

文章编号: 1000-582x(2000)03-0070-04

①
70-73

基于道路几何模型的单目测距算法*

黄席越, 汪先矩, 柴毅, 周欣, 黄瀚敏
(重庆大学自动化学院, 重庆 400044)

U471.1
U463 TP391.41

摘要: 在研究前方障碍物识别及高速公路几何模型基础上, 对其左右边缘线的几何约束关系进行了讨论, 分析了常用的多目测距算法的不足, 提出了一种实时、有效地利用计算机视觉原理实现单目测距的求解高速公路上障碍物距离测算方法。实验证明, 系统的实时性好, 精度高, 达到了实用要求。

关键词: 计算机视觉; 线性投影; 单目测距; 几何模型; 数值积分

中图分类号: TP 391.4

汽车驾驶

文献标识码: A

道路

汽车智能辅助驾驶系统类似于轮式移动机器人控制, 是一个集环境感知、规划决策、自动驾驶等多种功能于一体的综合系统。除特殊潜在的军用价值外, 还因其在公路交通运输中以其主动安全、防碰、防撞的广阔应用前景受到各国的普遍关注。

从图象处理与模式识别发展起来的计算机视觉, 其主要目的是让计算机能够利用图象和图象序列来识别和认知三维世界, 最终目标是实现利用计算机对于三维景物的理解, 即实现人的视觉系统的某些功能。现在, 随着视觉传感器及计算机硬件设备的飞速发展和图象处理及投影理论的深入研究, 计算机视觉技术也得到长足发展。

笔者将介绍如何有效实时地进行障碍物的距离测量, 进而将实测结果与汽车安全行驶专家系统提供的“安全距离”进行比较, 若可能有“碰撞”发生, 则发出声光报警信号, 并用 LED 显示车与障碍物的距离, 提醒驾驶员注意, 避免危险。

1 测距算法概述

1.1 常用算法介绍

一提到把计算机视觉应用于智能辅助驾驶系统, 人们想到的是立体视觉的方法。该算法模仿人类利用双目视差感知距离的方法, 实现对三维信息的感知。具体说来, 即基于三角测量的方法, 运用两个摄像机对同一景物从不同位置成象, 并进而从视差中恢复距

离^[1,2]。

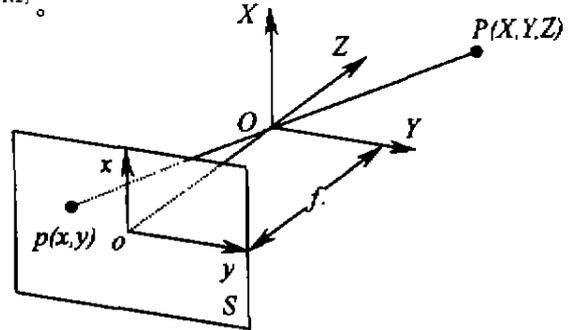


图1 系统的坐标系

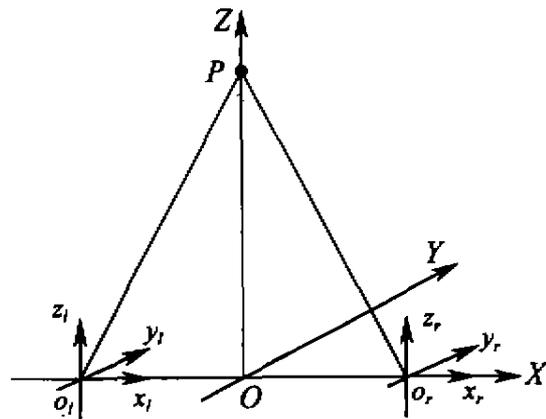


图2 立体视觉中左右摄像机的位置

图1表示了系统的坐标系。O - XYZ 为世界坐标

收稿日期: 1999-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (69674012)

