 语言编写,实验计算机配置为 AMD 1.6 GHz CPU,2 GB DDR 内存,运行时间小于 100 ms,满足机器人导航对实时性的要求。

图 5 为 3 组实验在预设场景范围内按障碍物高度阈值对每一个栅格进行状态判断得到的 2 维栅格地图。地图中下方左右两侧的未知区域为预设场景

范围以外的非视野区,而处于占有状态的栅格表明此处有障碍物。在处于占有状态栅格后的未知区域为障碍物后的遮挡区域。在图 5 中,场景远处障碍物深度方向的厚度大于其真实厚度。这是由于图像量化误差的影响,前后相邻的多个栅格中的虚拟高度线在图像上的投影相互非常靠近,有些甚至投影到同一条线上。图像中场景越远,受量化误差影响越大。因此,如图 5 所示,障碍物的深度越远,其占有状态区域的厚度越大。

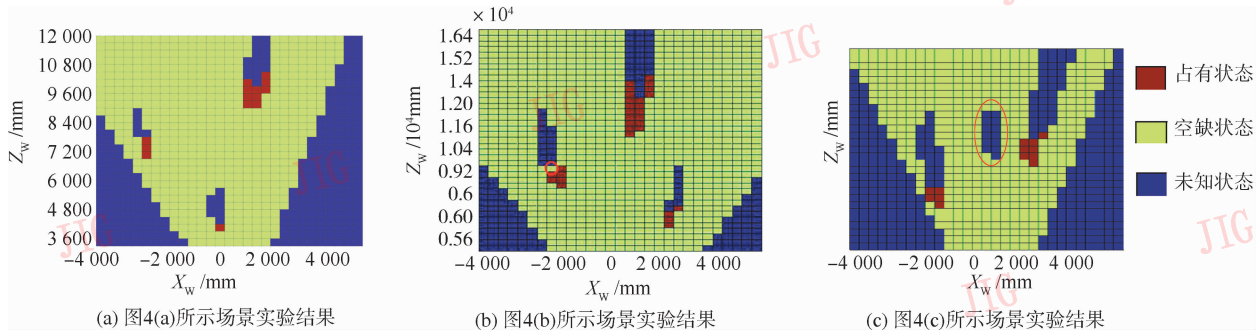


图 5 2 维栅格地图实验结果
Fig. 5 2D grid maps

图 5(b)中用圆圈标注的栅格为误匹配点,其真实状态应为占有状态。图 5(c)中用圆圈标注的是遮挡区,其前方有一高度为 32.5 cm 的障碍物,由于阈值 $H_l = 40$ cm,表示该区域可被机器人通过,被标记为空缺状态,而其后方区域因在投影线上找不到相似测度超过阈值 C 且在水平视差搜索范围内具有最大相似测度的对应点,被标记为未知状态。图 4(b)中的锥形障碍物各点高度不同,如果多条投影线落在锥形障碍物上,则投影线上高于阈值 H_l 的部分存在相似测度超过阈值 C 且在水平视差搜索范围内具有最大相似测度的对应点就判断为占有状态,相应地,该区域判为障碍物,即机器人不可逾越;

如果不符合这一条件,且投影线上低于阈值 H_l 的部分存在相似测度超过阈值 C 且在水平视差搜索范围内具有最大相似测度的对应点,就判断为空缺状态,相应地该部分判为可通行区,即机器人可逾越。在后期机器人的路径规划中,当机器人经过障碍物时,会与障碍物之间保持某个安全距离,而不是紧贴着障碍物通过。因此,本文中对于本身高度不同的障碍物的状态判决策略不会造成机器人致命的错误导航。

表 1 列出了 2 维栅格地图的实验结果,由于本文是构建 2 维地图,不需要高度信息,因此,结果只列出了障碍物的深度信息。

表 1 图 5 实验地图中障碍物的深度结果
Tab.1 Depth result of obstacles in Fig. 5

图 5	障碍物序号	真实深度/cm	实验结果/cm	误差/%
(a)	1	400	390	-2.5
	2	700	690	-1.4
	3	900	900	0
(b)	1	600	620	3.33
	2	800	830	3.75
	3	1 100	1 100	0
(c)	1	600	580	-3.33
	2	700	—	—
	3	800	760	-5

由于实验中所采用的栅格大小为 30 cm × 30 cm, X_w 和 Z_w 方向上的精度为 30 cm。从表 1 可以看出,地图中对障碍物深度的重建结果满足机器人导航精度要求。图 5 中障碍物的大小比较相似,但从实验结果看,占有状态的区域大小却相差甚远。引起这一结果主要有 3 个原因:1)窗口效应是引起重建宽度变大的原因之一,如图 6 所示。



(a) 左图



(b) 右图

图 6 引起窗口效应的虚拟高度线投影位置案例
Fig. 6 The case for window effect of the projection location of VHL

