

# 基于单目视觉的实时测距方法研究

郭磊 徐友春 李克强 连小珉

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要** 为了利用单目视觉实时监测本车与前方障碍物之间的距离,在比较了现有的几类用于车辆控制的道路深度信息获取方法的基础上,首先研究了较为适用于汽车自动驾驶的几何关系推导法,进而提出了基于单目视觉的实时测距算法。通过试验可知,由于摄像机的俯仰角是影响实时测距算法的关键因素,因此又提出了基于道路边界平行约束条件的实时计算摄像机俯仰角算法。静态实车试验的结果显示,该基于单目视觉的实时测距算法具有较高的准确性,可以满足测距要求,而动态实车试验的结果则显示,此算法还可以满足汽车智能化控制的实时性要求。

**关键词** 单目视觉 深度信息 边界约束条件 实时测距

中图分类号: TP242.62 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)01-0074-08

## Study on Real-time Distance Detection Based on Monocular Vision Technique

GUO Lei, XU You-chun, LI Ke-qiang, LIAN Xiao-min

(Tsinghua University, State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Beijing 100084)

**Abstract** This paper dedicates to develop an algorithm which can be used to detect the real-time distance between the own car and the obstacle ahead. On the basis of comparing several existing methods, this paper uses the geometrical reasoning method to obtain the depth information of the driving environment for the vehicle control, and presents a real-time monocular-vision-based algorithm to get the distance between the own car and the obstacle ahead. The pitch angle of the camera is the key factor which affects the precision of the distance detection. This conclusion is drawn from the experimental results. In order to get the real pitch angle of the camera, the constraint that the two lane boundaries are parallel is used in the algorithm. The results of the static real-car tests show that the algorithm presented in this paper satisfies the precision requirements of the distance detection. And the results of the dynamic real-car tests show that the algorithm also satisfies the real-time requirements for the intelligent vehicle control.

**Keywords** monocular vision, depth information, boundary restriction, real-time distance detection

## 1 引言

随着智能车辆(intelligent vehicle, IV)的发展,现代汽车智能化程度不断提高,利用机器视觉(machine vision)实现汽车自动驾驶也逐步成为世界各国研究的热点之一<sup>[1-5]</sup>。通过机器视觉获取环境信息,进而对汽车进行控制是实现汽车智能化的

重要途径之一,而利用单目视觉(monocular vision)系统来实时监测本车与前方障碍物的距离则可以为汽车智能化纵向控制提供输入参数。

摄像机拍摄到的场景图像是3维空间的场景在2维空间的投影,而在利用机器视觉对道路情况进行识别的过程中,则需要一种逆的求解过程,即从2维图像还原成路面图像。这个过程就是道路深度信息的获取。目前单目视觉系统一般采用对应点标定

基金项目:国家“十五”科技攻关计划项目(2002BA404A21)

收稿日期:2004-09-16;改回日期:2005-03-17

第一作者简介:郭磊(1980~),男,1998年获清华大学汽车工程系工学学士学位,现为清华大学汽车工程系博士研究生。主要从事基于机器视觉的智能汽车信息获取及车辆控制方面的研究。E-mail: guolei@tsinghua.org.cn

法来获取图像的深度信息,对应点标定法是指通过不同坐标系中对应点的对应坐标求解坐标系的转换关系<sup>[3-13]</sup>。但对应点标定法,在标定过程中,由于受器材限制,仍无法做到十分精确地记录一个点在世界坐标系和图像坐标系中的对应坐标。如果其坐标不够精确,那么得到的转换矩阵的精确度也会受到制约,坐标转换结果的精度也会因此而波动。由于对应点标定法对于摄像机的标定是在摄像机的各个角度及高度已经确定的情况下进行的,当摄像机的任何一个参数发生变化时,都要重新进行标定,以得到在该种具体情况下的转换矩阵,所以该方法仅适用于位置固定的摄像机的情况,而对于应用在智能汽车上的摄像机来说,由于汽车行驶过程中会有颠簸,致使摄像机的参数发生变化,所以适用性受到了限制。

本文中所采用的几何关系推导法较好地解决了

对应点标定法的不足。它是根据摄像机投影模型,通过几何推导来得到路面坐标系和图像坐标系之间的关系。基于几何关系推导法,本文提出了利用单目视觉监测本车与前方障碍物之间距离的实时测距算法。由于试验分析表明摄像机的俯仰角对算法的精度有很大的影响,因此本文提出了利用道路边界平行约束条件来实时计算摄像机的动态俯仰角度的算法,其可以获取较为准确的道路深度信息,并已通过静态实车试验和动态实车试验验证了算法的准确性和实时性。