作者简介: 黄席越 (1958-), 男, 四川奉节人, 重庆大学教授, 博导, 主要研究方向: 计算机视觉, 人工智能。

系, S 为图象平面, $o - xy$ 为图象坐标系, 摄像机的光轴是与地面平行. 因此, 对于空间中的任一点 $P(X, Y, Z)$, 其世界坐标 (X, Y, Z) 与图象坐标 (x, y) 存在着如下的关系(其中 f 表示焦距):

$$\begin{cases} x = f \frac{X}{Z} \\ y = f \frac{Y}{Z} \end{cases} \quad (1)$$

立体视觉中左右摄像机的放置和相应的各种坐标系如图 2 所示. 其中左右摄像机性能相同, 中心分别为 O_l 和 O_r , 其连线是 X 轴, Y 轴垂直于纸面, Z 轴与摄像机的光轴是平行的. 它们的坐标系原点均位于其中心处, 两摄像中心之间的距离 $O_l O_r$ 为 b . 在上述放置下, 根据前面推导的公式(1)可知, 空间中点 P 在左、右摄像机坐标系下存在如下关系:

$$x_l = f \frac{X_l}{Z} \quad x_r = f \frac{X_r}{Z}$$

其中, x_l 为物体 P 在左摄像机坐标系下的 x 坐标, x_r 为物体 P 在右摄像机坐标系下的 x 坐标, X_l 为物体 P 的象点在左摄像机坐标系下的 X 坐标, X_r 为物体 P 的象点在右摄像机坐标系下的 X 坐标, Z 为 P 点的 Z 坐标.

因为 $X_l - X_r = b$

则 $Z = \frac{fb}{(x_l - x_r)} \quad (2)$

1.2 常用算法的不足之处

把场景中障碍物 P 在左右图象上产生的一对象点称为共轭对. 由式(2)可知, 一旦求取了障碍物象点的坐标 x_l 和 x_r , 就可以确定原来障碍物的距离. 由于 x_l 从障碍物定位的结果可知, 现在问题的关键就是 x_r 的求解. 因此, 使用立体视觉方法求解距离的关键就是找出一幅(左或右)图象在另一幅(右或左)图象中的共轭点, 这一问题一般称为图象匹配问题.

常用的匹配算法有模板匹配法、特征匹配法和频率域匹配法. 然而, 在三维场景投影为二维图象的过程中存在着畸变和噪声, 深度和不可见部分的信息被丢失了, 因而产生了同一物体在不同视角下的图象会有极大的不同, 以及后面的物体被前面的物体遮挡而丢失特征信息等问题, 这些都将增大图象配准的难度. 为此, 人们提出了三目配准的方法, 即同时摄取物体的三

幅图象, 从而增加景物的信息量和配准的约束条件, 简化配准问题. 但是, 如果同时采用三个摄像机, 将大大地增加整个测距系统的成本, 其系统的安装和图象的同步采集等技术的难度也大大增加. 因此, 在现阶段还不易达到实用化.

另一方面, 更重要的是, 无论是双目还是三目测距算法, 测量的都是障碍物与自身的直线距离, 而这并不是所期望的. 如图 3 和图 4 所示, 汽车 A 发现了前方的障碍物 B , 用常用的立体视觉算法求出的是 AB 的直线距离, 而实际需要测量的距离应该是 AB 间的弧线距离. 为此, 必须对算法予以改进.

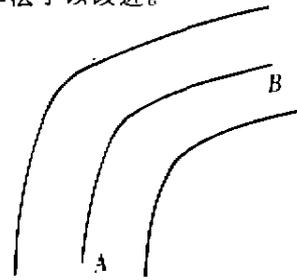


图 3 汽车进入弯道(俯视图)

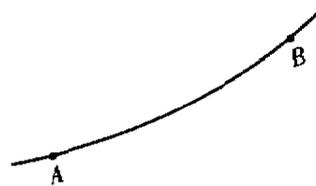


图 4 汽车进入坡道(侧视图)

2 道路边缘线的几何约束关系^[3,4]

假设在世界坐标系中, 道路左右边缘点的集合分别为 $(X_l(s), Y_l(s), Z_l(s))$ 和 $(X_r(s), Y_r(s), Z_r(s))$, 而在图象坐标下, 两边缘点的集合分别为 $(x_l(s), y_l(s), z_l(s))$ 和 $(x_r(s), y_r(s), z_r(s))$ 由投影公式得

$$\begin{cases} X_e = \frac{x_e Z_e}{f} \\ Y_e = \frac{y_e Z_e}{f} \end{cases} \quad (e = l, r) \quad (3)$$

等式两边求导可得:

$$\begin{cases} \dot{X}_e = \frac{1}{f}(Z_e \dot{x}_e + x_e \dot{Z}_e) \\ \dot{Y}_e = \frac{1}{f}(Z_e \dot{y}_e + y_e \dot{Z}_e) \end{cases} \quad (e = l, r) \quad (4)$$

