

基于表面方向的障碍物检测方法*

马康宇, 林学闯

(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

E-mail: 7im@263.net; lxy-dcs@mail.tsinghua.edu.cn

http://www.tsinghua.edu.cn

摘要: 针对障碍物检测问题中特殊的要求和特点,受原有的利用特征点匹配计算视差方法的启发,提出了一种全新的快速匹配检测障碍物的方法——表面方向法,可以描述平面的方向.与计算深度确定障碍物的方法不同,该算法根据物体表面基本与地面垂直这一特性来检测障碍物.

关键词: 计算机视觉;障碍物检测;表面方向;视差;标定

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

高速处理器和多媒体技术的发展使实时的障碍物检测系统成为可能.但是,目前的检测方法还处在理论阶段,一些典型的方法在运用到实际中时都会出现这样那样的问题.目前常见的几种典型的障碍物检测方法有:

- (1) 基于光流分析的方法^[8];
- (2) 重投影的方法^[9];
- (3) 立体匹配^[4-6].

用立体视觉实现障碍物检测所面临的一个最大的挑战是计算复杂度问题,在每一时刻都必须计算两帧或多帧图像.为了简化对应问题,还必须对图像进行一定的几何校正和光学校正.然而在实际系统中,由于外界因素的干扰(主要是汽车颠簸),摄像机参数不可能保持不变.因此就需要对颠簸不敏感、比较鲁棒的描述方法.本文提出的基于表面方向的描述受颠簸的影响就比较小.

本文第 1 节介绍双目立体视觉的基本原理.第 2 节从直观的角度介绍检测表面方向的方法.第 3 节给出这种方法的理论解释和分析.第 4 节是算法的具体实现和实现中的一些算法改进.最后是实验结果.

1 双目立体视觉的基本原理

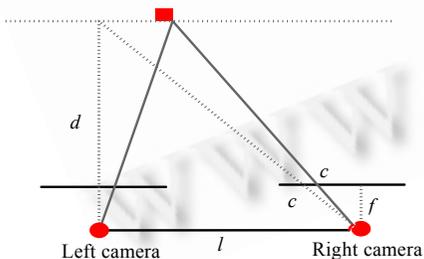


Fig.1 Stretch of binocular vision

图 1 双目立体视觉示意图

深度和视差的关系:

在假设两个相机的成像平面重合的情况下,可以用如图 1 所示的各变量间的关系.其中 c 为视差,可以由 d, l, f 表示(d, l, f 分别是物体深度、相机间距离和焦距).

$$\frac{l-c}{l} = \frac{d-f}{d}, \text{ 则 } c = \frac{l}{d} f.$$

这就是双目立体视觉的基本公式.可以看出 c 和 d 成反比.对上

式求导可得: $\frac{dc}{dd} = -\frac{l \cdot f}{d^2}$, 即对于在一个平面上的一个点集,随着深

度的增加,视差的变化和深度是成平方反比的.

* 收稿日期: 2000-07-05; 修改日期: 2000-10-16

作者简介: 马康宇(1977 -),男,广东中山人,博士生,主要研究领域为模式识别,图像处理;林学闯(1940 -),男,浙江瑞安人,教授,博士生导师,主要研究领域为模式识别,手势识别.

2 检测表面方向算法介绍

在日常生活中,可以看到这样的现象,一面正对摄像机的墙,无论从什么角度看,墙上的纹理都不会变形,而在地面上的纹理,会因观察者位置的不同而变化.更形象一点就是,一块方布挂在墙上,从左到右各个位置看,都是方的.这里要分两种情况考虑.如果不改变观察方向的话,正方形依然还是正方形;即使从其他角度看,如果还保证表面和人眼平行,那么看到的将是长宽比例不同的长方形.

平放在地上的方布,看起来就不再是方的了,而且随着观察者位置的不同,相邻边的夹角也会不同.下面图 2 中左图的边缘用实线标出,右图中对应边缘用虚线标出.