## 2 几何关系推导法理论模型

根据小孔成像模型,可以将单目视觉系统简化为摄像机投影模型(如图 1 所示)。

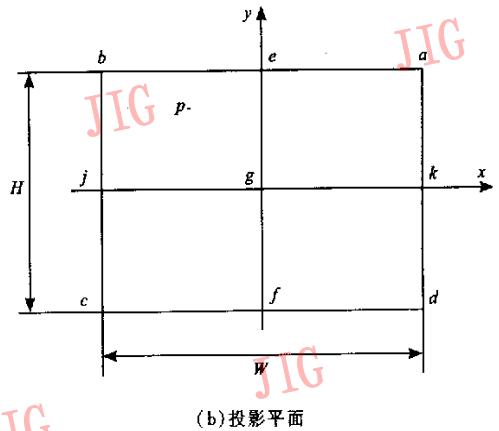
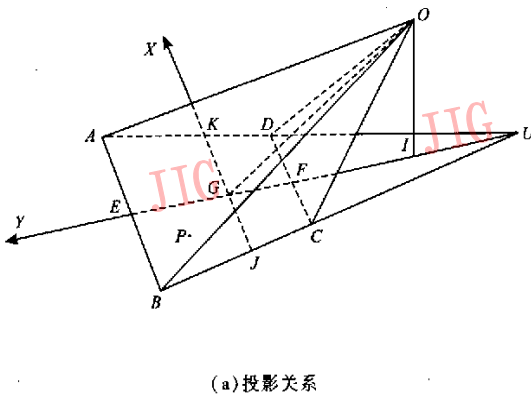


图 1 摄像机投影模型

Fig. 1 Camera projection model

图 1(a)中,平面  $ABU$  代表路面,  $ABCD$  为摄像机拍摄到的路面上的梯形区域,  $O$  点为摄像机镜头中心点,  $OG$  为摄像机光轴,  $G$  点为摄像机光轴和路面的交点(同时也是视野梯形的对角线交点),  $I$  点为  $O$  点在路平面上的垂直投影。在路面坐标系中,将  $G$  点定义为坐标系原点,车辆前进方向定义为  $Y$  轴方向。  $G, A, B, C, D$  各点在图像平面内的对应点如图 1(b)所示,  $a, b, c, d$  为像平面矩形的 4 个端点,  $H$  和  $W$  分别为像平面的高和宽。定义图像矩形的中点  $g$  为像平面坐标系的坐标原点,  $y$  轴代表车辆前进方向。

取路平面上一点  $P$ , 其在路平面坐标系的坐标

为  $(X_p, Y_p)$ ,  $P$  点在图像平面内的对应点为  $p$ , 其在像平面坐标系的坐标为  $(x_p, y_p)$ 。

利用几何关系可以推导出如下路面坐标与图像坐标之间的对应关系:

$$\begin{cases} Y_p = h \cdot k_1 \cdot y_p \cdot \frac{1 + k_2^2}{1 - k_2 \cdot k_1 \cdot y_p} \\ X_p = \frac{UG + Y_p}{UG \cdot k_3 \cdot x_p \cdot k_4} \\ y_p = \frac{Y_p / k_1}{h + h \cdot k_2^2 + Y_p \cdot k_2} \\ x_p = \frac{UG \cdot X_p}{k_3 \cdot k_4 \cdot (UG + Y_p)} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,

$$\begin{cases} k_1 = 2\text{tg}(\alpha_0)/H \\ k_2 = \text{tg}(\gamma_0) \\ k_3 = h/\cos(\gamma_0) \\ k_4 = 2\text{tg}(\beta_0)/W \\ UG = \frac{h \cdot (\text{tg}(\gamma_0) - \text{tg}(\gamma_0 - \alpha_0)) \cos(\gamma_0 - \alpha_0)}{\cos(\gamma_0 - \alpha_0) - \cos(\gamma_0)} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $H$ 为图像的高; $W$ 为图像的宽; $h$ 为摄像机的安装高度; $2\beta_0$ 为摄像机镜头的水平视野角; $2\alpha_0$ 为摄像机镜头的垂直视野角; $\gamma_0$ 为摄像机的俯仰角。

式(1)的前两式为像平面到路平面的映射关系;后两式为路平面到像平面的逆映射关系。

具体推导过程请参见附录。

### 3 实时测距算法

本文提出了一种基于单目视觉的实时测距算法。设本车与前方障碍物的真实距离为 $d_1$ ,用算法计算得到的本车与前方障碍物的距离为 $d_c$ 。 $d_c = d_1 + d_2$ ,其中 $d_1$ 为摄像机最近视野到本车前端的距离, $d_2$ 是由图像上得到的最近视野与障碍物的距离。

求解 $d_2$ 的方法如下:

(1)通过 CCD camera 得到视野前方图像;  
(2)通过障碍物识别算法识别出图像中的障碍物,并用矩形框将其标记出来;

(3)求取该矩形框底边中点的图像平面坐标 $u_1, v_1$ ;

(4)求取图像平面底边中点的图像平面坐标 $u_2, v_2$ ;