当虚拟高度线(图 6 中的白线)上部分线段投影到障碍物边缘外侧的 3 个像素(此值为窗口大小的一半)范围以内时,由于相似测度的窗口效应,该

部分线段上的对应点也具有较大的相似测度,该虚拟高度线所在的栅格也会被判决为处于占有状态,从而造成障碍物的占有状态区域的宽度增加;2)由于远处相比于近处具有更为显著的量化效应,引起障碍物区域或遮挡区域变大;3)由于相机与障碍物视角和姿态引起投影几何的差异,图 5 中,场景两侧区域中的障碍物和遮挡区域分别向两个方向倾斜。图 4(a)中障碍物的实际宽度介于一到两个栅格尺寸之间,投影时实际占用两个栅格,但是只有一个栅格的投影线在障碍物上找到匹配点,因此,其宽度均小于真实宽度值。

构建的 2 维栅格地图结果基本反映了场景中障碍物所在的位置信息。如果减小栅格大小,精度进一步得到提高的同时,计算时间也相应增加。如果在投影线上找到最佳匹配点获得 (U, V, d) ,由式(3)可以得到每个场景点的高度,即获得每个栅格的高度值,从而完成场景 3 维栅格地图的构建。

4 结 论

提出一种新颖的实时局部 2 维栅格地图构建方法。首先提出虚拟高度线投影成像原理,将场景点高度值的问题转化为其在投影线上和水平视差搜索范围内是否具有最大相似测度的对应点求解问题;然后通过对虚拟高度线上高于阈值部分的投影线段计算相似测度,根据相似测度标记每个栅格的状态,实现了 2 维栅格地图的构建。实验结果表明,所提出的方法是有效的,具有较高的实时性,符合了机器人导航的要求,并可应用于构建 3 维地图。

参考文献 (References)

[1] Ivanjko E, Petrovic I. Experimental evaluation of occupancy grid map improvement by sonar data corrections[C]//Proceedings of the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation. Washington DC: IEEE, 2005 : 95-100.

[2] Tamilselvi D, Rajalakshmi P, Shalinie S M. Dynamic programming agent for mobile robot navigation with moving obstacles[C]//Proceedings of 2009 International Conference on Intelligent Agent and Multi-Agent Systems. Washington DC: IEEE, 2009 : 1-5.

[3] Baek S H, An S Y, Oh S Y. Local grid map based rough localization for the mobile robot by using self-organization map [C]//Proceedings of the 2006 SICE-ICASE International Joint

- Conference. Washington DC: IEEE, 2006: 5919-5923.
- [4] Lee Y C, Yu W, Lim J H, et al. Sonar grid map based localization for autonomous mobile robots [C]//Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications. Washington DC: IEEE, 2008: 558-563.
- [5] Elfes A. Sonar-based real-world mapping and navigation [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987(3): 249-265.
- [6] Fumio K, Takashi Y, Shuui K, et al. Whole body locomotion planning of humanoid robots based on a 3D grid map [C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington DC: IEEE, 2005: 1072-1078.
- [7] Chen H H, Xu Z Z. 3D map building based on stereo vision [C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. Washington DC: IEEE, 2006: 969-973.
- [8] Chen H H, Xu Z Z. Local 3D map building and error analysis based on stereo vision [C]//Proceedings of IECON 2005 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. Washington DC: IEEE, 2005: 379-382.
- [9] Kodagoda S, Hemachandra E A S M, Jayasekara P G, et al. Obstacle detection and map building with a rotating ultrasonic range sensor using bayesian combination [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Information and Automation. Washington DC: IEEE, 2006: 98-103.
- [10] Chen Baifan, Cai Zixing, Xiao Zheng, et al. Real-time detection of dynamic obstacle using laser radar [C]//Proceedings of the 9th International Young Computer Scientists Conference. Washington DC: IEEE, 2008: 1728-1732.
- [11] Lim Youngchul, Lee Chunghee, Kwon Soon, et al. Position estimation and multiple obstacles tracking method based on stereo vision system [C]//Proceedings of 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Washington DC: IEEE, 2009: 72-77.
- [12] Gartshore R, Aguado A, Galambos C. Incremental map building using an occupancy grid for an autonomous monocular robot [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Washington DC: IEEE, 2002: 613-618.
- [13] Lejla B M, Ivan P, Edouard I. Mobile robot localization using local occupancy grid maps transformations [C]//Proceedings of the 12th International Power Electronics and Motion Control Conference. Washington DC: IEEE, 2007: 1307-1312.
- [14] Zhang Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C]//Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Computer Vision. Washington DC: IEEE, 1999: 666-673.
- [15] Heikkila J, Silven O. Four-step camera calibration procedure with implicit image correction computer vision and pattern recognition [C]//Proceedings of 1997 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC: IEEE, 1997: 1106-1112.