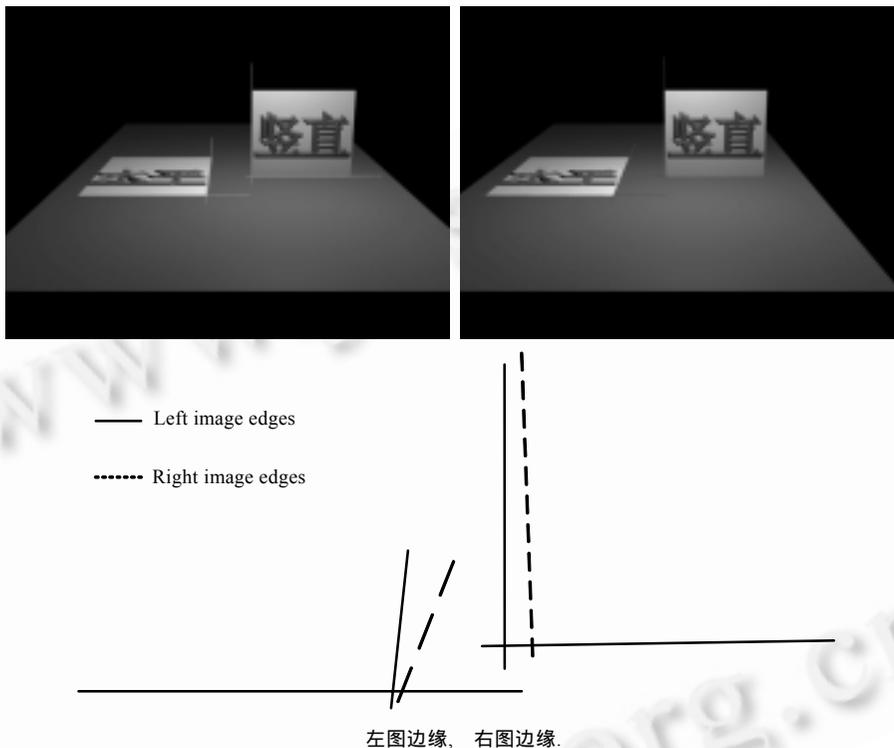


Fig.2 The sketch map illustrates the surface direction method

图 2 识别表面方向的示意图

这种直观表达的检测方法可以用双目立体视觉中视差的理论完整地表示出来:根据物点在摄像机坐标系中的深度,可以确定在两个摄像机中成像点的视差.如果一组点处在同一深度,那么它们的视差就是固定不变的.就是说,在这种情况下,这组点是在和摄像机光轴垂直的平面上.如果另一组点随着 Y 坐标的变化,视差也逐渐变化的话,就说明这些点的平面是斜的.进一步根据视差变化的速度,可以算出平面的倾斜程度.在下一节中我们还要定量地分析表面方向和视差变化的关系.

本文提出的检测表面方向的识别方法,就是利用这一点来区别物体的表面究竟是同地面同向,还是与地面垂直.下面图 3~图 5 给出了原始图像和处理结果.其中图 3 是原始图像经过边缘操作后的结果.

在比较图 3 中的边缘时,如果发现两幅图中的边缘形状是一样的,就说明这是障碍物的边缘,如图 3 中后两个边缘所示.而第 1 个由路边形成的边缘,可以看出左右两图中直线的斜率是不一样的,因此不是障碍物.

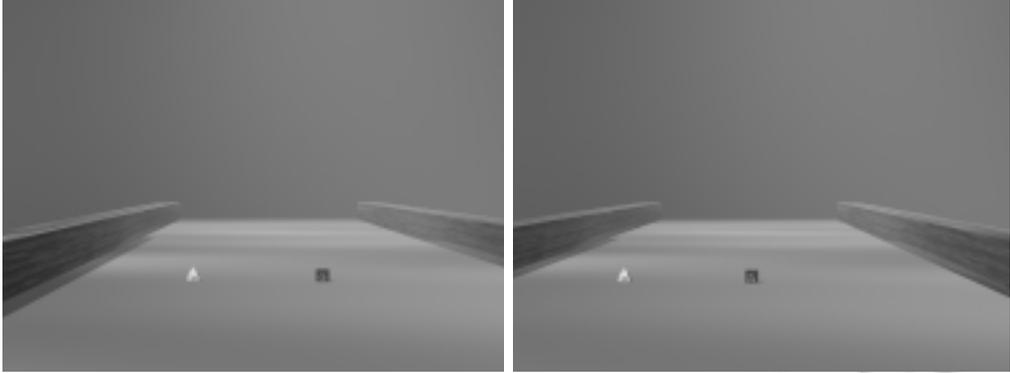


Fig.3 Original left and right images (50% size)
图3 从左右两个摄像机得到的原始图像(50%大小)