(5)将图像平面坐标 $u_1, v_1, u_2, v_2$ 通过前文提到的几何关系推导成道路平面坐标 $x_1, y_1, x_2, y_2$ ;

$$(6) d_2 = ((y_1 - y_2)^2 + (x_1 - x_2)^2)^{0.5}$$

影响本算法结果精度的因素有以下两点:一是摄像机的高度是否准确;另一个就是摄像机的俯仰角是否准确。固定摄像机的俯仰角 $89.7^\circ$ 不变,通过改变摄像机的高度(其他参数不变)得到的距离变化数据如表 1 所示。

表 1 随高度变化的距离数据  
Tab.1 Distance changing with height

高度(m)	1.11	1.16	1.21	1.26	1.31
距离(m)	27.8922	28.9730	30.0537	31.1344	32.2152

固定摄像机的高度 1.21m 不变,通过改变摄像机的俯仰角(其他参数不变)得到的距离变化数据如表 2 所示。

表 2 随俯仰角变化的距离数据  
Tab.2 Distance changing with pitch angle

俯仰角( $^\circ$ )	89.5	89.6	89.7	89.8	89.9
距离(m)	27.5799	28.7627	30.0537	31.4682	33.0244

当摄像机高度变化范围为 20cm 时,测距变化为 4.323m,当摄像机俯仰角变化范围为 $0.4^\circ$ 时,测距变化为 5.4445m。由此可见,摄像机高度对距离求解的影响很小,而俯仰角则对距离求解起关键作用,它在很大程度上制约着求解本车与障碍物之间距离的准确性。

在实际道路环境中,由于车道标志线是平行线,故可先利用机器视觉算法来获得图像平面中车道标志线,再利用式(1)计算图像中车道标志线所对应的道路平面上的直线。理论上讲,虽然计算出的路面车道线应该平行,但由于车辆在行驶过程中存在俯仰运动,摄像机的实际俯仰角会发生变化,因此,利用初始化时标定好的摄像机俯仰角计算出的路面上的车道线将不再平行,本文提出的算法即是利用路面车道线平行的约束条件来求解摄像机俯仰角。

设求解摄像机实际俯仰角的指标函数为

$$S = (k_{\text{left}} - k_{\text{right}})^2 \quad (3)$$

式(3)中, $k_{\text{left}}$ 为道路坐标系中左侧道路标志线的斜率, $k_{\text{right}}$ 为道路坐标系中右侧道路标志线的斜率。下面以左侧道路标志线为例来描述斜率的求解过程:

首先利用道路标志线识别算法识别出图像中的两条车道线,然后取识别出的左侧道路标志线上两点 $a, b$ ,其坐标分别为 $(u_a, v_a), (u_b, v_b)$ ,点 $a, b$ 在道路平面内的对应点为 $A, B$ ,其坐标分别为 $(X_A, Y_A), (X_B, Y_B)$ 。

由几何关系推导法,可以得到

$$Y_A = h \cdot k_1 \cdot v_a \cdot \frac{1 + k_2^2}{1 - k_2 \cdot k_1 \cdot v_a} \quad (4)$$

$$X_A = \frac{UG + Y_A}{UG \cdot k_3 \cdot u_a \cdot k_4} \quad (5)$$

$$Y_B = h \cdot k_1 \cdot v_b \cdot \frac{1 + k_2^2}{1 - k_2 \cdot k_1 \cdot v_b} \quad (6)$$

$$X_B = \frac{UG + Y_B}{UG \cdot k_3 \cdot u_b \cdot k_4} \quad (7)$$

式(4)~式(7)中符号的意义可参见前文。

道路坐标系中左侧道路标志线的斜率  $k_{left}$  的计算公式为

$$k_{left} = \frac{Y_B - Y_A}{X_B - X_A} \quad (8)$$

因为  $k_2, k_3, HC$  是俯仰角的函数,在其他摄像机相关参数都固定不变,只有俯仰角变化的情况下,  $X_A, Y_A, X_B, Y_B$  均可看作俯仰角  $\gamma_0$  的函数,由此可得,左侧道路标志线的斜率  $k_{left}$  是变量俯仰角  $\gamma_0$  的函数。同理可以得到,右侧道路标志线的斜率  $k_{right}$  也是变量俯仰角  $\gamma_0$  的函数。 $k_{right}$  的求解过程可由  $k_{left}$  的求解过程类似得到。

至此,函数  $S$  可以视为单一变量俯仰角的函数,并有

$$S = f(\gamma_0) \quad (9)$$

若将函数  $S$  对俯仰角  $\gamma_0$  求导,则导数为 0 时的  $\gamma_0$  值即为所求的实际俯仰角。

### 4 算法试验验证及结果分析

#### 4.1 静态实车试验结果及分析

静态实车试验中,令汽车和障碍物都静止,以便于精确测量本车和障碍物之间的真实距离  $d_r$ 。

本文所使用的机器视觉系统的硬件包括:

(1)计算机 CPU 为 AMD 1.6GHz,128M 内存;

(2)Color CCD Camera,128 倍变焦(8 倍数字变焦,16 倍光学变焦),分辨率为 1/4 inch。摄像机的垂直视野角为  $32^\circ$ ,摄像机的水平视野角为  $47^\circ$ ;

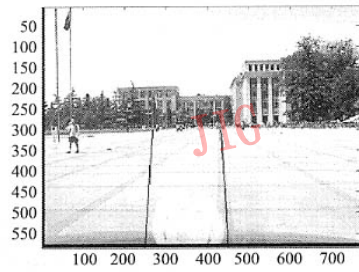
(3)DH-CG300 图像采集卡,其分辨率为:768 × 576 × 24bit。

试验前,首先测量以下摄像机参数:高度  $h$ 、俯仰角  $\gamma_0$ 、摄像机最近视野到本车前端的距离  $d_1$ 、本车到障碍物的真实距离  $d_r$ 。

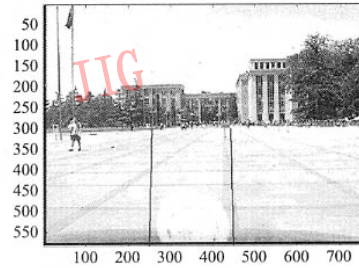
本文用 MATLAB 实现了该算法。在实车试验中,俯仰角测定在  $88^\circ \sim 90^\circ$  之间,取步长为  $0.1^\circ$ 。截取本程序比较分析过程中得到的几幅图像如图 2 所示。

最后计算得到的精确俯仰角为  $89.7^\circ$ ,本车与前方障碍物的距离为 30.0537m,即  $d_c = 30.0537m$ ,其与真实距离  $d_r = 25.2m$  有一定误差。

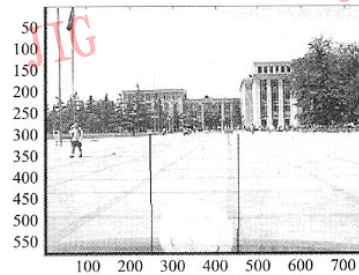
产生误差的原因有以下两点:一是由于利用几何关系推导法将图像还原到路面的过程存在误差,即原本平行的道路边界,经过几何关系推导法还原



(a)假定摄像机俯仰角为  $88^\circ$  时的道路边界还原情况



(b)假定摄像机俯仰角为  $89^\circ$  时的道路边界还原情况



(c)假定摄像机俯仰角为  $90^\circ$  时的道路边界还原情况

图 2 假定摄像机俯仰角分别为  $88^\circ, 89^\circ, 90^\circ$  时的道路边界还原情况

Fig. 2 Lane boundaries reversion (assume pitch angle  $88^\circ, 89^\circ, 90^\circ$ )

后,在路面坐标系中并不平行,所以利用该方法得到的摄像机俯仰角并不精确,同时也导致最后得到的距离值不准确;二是理论推导时,认为镜头是理想的光学器件,实际上镜头总有一定的误差,但这种误差是系统误差,可以通过校正进行解决。

#### 4.2 误差校正

上一小节中,由于利用道路边界平行的约束条件得到的本车与前方障碍物之间的距离与实际值存在一定误差,且利用道路边界平行的约束条件得到的俯仰角度比真实值大,因此根据试验结果,决定将求得的俯仰角度值分别减去  $0.3^\circ, 0.4^\circ, 0.5^\circ$ ,以检

验校正结果。

上一小节中,计算得到的俯仰角为  $89.7^\circ$ ,本车与前方障碍物的距离为  $30.0537\text{m}$ 。校正结果对比如表 3 所示。

表 3 校正结果对比  
Tab.3 Revised results contrast

校正 $0.3^\circ$	校正 $0.4^\circ$	校正 $0.5^\circ$	真实距离
26.4926 m	25.4898m	24.5621m	25.2m

可见,俯仰角为  $89.3^\circ$ 时(即校正  $0.4^\circ$ )求得的

距离为  $25.4898\text{m}$ ,与实际距离  $d_r = 25.2\text{m}$  最为接近,所以本文选择校正  $0.4^\circ$ 作为最终结果。

为了进一步验证此校正方法的准确度,又进行了一次静态实车试验,试验参数为:摄像机高度  $h = 1.21\text{m}$ ,摄像机最近视野到本车前端的距离  $d_1 = 4.1\text{m}$ ,本车与前方障碍物之间的距离依次递增至  $10\text{m}, 20\text{m}, 30\text{m}, 40\text{m}, 50\text{m}, 60\text{m}$ 。利用本文算法求得的俯仰角为  $90.8^\circ$ ,校正后为  $90.4^\circ$ 。摄像机识别的障碍物图像及测距结果如图 3 和表 4 所示,图中矩形框内的行人即视为障碍物。