从图 5 中不难发现, 在世界坐标系中, 道路的左右边缘上任意的两个对应点 P, Q 的连线 PQ 与他们的切线方向 \dot{P}, \dot{Q} 互相垂直(无论道路边缘是直线还是弧线均满足), 即存在着如下的几何约束关系:

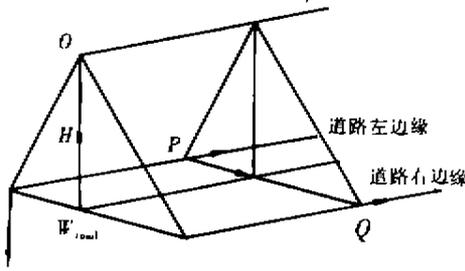


图5 道路边缘集约束关系示意图

$$(P, PQ) = 0; (\dot{Q}, PQ) = 0; \|PQ\| = W_{road}$$

其中向量

$$PQ = (u_1, u_2, u_3), \text{ 且 } \begin{cases} u_1 = X_l - X_r \\ u_2 = Y_l - Y_r \\ u_3 = X_l - Z_r \end{cases}; W_{road}$$

为道路宽度。

代入上式可得：

$$u_1 \dot{X}_e + u_2 \dot{Y}_e + u_3 \dot{Z}_e = 0 \quad (e = l, r) \quad (5)$$

$$u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 = W_{road}^2 \quad (6)$$

对公式(5),将公式(3)、(4)分别代入即得：

$$\begin{aligned} & \frac{(x_l Z_l - x_r Z_r)}{f} \times \frac{1}{f} (Z_e \dot{x}_e + x_e \dot{Z}_e) + \\ & \frac{(y_l Z_l - y_r Z_r)}{f} \times \frac{1}{f} (Z_e \dot{y}_e + y_e \dot{Z}_e) + \\ & (Z_l - Z_r) \times \dot{Z}_e = 0 \end{aligned}$$

化简可得：

$$\dot{Z}_e = \frac{(x_l Z_l - x_r Z_r) \times Z_e \dot{x}_e + (y_l Z_l - y_r Z_r) \times Z_e \dot{y}_e}{(x_l Z_l - x_r Z_r) \times x_e + (y_l Z_l - y_r Z_r) \times y_e - f^2 \times (Z_l - Z_r)} \quad (e = l, r) \quad (7)$$

(6)、(7)式即为道路边缘线的几何约束方程。下面,从两式出发,具体推导出单目测距算法,求得障碍物的距离。

3 单目测距算法的实现

如图6,圆弧CE和圆弧DF(它们共圆心O,圆心角为θ)分别表示汽车行驶车道的左右边缘,两者互相平行;A、B两点分别表示系统位置和障碍物位置。前

面已经提到,障碍物的距离应是AB间的弧长,而不是AB两点的直线距离。易知下面的几何关系成立：

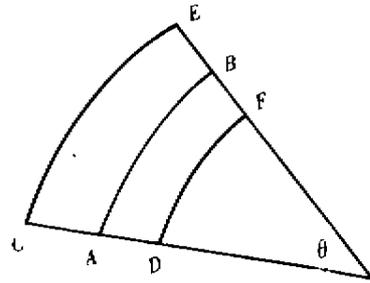


图6 道路示意图

$$\begin{cases} OD \times \theta = l_{DF} \\ (OD + AD + CA) \times \theta = l_{CE} \\ (OD + AD) \times \theta = l_{AB} \end{cases} \quad (8)$$

其中,直线CD垂直于弧CE和DF,直线EF垂直于弧CE和DF; l_{AB} 、 l_{CE} 、 l_{DF} 分别表示AB、CE和DF的弧长, d_{CA} 、 d_{AD} 分别表示CA与AD的长度。

联立求解(8)式可得：

$$l_{AB} = l_{DF} + \frac{l_{CE} - l_{DF}}{d_{AD} + d_{CA}} \times d_{AD} \quad (9)$$

