

文章编号:1004-4213(2011)12-1833-6

逆透视映射公式的误差分析及准确度验证

曹毓,冯莹,雷兵,杨云涛,赵立双

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院,长沙 410073)

摘 要:从数学上分析了目前普遍使用的逆透视映射公式的误差,给出重新推导的逆透视映射数学公式.设计实验验证了采用本文公式进行逆透视映射的效果,并与现有两公式的效果进行了比较.实验结果表明:无论相机内外参量如何变化,本文推导出的公式其 IPM 变换效果均好于现有公式.在相机架设高度等参量确定的条件下,采用改进后的公式,逆透视映射变换的相对误差平均为 0.85%,较现有的公式准确度有较大提高,能更好地满足智能导航和路面状况勘测等对近距离图像的逆透视映射变换应用要求.

关键词:图像处理;逆透视映射;智能导航;路面勘测

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114012.1833

0 引言

近年来,汽车自动驾驶技术及智能机器人技术在国内外逐渐成为研究的热点,相机作为一种高性价比的被动光学传感器,在该领域获得了广泛应用.它可感知运动平台所处的路面和周围的环境状况,进而用于指导平台自身的运动^[1-12]或用于路况信息的收集工作^[13].相机拍摄到的图像是世界坐标系下的 3 维景物在 2 维像平面上的投影,该过程在物理上可用小孔成像模型近似,在数学上则是一个透视映射过程,其逆过程称为逆透视映射 (Inverse Perspective Mapping, IPM).

为了更好地获得路况信息,有时需要采用 IPM 算法将具有透视形变的路面图像变为正下视图.主要可采取两种方法来实现:方法一是根据相机成像模型,采用相机内外参量矩阵连乘的方式获得变换结果,该方法在相机处于任意姿态的条件下均可实现 IPM,但是由于涉及的参量较多,导致算法相对复杂^[13,14].考虑到相机在运载平台上架设时,一般将相机的横滚角和航向角设为 0 度,此时可将矩阵连乘公式简化为二元方程组的形式.方法二即是采用简化后的 IPM 公式来实现图像的逆透视映射,它也是目前采用最多的方法.当前被广泛使用的简化 IPM 公式主要有两个:一个是由 M. Bertozzi 等人提出的^[11](以下简称 IPM 公式一);另一个是由徐友春等人提出的^[2,5,6,15](以下简称 IPM 公式二).但在实际使用过程中作者发现:以上两公式均不同程度

地存在着与相机内外参量相关的误差,例如相机焦距越短误差越大,等等.为此,在从数学上对现有公式进行误差分析的基础上,推导出新的 IPM 公式,并设计实验验证了该公式的 IPM 效果.实验结果表明,在相机不同内外参量条件下,本文推导的公式均比传统公式准确度高.即使对于距离相机较近处的路面,其 IPM 变换后结果也只有约 0.85% 的误差.因此本文推导的公式在任何情况下均可替代现有公式,尤其在某些对图像 IPM 准确度要求较高的应用背景下,如自主泊车^[13],路况勘测等领域均具有较好的应用前景.

1 现有的 IPM 公式的误差分析

1.1 IPM 公式一的误差分析

IPM 公式一由 M. Bertozzi 等人推导出,并应用于其团队研发的 GOLD 自动驾驶车系统上^[10-11],用于辅助提取道路边缘线从而实现车辆导航,并取得了良好效果.随后,该公式被国内外大量文献引用^[1,4,7-9],逐渐成为逆透视映射技术领域一个主要的简化 IPM 公式.