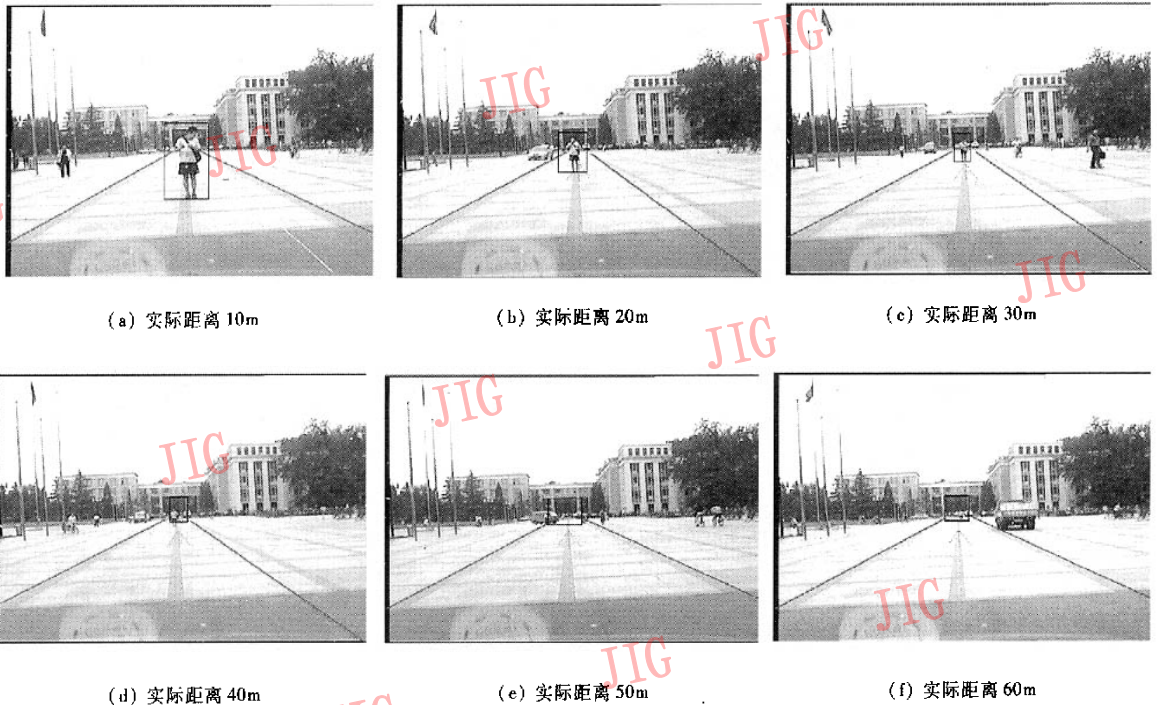


图 3 摄像机识别的障碍物图像

Fig.3 Obstacle identification

表 4 测距结果  
Tab.4 Distance detection result

实际距离 $d_r$ (m)	计算距离 $d_c$ (m)	误差 (%)
10	10.5820	5.82
20	20.3057	1.53
30	29.5519	1.49
40	40.5822	1.46
50	49.8607	0.28
60	58.8104	1.98

试验结果显示,用经过误差校正之后的实时测距算法测距时,当本车与障碍物的实际距离在

$20\text{m} \sim 60\text{m}$ 的范围内,其测距误差可控制在  $2\%$ 之内,当实际距离为  $10\text{m}$ 时,误差稍大,达  $5.82\%$ 。在实际距离为  $10\text{m} \sim 50\text{m}$ 的范围内,其距离真实值和测量值之间相差不超过  $1\text{m}$ 。这表明在通常的测距范围( $10\text{m} \sim 60\text{m}$ )内,本文提出的算法可以满足利用机器视觉进行障碍物检测和距离计算的准确性要求。

#### 4.3 动态实车试验

为验证算法的实时性,还进行了动态实车试验。试验中采用的摄像机其拍摄速率约为  $25$  帧/s,试验结果表明,由于利用本文提出的实时测距算法配合道路标志线识别算法、障碍物识别算法可以对采集

到的每一幅图像进行车道线识别、障碍物识别以及本车与前方障碍物距离测量,且 3 种算法的计算时间总和均控制在 40ms 以内,因此可以满足智能车辆控制的实时性要求。

试验地点为北京四环路,截取部分试验数据见表 5。

表 5 动态实车试验数据

Tab.5 Data of dynamic real-car tests

左斜率	左截距 (pixels)	右斜率	右截距 (pixels)	俯仰角 (°)
0.3640	50.0000	0.6249	320.000	90.6000
0.3640	50.0000	0.6249	319.000	90.7000
0.3640	50.0000	0.6249	319.000	90.4000
0.3640	51.0000	0.5543	298.000	90.7000
0.3640	51.0000	0.5317	289.000	90.8000
0.3640	50.0000	0.5543	294.000	90.9000
0.3640	50.0000	0.6009	311.000	90.7000