因此,问题的关键就转化为 l_{CE} 与 l_{DF} 的求解了。具体算法分为如下两个步骤：

1) 道路边缘对应点求取

由公式(7)可知：

$$\begin{aligned} \dot{Z}_l &= \frac{(x_l Z_l - x_r Z_r) \times Z_l \dot{x}_l + (y_l Z_l - y_r Z_r) \times Z_l \dot{y}_l}{(x_l Z_l - x_r Z_r) \times x_l + (y_l Z_l - y_r Z_r) \times y_l - f^2 \times (Z_l - Z_r)} \\ \dot{Z}_r &= \frac{(x_r Z_r - x_l Z_l) \times Z_r \dot{x}_r + (y_r Z_r - y_l Z_l) \times Z_r \dot{y}_r}{(x_r Z_r - x_l Z_l) \times x_r + (y_r Z_r - y_l Z_l) \times y_r - f^2 \times (Z_l - Z_r)} \end{aligned}$$

分别进行数值积分, $Z_l(k+1) = Z_l(k) + \dot{Z}_l(k) \times h_l$, $Z_r(k+1) = Z_r(k) + \dot{Z}_r(k) \times h_r$, 其中k表示第k个边缘点, h_l 、 h_r 分别表示第k个左右边缘线积分的步长。

需要注意的是,在公路的直线段, h_l 、 h_r 自然是相等的,但在公路的弧形段,内外弧的积分步距不相等,应根据公式(6)来确定。

因为 $l_{CE} = \int_C^E \|\dot{X}_i(s), \dot{Y}_i(s), \dot{Z}_i(s)\| ds$, 将公式

(4) 代入进行数值积分, 可得:

$$l_{CE} = \sum_{i=1}^n \left\| \left(\frac{1}{f} (Z_i(i) \dot{x}_i(i) + x_i(i) \dot{Z}_i(i)) + x_i(i) \dot{Z}_i(i), \frac{1}{f} (Z_i(i) \dot{y}_i(i) + y_i(i) \dot{Z}_i(i)) + y_i(i) \dot{Z}_i(i), \dot{Z}_i(i) \right) \right\| \times h_i(i)$$

其中第 1 和 n 个边缘点分别为 C 、 E 。

同理, 可求出 l_{DE} 。

在实际应用中, 常会遇到多段弯道的情况。这时, 只需按弯道自然分段求解即可。

4 公路实验结果

本系统在渝长高速公路上用 100 km/h 的速度进行实验, 其结果如表 1 所示。

表 1 系统与障碍物在不同间距下的计算偏差

计算得到的距离/m	实际间距*/m	偏差/%
42.5	40	6.25
63.5	60	5.67
84.1	80	5.125
106.8	100	6.8
126.1	120	5.083
141.6	150	5.6
196.6	180	9.2
242.0	200	21

* 地面预先划好的间距

5 结论

以上实验数据证明, 在 60m 以内, 计算所得的平均误差小于 5%; 在 60 m 以外 150 m 以内, 由于数值积分的累积误差的影响, 计算误差有一定的增加, 但不会超过 7%, 这都在汽车安全距离之内。由此可见, 笔者提出的实时算法精度达到了实用化的要求。

为了进一步提高障碍物距离的测量精度, 一方面, 需要在保证计算速度的前提下, 提高数值积分的精度; 另一方面, 需要进一步研究道路的几何模型, 找出更多的约束条件, 进而提高每一步的计算精度。

参 考 文 献

- [1] 高文, 陈熙霖. 计算机视觉—算法与系统原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. 20-59.
- [2] KENNETH R. Castleman, Digital Image Processing[M]. U.S.: Prentice Hall, Inc, a Simon & Schuster Company, 1996. 387-440.
- [3] ANTONIO GUIDUCCE. Parametric Model of the Perspective Projection of a Road with Applications to Lane Keeping and 3D Road Reconstruction[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1998, 73(3): 414-427.
- [4] DICKMANN S E D, MYSLIWETZ B D. Recursive 3-D road and relative ego-state recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 199-213.

The Research on Monocular Measurement of the Distance Based on Geometrical Model of the Road

HUANG Xi-yue, WANG Xian-ju, CHAI Yi, ZHOU Xin, HUANG Han-ming

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: This article discusses the geometrical inter-limited relation of edges of both sides on base of the investigation on the recognition of obstacle ahead and the geometrical model of the high way, analyzes the traditional methods of measuring distance by multinocular vision, and presents a real-time and efficient calculation method which makes use of computer vision theory to realize the measurement of the distance of a obstacle in the high way by monocular vision. As the experiments show, the system has a good real-time property, high accuracy so as to measure up to the practical requirement.

KEYWORDS: computer vision; linear project; monocular measurement of distance; geometrical model; numerical integration

(责任编辑 吕赛英)