该公式推导过程中涉及的相关参量如图 1 所示:设相机在世界坐标系中的位置坐标为 (l, d, h) 米,相机分辨率为 $m \times n$ 像素(其中 m 为纵向分辨率),视场角为 $2\alpha \times 2\beta$ 弧度(其中 2α 为纵向视场角),相机偏离道路方向的偏航角为 γ 弧度,相机俯仰角为 θ 弧度.根据以上的参量标示, M. Bertozzi 等人解算出世界坐标系下的路面坐标 $(x, y, 0)$ 与图像

基金项目:总后勤部预研项目资助

第一作者:曹毓(1982-),男,博士研究生,主要研究方向为光学传感器技术. Email: weiguang7910@sohu.com

导师:冯莹(1956-),女,教授,博导,主要研究方向为集成光电子器件技术以及光电测控技术. Email: csfengying@sina.com

收稿日期:2011-04-21;修回日期:2011-07-28

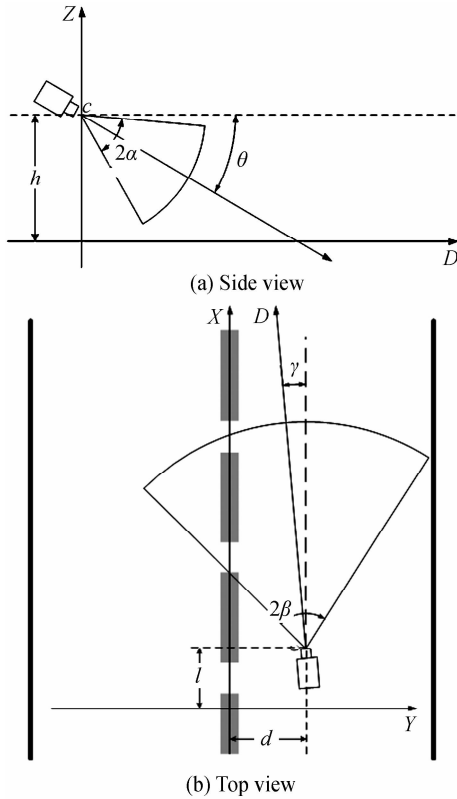


图 1 相机架设各参量示意图
Fig. 1 Sketch map of camera setting parameters

坐标系下的图像坐标 (u, v) 之间的关系式为

$$\begin{cases} x(u, v) = h \times \cot \left[(\theta - \alpha) + u \times \frac{2\alpha}{m-1} \right] \times \\ \cos \left[(\gamma - \beta) + v \times \frac{2\beta}{n-1} \right] + l \\ y(u, v) = h \times \cot \left[(\theta - \alpha) + u \times \frac{2\alpha}{m-1} \right] \times \\ \sin \left[(\gamma - \beta) + v \times \frac{2\beta}{n-1} \right] + d \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)解出用世界坐标系下的路面坐标 $(x, y, 0)$ 表示的图像坐标 (u, v) 关系式为

$$\begin{cases} u(x, y, 0) = \frac{\cot \left\{ \frac{h \times \sin \left[\cot \left(\frac{y-d}{x-l} \right) \right]}{(y-d)} \right\} - (\theta - \alpha)}{2\alpha/m-1} \\ v(x, y, 0) = \frac{\cot \left(\frac{y-d}{x-l} \right) - (\gamma - \beta)}{2\beta/n-1} \end{cases} \quad (2)$$

上式即为 M. Bertozzi 等人推导出的 IPM 公式. 以下从数学角度对该公式的误差进行分析.

为简化起见,不妨令 $l=0; d=0$,由式(1)有 $x^2(u, v) + y^2(u, v) =$

$$h^2 \cot^2 \left((\theta - \alpha) + u \frac{2\alpha}{m-1} \right) \quad (3)$$

在图像坐标系下选取图像的下边缘直线,对应的直线方程为 $u=n$,其中 n 为图像的纵向分辨率. 将该直线方程代入式(3),得

$$\begin{aligned} x^2(n, v) + y^2(n, v) = \\ h^2 \cot^2 \left((\theta - \alpha) + n \frac{2\alpha}{m-1} \right) = \text{常量} \end{aligned} \quad (4)$$

由上式发现,图像坐标系下的直线 $u=n$,经 IPM 变换后却满足圆方程,这与逆透视映射基本性质是不相符的. 因此,该公式存在着明显的 IPM 变换误差. 由式(3)知,当相机的架设高度较低、镜头焦距较短、目标点距离相机较近时,式(1)的 IPM 变换结果会出现较大的误差. 因此,只有当选择焦距较长的镜头,并且选择世界坐标系下距离相机较远处实施 IPM 变换时,该公式才可达到较好的 IPM 变换效果.