表 5 中的每行数据为道路图像经过机器视觉识别算法得到的车道线直线方程的参数,俯仰角指利用实时检测算法得到的摄像机实际俯仰角度值。

从表 5 数据可以看到,当汽车在平直路面上行驶时,摄像机俯仰角变化范围是  $90.4^\circ \sim 90.9^\circ$ ,校正之后为  $90^\circ \sim 90.5^\circ$ ,这样对道路图像上的同一点,求解得到的其实际距离变化为  $32.9137\text{m} \sim 43.1067\text{m}$ ,可

见变化了 10m,从而再次证明了摄像机俯仰角的实时求解对于单目视觉测距算法的重要性。

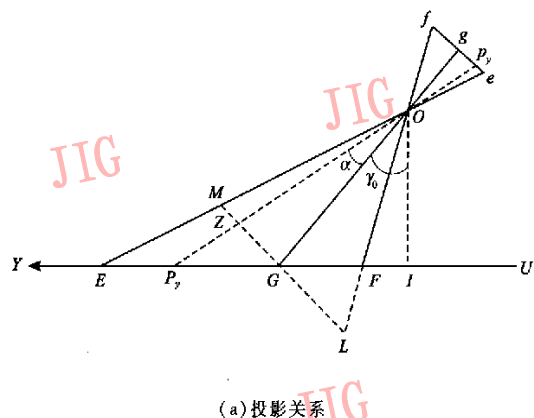
### 5 结 论

本文提出了一种利用单目视觉系统获得深度信息来进行本车和前方障碍物距离测量的算法,针对影响该算法准确性的关键因素——摄像机俯仰角,本文提出了一种可以实时计算摄像机动态俯仰角的算法,它可通过道路平行约束条件来实时计算车载摄像机的俯仰角。静态和动态实车试验证明,本文提出的算法可以满足智能车控制应用中的准确性和实时性要求。

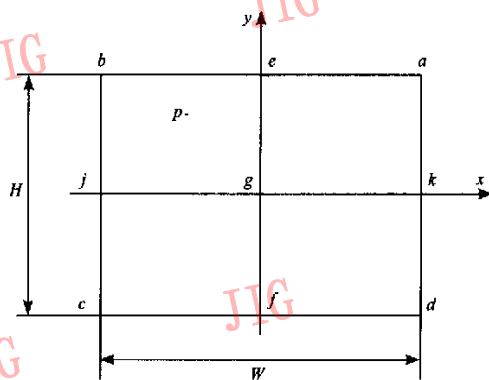
### 附录:

式(1)、式(2)的推导过程如下:

首先推导 Y 轴方向的成像模型。图 4 中,摄像机光轴所在的与路面相垂直的平面为  $OEI$ 。图中各字符与图 1 对应字符含义相同。直线  $ML$  与直线  $OG$  垂直,与直线  $fF$  的延长线相交于点  $L$ 。点  $p$ , 表示像平面上的点  $p$  在直线  $ef$  上的投影, $P_y$  点是路面上的点  $P$  在视野纵向对称线上的投影, $Z$  是直线  $p, P_y$  与直线  $ML$  的交点。



(a) 投影关系



(b) 投影平面

图 4 Y 轴方向成像模型

Fig.4 Imaging model at Y direction

下面推导从像平面的点  $p = (x_p, y_p)$  到对应点  $P = (X_p, Y_p)$  间的关系式。

假定摄像机镜头的水平视场角为  $2\beta_0$ ,垂直视

场角为  $2\alpha_0$ ,摄像机的俯仰角为  $\gamma_0$ ,由此可得:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{2 \cdot y_p \cdot \tg(\alpha_0)}{H}\right) \quad (10)$$

线段  $OG = \left(\frac{h}{\cos\gamma_0}\right)$  (11)

线段  $IG = h \cdot \text{tg}\gamma_0$  (12)

线段  $IP_y = h \cdot \text{tg}(\gamma_0 + \alpha)$  (13)

线段  $GP_y = IP_y - IG$  (14)

在路面坐标系中,由于线段  $GP_y$  的长度就是点  $P$  的坐标  $Y_p$  值,因此

$$Y_p = h(\text{tg}(\gamma_0 + \alpha) - \text{tg}\gamma_0) \quad (15)$$

根据三角函数,式(15)可变形为

$$Y_p = h \cdot \text{tg}\alpha \left(\frac{1 + \text{tg}^2\gamma_0}{1 - \text{tg}\gamma_0 \cdot \text{tg}\alpha}\right) \quad (16)$$

令  $\frac{2 \cdot \text{tg}\alpha_0}{H} = k_1, \text{tg}\gamma_0 = k_2$ , 则有

$$Y_p = h \cdot k_1 \cdot y_p \left(\frac{1 + k_2^2}{1 - k_2 \cdot k_1 \cdot y_p}\right) \quad (17)$$