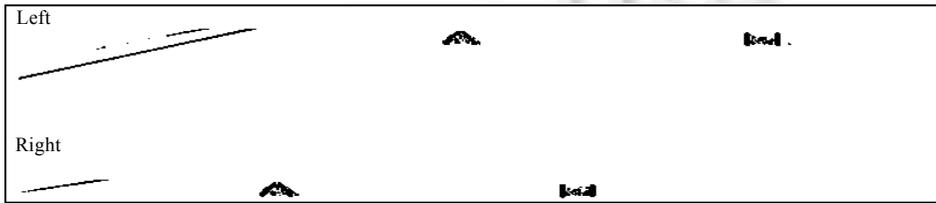


Fig.4 Detected edges (only the odd lines between 250 and 350)
图4 检测到的边缘图案(只有 250~350 间的奇数行)



Fig.5 Segment objects for comparison
图5 分割出的要进行比较的对象

3 对表面方向和视差变化的定量分析

下面对物体表面方向与边缘视差变化的关系作一定量分析. 示意图如图 6 所示.

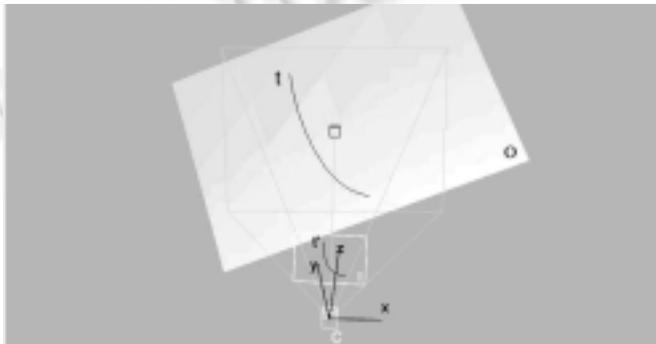


Fig.6 Elements used in calculate surface direction from parallax (stretch)
图6 推理表面方向和视差关系中用到的各个元素示意图

设三维世界坐标系中的一条线段在平面 O 上, 它的齐次坐标为 $m = (x, y, z, 1)$, 由于各个点共面, 所以有 $l = (a, b, c, d)^T$ 使 $ml = 0$.

在障碍物检测系统中,障碍物前表面深度变化相对于总体深度 50 米来说很小,可以假设平面 O 的 x 轴和成像平面 O 的 x 轴是同方向的,即 O 只能沿 x 轴的一个自由度转动.那么必须要满足 $a = 0$.即

$$b \cdot y + c \cdot z + d = 0. \tag{1}$$

表面的方向直接由 b 和 c 确定.

一条参数曲线 t 的轨迹为 $m = (x(t), y(t), z(t), 1)$,那么它的像 t' 的轨迹就是 $m' = \left(\frac{x(t)}{z(t)}, \frac{y(t)}{z(t)}, 1, 1 \right)$.在另一个相机的坐标系中, t 的轨迹是 $n = (x(t) + \Delta x, y(t), z(t), 1)$,像的轨迹 t' 为 $m' = \left(\frac{x(t) + \Delta x}{z(t)}, \frac{y(t)}{z(t)}, 1, 1 \right)$.视差变化为 $\Delta x' = \frac{\Delta x}{z(t)}$,而 y 坐标为 $y' = \frac{y(t)}{z(t)}$,它们之间的关系由 O 平面的约束确定.由式(1)可得