1.2 IPM 公式二的误差分析

IPM 公式二由徐友春等人推导出^[15],和 IPM 公式一的情况类似,被用来将路面的透视图像转化为俯视图,以便更好地获取道路标志线信息. 该公式同样被很多文献引用^[2-3,5-6],是另一个主要的简化 IPM 公式.

同样的,依据图 1 的参量标示,假设相机分辨率为 $m \times n$ 像素,视场角为 $2\alpha \times 2\beta$ 弧度,徐友春等人解算出世界坐标系下的路面坐标 $(x, y, 0)$ 与图像坐标系下的图像坐标 (u', v') 之间的关系式为

$$\begin{cases} x(u', v') = \frac{h(m \tan \theta + 2u' \tan \alpha)}{m - 2u' \tan \theta \tan \alpha} \\ y(u', v') = \frac{\sqrt{h^2 + x^2} v' \tan \beta}{n} \end{cases} \quad (5)$$

与 M. Bertozzi 等人推导出的 IPM 公式一不同的是:相机在世界坐标系中的位置坐标为 $(0, 0, h)$ 米,相机偏离道路方向的偏航角 γ 默认其为 0 弧度;此外图像坐标系以图像中心为坐标原点. 反求公式(5)可得

$$\begin{cases} u' = \frac{xm - mhtan\theta}{2x \tan \theta \tan \alpha + 2htan\alpha} \\ v' = \frac{yn}{2 \tan \beta \sqrt{h^2 + x^2}} \end{cases} \quad (6)$$

以下从数学角度对该公式进行误差分析. 将式(5)中的第二式两边取平方,得

$$\left(\frac{n}{v' \tan \beta} \right)^2 y^2 - x^2 = h^2 \quad (7)$$

选择图像上任意一行像素的水平直线,其方程式为 $v'=k$,其中 k 为一常量. 则有

$$\left(\frac{n}{v' \tan \beta} \right)^2 = \left(\frac{n}{k \tan \beta} \right)^2 = K = \text{常量} \quad (8)$$

式(7)可写为

$$\frac{y^2}{h^2/K} - \frac{x^2}{h^2} = 1 \quad (9)$$

由上式发现,图像坐标系下的直线 $v'=k$,经 IPM 变换后却满足双曲线方程,这同样与逆透视映

射基本性质是不相符的. 因此, 和 IPM 公式一的情况类似, IPM 公式二, 即公式(6)同样存在着 IPM 变换误差. 进一步分析式(9)发现, 当相机的架设高度较低、镜头焦距较短、目标点距离相机较近时, 式(6)的 IPM 变换结果会出现较大的误差. 这和 IPM 公式一的误差分析结果是一致的.

2 简化 IPM 公式的推导

在如路面勘测、自主泊车等特定应用场合下, 需要对距离相机较近处的地面实施 IPM 变换. 由上文分析知, 现有的 IPM 公式此时不再适用. 为此, 本文对 IPM 公式进行重新推导. 为简化起见, 采用 IPM 公式二的参量约定. 图 2 给出了世界坐标系下相机和所拍摄景物的几何关系示意图, 图中 ABCD 为相机在路面上的视场范围, O 点为相机光心, I 点为相机在路面上的投影坐标, 该点亦为世界坐标系的原点. P 点为图像上一像素点 p 对应的真实路面坐标点, 其坐标为 (X_p, Y_p) .

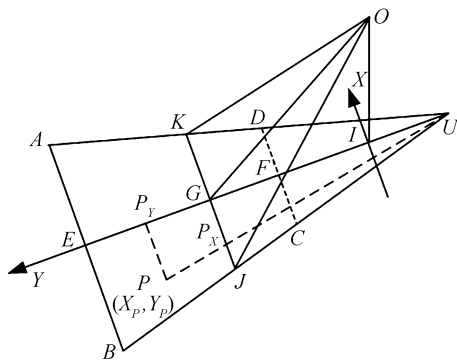


图 2 相机视场在世界坐标系下的几何关系示意图
Fig. 2 Geometry setting of camera's field of view in the world coordinates

图 3 为路面与图像平面之间的投影关系示意图, (a) 图为相机侧视图, (b) 图为像平面俯视图.