式(17)即为从像平面到路平面的纵向映射关系,其反函数为

$$y_p = \frac{Y_p}{k_1(h + h \cdot k_2^2 + Y_p \cdot k_2)} \quad (18)$$

式(18)即表示了从路平面到像平面的逆映射关系。

另外,推导  $X$  坐标的映射关系,要利用上面导出的  $Y$  轴坐标的映射关系。在道路平面上,  $P$  点的  $X$  坐标与  $Y$  坐标关系如图 5 所示,图中各符号含意与图 1 相同。

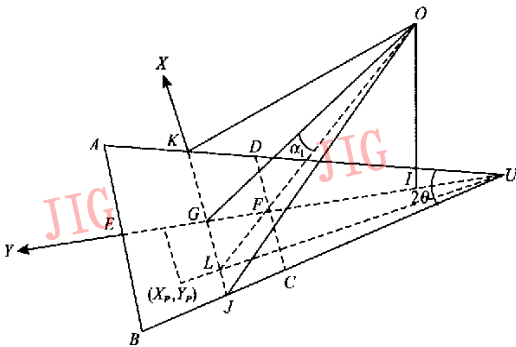


图 5 X 轴方向成像模型  
Fig. 5 Imaging model at X direction

下面导出像平面与道路平面上对应点的  $X$  坐标的映射关系:

在  $\Delta IGO$  中,

$$IG = h \cdot \text{tg}\gamma_0, IF = h \cdot \text{tg}(\gamma_0 - \alpha_0)$$

由此可得

$$CF = h(\text{tg}\gamma_0 - \text{tg}(\gamma_0 - \alpha_0)) \quad (19)$$

$$OG = \left(\frac{h}{\cos\gamma_0}\right), OF = \left(\frac{h}{\cos(\gamma_0 - \alpha_0)}\right)$$

故有

$$GJ = \frac{h}{\cos\gamma_0} \cdot \text{tg}\beta_0 \quad (20)$$

$$FC = \frac{h}{\cos(\gamma_0 - \alpha_0)} \cdot \text{tg}\beta_0 \quad (21)$$

由相似  $\Delta UFC$  和  $\Delta UGJ$  可得

$$\frac{FC}{GJ} = \frac{UF}{UG} \quad (22)$$

将式(19)、式(20)、式(21)代入式(22)即得

$$UG = \frac{\frac{h}{\cos\gamma_0} \cdot \text{tg}\beta_0 \cdot h[\text{tg}\gamma_0 - \text{tg}(\gamma_0 - \alpha_0)]}{\frac{h}{\cos\gamma_0} \cdot \text{tg}\beta_0 - \frac{h}{\cos(\gamma_0 - \alpha_0)} \cdot \text{tg}\beta_0} \quad (23)$$

化简式(23),得

$$UG = \frac{h[\text{tg}\gamma_0 - \text{tg}(\gamma_0 - \alpha_0)] \cdot \cos(\gamma_0 - \alpha_0)}{\cos(\gamma_0 - \alpha_0) - \cos\gamma_0} \quad (24)$$

在  $\Delta GOL$  中

$$GL = \frac{h}{\cos\gamma_0} \cdot \text{tg}\alpha_1 \quad (25)$$

由像平面中  $p = (x_p, y_p)$  点的位置关系,并利用对顶角关系可得

$$\alpha_1 = \text{arctg}\left(\frac{2 \cdot x_p \cdot \text{tg}\beta_0}{W}\right) \quad (26)$$

在道路平面  $ABU$  中,利用三角形相似关系可得

$$\frac{GL}{X_p} = \frac{UG}{UG + Y_p} \quad (27)$$

则有

$$\begin{aligned} X_p &= \frac{GL \cdot (UG + Y_p)}{UG} \\ &= \frac{(UG + Y_p)}{UG} \cdot \frac{h}{\cos\gamma_0} \cdot \text{tg}\alpha_1 \\ &= \frac{(UG + Y_p)}{UG} \cdot \frac{h}{\cos\gamma_0} \cdot \frac{2 \cdot x_p \cdot \text{tg}\beta_0}{W} \end{aligned}$$

上式可简化为

$$X_p = \frac{(UG + Y_p)}{UG} \cdot \frac{h}{\cos\gamma_0} \cdot \frac{2 \cdot x_p \cdot \text{tg}\beta_0}{W} \quad (28)$$