$$y(t) = \frac{-d - c \cdot z(t)}{b}, \tag{2}$$

代入上式可得

$$y' = \frac{y(t)}{z(t)} = \frac{-d}{b \cdot z(t)} - \frac{c}{b}, \tag{3}$$

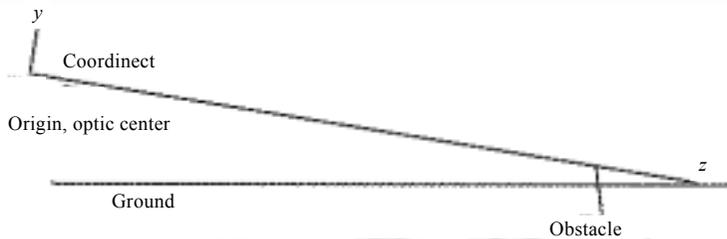
与 x 坐标相比,满足线性关系:

$$\frac{b}{d} \Delta x' + \Delta x \cdot y' + \Delta x \cdot \frac{c}{b} = 0. \tag{4}$$

因此上边所说的视差变化速度的定量表示就是

$$\frac{d\Delta x'}{dy'} = \frac{b}{d \cdot \Delta x}. \tag{5}$$

它与平面 O 的倾角($\frac{b}{d}$ 表示 O 平面的 y 轴截距的负倒数)及两相机间基线的长度有关.从上式还可以看出,视差变化速率与参数曲线在平面上的位置无关,而只由平面的方向决定.所以说,视差变化可以作为度量物体表面方向的标准.如图 7 所示.



坐标系, 原点、光心, 地面, 障碍.

Fig.7 Elements used in obstacle detection system

图 7 在障碍物检测系统中的各元素

在这个障碍物检测系统中,要识别的两个平面是地面(假设地面基本平直)和障碍物表面(和地面夹角接近 90°).系统的硬件部分决定了相机基线长为 2 米, Z 轴和地面的夹角是 3° .

在这种条件下,通过式(5)算出的视差变化为

地面平面 $\frac{d\Delta x'}{dy'} = \frac{b}{d \cdot \Delta x} = \frac{1}{2 \times 2} = 0.25$.

障碍物平面 $\frac{d\Delta x'}{dy'} = \frac{b}{d \cdot \Delta x} = \frac{1}{2 \times 945} \approx 0$.

4 障碍物检测系统的具体实现

4.1 相机的放置方向

对于相机的平行配置要求(两个成像平面平行),这个要求是在扫描线匹配方法中为了使外极线和扫描线重

合,简化问题而引入的.在这个识别表面方向的方法中并不必要,而且如果以一定夹角放置相机,使两个摄像机的视场汇聚会使障碍物检测更容易.比较好的放置方案是两个相机都向中间转一点,使 50m 处(要识别的障碍物深度)的物体视差为 0.

可以想象出,基本垂直于地面的直线随着相机的左右旋转,它的视差是不会变化的.对于地面上的直线,相机的旋转会对视差有影响.下面的分析可以得出这种修改对识别的负面影响可以忽略.

另外,这种放置方法使识别的关键区域视差为 0,即左右图像照到的都是同样的物体,在匹配时就不用考虑那种只在一幅图中出现而在另一副图中在图像外的物体.如图 8 所示.

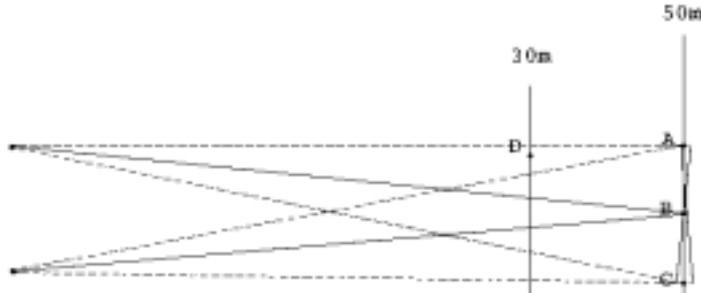


Fig.8 The influence of amend to the parallax

图 8 修改对视差的影响

由于两台相机不再是平行放置,而是保证 50m 处正中视差为 0.因此必须对视差的变化作精确的分析,保证它不会影响识别的结果.

在 50m 处,考虑图像的左右两端,分别对应的实际位置为 $50 \times (\tan(\arctan(0.1) + \arctan(0.02)))$ 和 $50 \times (\tan(\arctan(0.1) - \arctan(0.02))) + 2$.相差为 0.02m,对应到图像上,为一个像素,可以忽略.