由图 3, 在 (X, Y) 坐标系下, 有

$$\begin{cases} Y_p = h \times \tan(\angle P_Y O I) = \\ h \times \tan(\angle P_Y O G + \angle G O I) = \\ h \times \tan(\angle P_Y O G + \frac{\pi}{2} - \theta) = \\ h \times \cot(\theta - \angle P_Y O G) \\ X_p = O P_Y \times \tan(\angle P_Y O P) \end{cases} \quad (10)$$

由图 3 易知 $\angle P_Y O G = \angle p_u O g$, $\angle P_Y O P = \angle p_u O p$, 下面只需求解 $\angle p_u O g$ 和 $\angle p_u O p$ 即可.

在相机的图像平面, 如图 3(b) 所示, 假设 u 方向每个像元尺寸为 L_u , v 方向每个像元尺寸为 L_v , 相机焦距为 f , α 和 β 分别为纵向和横向半视场角, 则有

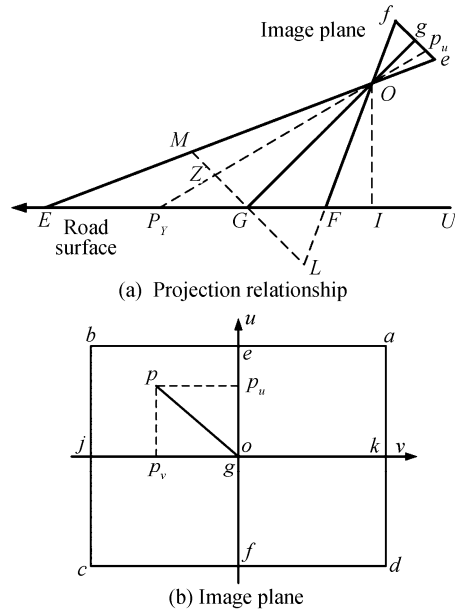


图 3 路面与像平面的投影关系示意图
Fig. 3 Relationship between road surface and image plane

$$\begin{cases} \tan \alpha = \frac{L_u \times \frac{m-1}{2}}{f} \Rightarrow L_u = \frac{2f \times \tan \alpha}{m-1} \\ \tan \beta = \frac{L_v \times \frac{n-1}{2}}{f} \Rightarrow L_v = \frac{2f \times \tan \beta}{n-1} \end{cases} \quad (11)$$

因此有

$$\begin{cases} \tan(\angle p_u O g) = \frac{(\frac{m-1}{2} - u) L_u}{f} = \\ \frac{(\frac{m-1}{2} - u) \frac{2f \times \tan \alpha}{m-1}}{f} = \tan \alpha \times (1 - \frac{2u}{m-1}) \\ \tan(\angle p_v O g) = \frac{(v - \frac{n-1}{2}) L_v}{f} = \\ \frac{(v - \frac{n-1}{2}) \frac{2f \times \tan \beta}{n-1}}{f} = \tan \beta \times (\frac{2v}{n-1} - 1) \end{cases} \quad (12)$$

由投影关系, 易知

$$\tan(\angle p_u O p) = \tan(\angle p_v O g) \times \cos(\angle p_u O g) = \frac{\tan(\angle p_v O g)}{\sqrt{1 + \tan^2(\angle p_u O g)}} \quad (13)$$

最终得到

$$\begin{cases} Y_p = h \times \cot(\theta - \angle p_u O g) = \\ h \times \cot(\theta - \arctan(\tan \alpha \times (1 - \frac{2u}{m-1}))) \\ X_p = O P_Y \times \tan(\angle p_u O p) = \sqrt{h^2 + Y_p^2} \times \\ \frac{\tan(\angle p_v O g)}{\sqrt{1 + \tan^2(\angle p_u O g)}} = \sqrt{h^2 + Y_p^2} \times \\ \frac{\tan \beta \times (\frac{2v}{n-1} - 1)}{\sqrt{1 + (\tan \alpha \times (1 - \frac{2u}{m-1}))^2}} \end{cases} \quad (14)$$

上式即为世界坐标系到像平面坐标系的透视投影关系表达式. 对其反解即为逆透视映射公式.