令  $\frac{h}{\cos\gamma_0} = k_3, \frac{2 \cdot \text{tg}\beta_0}{W} = k_4$ , 则有

$$X_p = \frac{(UG + Y_p)}{UG} \cdot k_3 \cdot x_p \cdot k_4 \quad (29)$$

式(29)即为像平面到路平面的横向映射关系,其逆函数(式(30))则表示了路平面到像平面的逆映射关系,即

$$x_p = \frac{UG}{(UG + Y_p) \cdot k_3 \cdot k_4} \cdot X_p \quad (30)$$

因此,图像平面坐标与路平面坐标之间的映射关系可以用下面一组公式表示:

$$\begin{cases} Y_p = h \cdot k_1 \cdot y_p \left( \frac{1 + k_2^2}{1 - k_2 \cdot k_1 \cdot y_p} \right) \\ X_p = \frac{(UG + Y_p)}{UG} \cdot k_3 \cdot x_p \cdot k_4 \\ y_p = \frac{Y_p}{k_1(h + h \cdot k_2^2 + Y_p \cdot k_2)} \\ x_p = \frac{UG}{(UG + Y_p) \cdot k_3 \cdot k_4} \cdot X_p \end{cases} \quad (31)$$

### 参考文献 (References)

- Richard Bishop. A survey of intelligent vehicle applications worldwide [A]. In: Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000 [C]. Dearborn, MI, USA, 2000; 25 ~ 30.
- XU You-chun. Study on integrative navigation method of intelligent vehicle based on machine vision and GPS [PhD Dissertation] [D]. Jilin: Jilin University, 2001. [徐友春. 智能车辆视觉与GPS综合导航方法的研究 [博士学位论文] [D]. 吉林: 吉林大学, 2001.]
- Masafumi Tsuji, Ryota Shirato, Hiroshi Furuhashi, et al. Estimation of road configuration and vehicle attitude by lane detection for a lane-keeping system [A]. In: SAE 2001 World Congress Intelligent Vehicle Initiative (IVI). Vehicle Navigation Systems (Part A&B) [C]. Detroit, Michigan, USA, 2001.
- Bellutta P, Manduchi R, Matthies L. Terrain perception for DEMO III [A]. In: Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000 [C], Dearborn, MI, USA, 2000; 326 ~ 331.
- Hiroshi Hattori. Stereo for 2D visual navigation [A]. In: Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000 [C], Dearborn, MI, USA, 2000; 31 ~ 38.
- Milan Sonka, Vaclav Hlavac, Roger Boyle. Image processing, analysis, and machine vision [M]. Pacific Grove, CA United States of America. Published by Brooks/Cole, A Division of Thomson Asia Pte Ltd, [Milan Sonka, Vaclav Hlavac Roger Boyle. 图像处理 [M]. 武勃译. 北京: 人民邮电出版社, 2001; 448 ~ 457.]
- LUO Fei-lu, FU En-xi. A fast and accurate calibration method of intrinsic and extrinsic parameters of CCD camera [J]. Journal of Hunan University, 1997, 24(2): 71 ~ 74. [罗飞路, 傅恩锡. CCD 摄像机内外部参数快速准确的标定方法 [J]. 湖南大学学报, 1997, 24(2): 71 ~ 74.]
- HUANG Hai-yun, QI Fei-hu. Accurate calibration of the parameters of camera by use of genetic algorithm [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(7): 948 ~ 951. [黄海滨, 戚飞虎. 利用遗传算法精确标定摄像机参数 [J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(7): 948 ~ 951.]
- YU Hong-chuan, WU Fu-chao, YUAN Bo, et al. Camera self-calibration technique based on active vision [J]. ROBOT, 1999, 21(1): 1 ~ 7. [于洪川, 吴福朝, 袁波, 等. 基于主动视觉的摄像机自标定方法 [J]. 机器人, 1999, 21(1): 1 ~ 7.]
- GAO Li-zhi, FANG Yong, LIN Zhi-hang. A new camera calibration technique for 3D machine vision metrology [J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(2): 12 ~ 14. [高立志, 方勇, 林志航. 立体视觉测量中摄像机标定的新技术 [J]. 电子学报, 1999, 27(2): 12 ~ 14.]
- YANG Chang-jiang, SUN Feng-mei, HU Zhan-yi. Planar conic based camera calibration [J]. Chinese Journal Computers, 2000, 23(5): 541 ~ 547. [杨长江, 孙凤梅, 胡占义. 基于平面二次曲线的摄像机标定 [J]. 计算机学报, 2000, 23(5): 541 ~ 547.]
- JIANG Jia-he, SONG Zi-shan, SHEN Wei-qun, et al. Constraint condition selection method in camera calibration [J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(4): 373 ~ 376. [江加和, 宋子善, 沈为群等. 摄像机标定中一种约束条件选择方法 [J]. 光学精密工程, 2000, 8(4): 373 ~ 376.]
- LUO Fei-lu, JI Tao, CHEN Di-xiang. Programmed correction of camera distortion [J]. Journal of National University of Defense Technology, 1997, 19(1): 77 ~ 82. [罗飞路, 姬涛, 陈棟湘. 一种摄像机成像误差的程序化修正方法 [J]. 国防科技大学学报, 1997, 19(1): 77 ~ 82.]