在 50m 处视差为 0 的条件下,原来假设的视差和深度成反比的关系不再成立,得到新的关系.在深度为 d 处,相当于过光心分别引两条线,交 50m 处于两点,这两点的距离就是对应的视差.则

$$\frac{d}{50-d} = \frac{2}{\Delta x' \cdot 0.016},$$

其中 0.016 是在图像上一个像素对应于 50m 处的长度.

4.2 摄像机标定

由于设备等外界可观因素的限制(例如,车顶不平等),两个摄像机及其与地面的位置关系不可能和理想的一样,摄像机的微小偏差在图像上看来都是很大的位移,这个问题可以通过摄像机标定解决.由于时间的限制,这里的标定只是在开始识别前做一次,并不处理运动中由颠簸产生的误差(这部分误差算法可以承受).

4.3 系统流程

整个检测过程分为 3 步:边缘检测、匹配、计算视差变化(如图 9 所示).

考虑到速度问题,边缘检测直接采用 Prewitt 竖直边缘操作数,并根据实际需要改成了 5×3 (5 列 3 行)的形势.因为按照上面所说的,检测是根据物体的竖直边缘进行的,因此边缘检测只需检测水平方向的边缘.又为了考虑速度的需要,改成 5×3 ,可以在不降低精度的条件下把时间减少 40%.

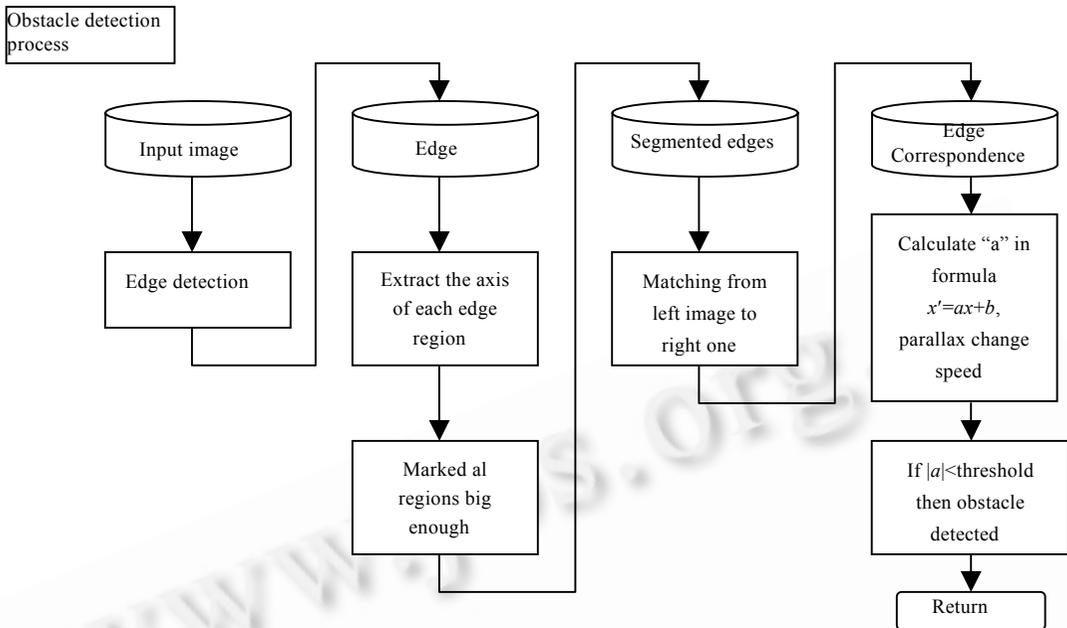
没有进行边缘连接,长度小于 5 个像素的边缘直接认为是噪声(不到检测障碍物的精度).

匹配是在全局搜索最优的过程,评价函数包括:对应边缘的视差(起点和终点)、长度、方向及灰度变化方向(增加或减少).计算视差变化直接将对应点的横坐标相减,得到表示视差变化的一个序列,用最小二乘法拟和得到视差变化速率.按计算资料,凡是变化速率大于 0.2 的都被认为是障碍物.

由于大部分的计算时间都在边缘检测一步.考虑到原有的方法是两图分别进行的.因此设计了另一种实现方案,可以只对一副图像进行全部的边缘检测,利用检测的结果指导对另一幅图像的检测.

在左图中找到的边缘,对边缘上的点,只需在右图的一个固定区域内检测边缘.这样,就只需在右图很小的

范围内进行边缘检测.



处理边缘图像识别障碍物，原始图像数据，边缘检测，边缘图像数据，分割出每个边缘区域的中心线，把长度超过一定范围的边缘记录下来，分块的边缘，左右两图边缘匹配，边缘对应关系，线性拟和对应点的视差变化趋势 $x'=ax+b$ ，如果在限定范围内,则认为是障碍物，返回。

Fig.9 Obstacle detection system flow chart

图 9 障碍物检测的流程

5 实验结果(如图 10~图 12 所示)



Fig.10 Origin images after revise (50% size)

图 10 校正后的原始图像(50%大小)



Fig.11 Segment result

图 11 分割结果

Fig.12 Match to detect obstacle

图 12 匹配后检测出的障碍物

6 对计算复杂度的分析

通过编程的比较,对图像处理中的一些基本运算的费时有了一定的了解.其中与这个障碍物检测项目有关的主要有:灰度均匀化、边缘检测、提取特征点、用动态规划的方法匹配特征点.资料如下:

基本运算	时间(ms)
灰度均匀化	10
边缘检测	58
提取特征点	<10
匹配特征点	*

匹配特征点的时间和特征点的个数呈指数关系,在障碍物检测系统里,可以认为每行中的特征点个数少于10个.每个特征点的尝试次数决定最后匹配的准确率,通过试验发现,一般取两个点就可以了.在这种假设下,时间也不是很稳定.

采用表面方向法各个步骤的耗时如下:

基本运算	时间(ms)
图像获取	<10
边缘检测(5×3的Prewitt子)	150左右
提取特征边缘	<10
匹配特征边缘	<10

时间统计是在CPU为K6-300,内存为128M的计算机上进行的,在其他配置的计算机上可能会有一定的误差.

在这一点上,也可以体现出表面方向算法的优越性.首先它只需要检测边缘,而不需要灰度均匀化或类似的灰度处理.而且它的时间比较稳定,主要费时部分是边缘检测部分.其后的分割物体和比较两个步骤基本不费时间(<10ms).

7 结论

通过分析、计算和实验,设计了针对汽车障碍物检测的新颖算法.它在时间和精度上可以达到正确、实时的要求.更重要的是,它可以在颠簸情况下保证正常工作.但是缺点是算法的针对性太强,不能灵活地运用到其他问题上.

比较外极线上的匹配方法(包括特征点匹配和区域匹配等)和表面方向算法.外极线法利用的是外极线上各点的灰度信息;而表面方向法虽然利用了连续多条扫描线的信息,但是实际处理的是边缘运算后的二值图像,丢掉了灰度信息.两种方法可以说是各有千秋,适用于不同的场合.

References:

- [1] Montesinos, P., Gouet, V., Deriche, R., *et al.* Matching color uncalibrated images using differential invariants. *Image and Vision Computing*, 2000,18:659~671.
- [2] Fusiello, A. Uncalibrated euclidean reconstruction: a review. *Image and Vision Computing*, 2000,18:555~563.
- [3] Scherer, S., Werth, P., Pinz, A. The discriminatory power of ordinal measures——towards a new coefficient. In: *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 1999. 76~81.
- [4] Chen, Q., Medioni, G. A volumetric stereo matching method: application to image-based modeling. In: *Proceedings of the CVPR'99*. 1999. 29~34.
- [5] Tomasi, C., Manduchi, R. Stereo matching as a nearest-neighbor problem. *IEEE PAMI*, 1998,20(3):333~340.
- [6] Wei, G.-Q., Hirzinger, G. Intensity- and gradient-based stereo matching using hierarchical Gaussian basis functions. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1998,20(11):1143~1160.
- [7] Hiroshi Ishikawa. Multi-Scale feature selection in stereo. In: *Proceedings of the CVPR'99*. 1999. 132~137.
- [8] Enkelmann, W. Obstacle detection by evaluation of optical flow field from image sequence. In: *Proceedings of the European Conference Computer Vision*. 1990. 134~138.