令 $U = \tan\alpha \times (1 - \frac{2u}{m-1})$, $V = \tan\beta \times (\frac{2v}{n-1} - 1)$, 可化简公式(14), 并对其进行反解, 用 (X_p, Y_p) 表示 (U, V) , 可得

$$\begin{cases} U = \tan[\theta - \arctan(\frac{Y_p}{h})] \\ V = \frac{X_p}{\sqrt{h^2 + Y_p^2}} \times \sqrt{1 + \tan^2[\theta - \text{acot}(\frac{Y_p}{h})]} \end{cases} \quad (15)$$

上式即为本文推导的 IPM 公式, 简化起见, 下文简称为 IPM 公式三.

对该公式的合理性可以验证如下. 选择图像上任意一列像素的垂直直线, 其方程式为 $u=k$, 其中 k 为一常量. 代入公式(14)中的第一式, 可得

$$Y_p = h \times \cot\{\theta - \text{atan}[\tan\alpha \times (1 - \frac{2k}{m-1})]\} = \text{常量} \quad (16)$$

由上式发现, 图像坐标系下的直线 $u=k$, 经 IPM 变换后仍然为直线, 这与逆透视映射性质是相符的. 这初步验证了公式(15)的合理性.

3 IPM 公式准确度的实验验证

为验证前文分析结果, 设计两个实验分别比较了不同相机内外参量条件下三个 IPM 公式的性能表现.

在实验一中, 彩色相机架设高度为 1.6 m, 镜头焦距 6 mm, 相机俯角 6° . 拍摄的图片如图 4 所示, IPM 变换范围选择地面上距离相机 1~25 m 的范围. 该实验目的是测试在相机架设高度较高、镜头焦距较长、IPM 变换距离较远的情况下三个公式的 IPM 效果.

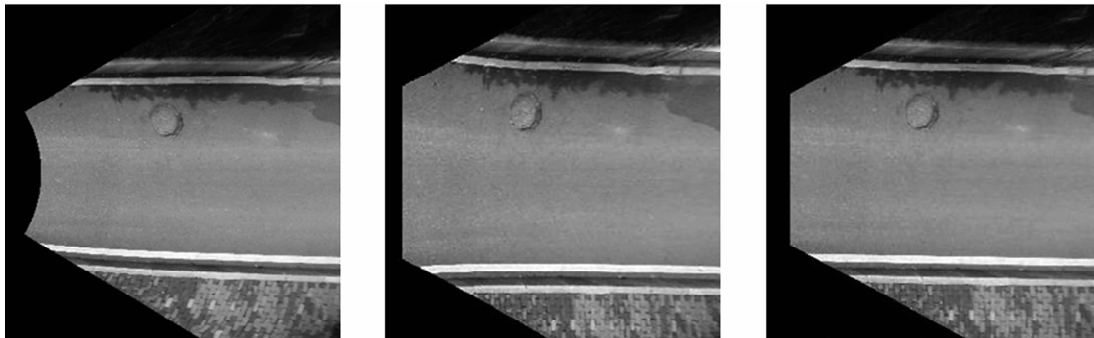


图 4 相机拍摄的原始图像

Fig. 4 Original image obtained by camera

对图 4 实施 IPM 变换, 图 5 中由上至下分别为由 IPM 公式一、公式二以及公式三获得的变换结果. 从宏观看三幅图像并没有显著差别, 只是在图像最左端距离相机较近处的路面有细微差别.

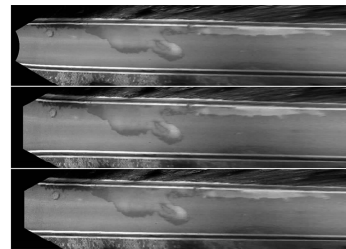


图 5 三个公式的 IPM 变换效果

Fig. 5 IPM results by the three formulae

图 6 所示为图 5 中三幅图的最左端局部放大图像, 由左至右分别对应着 IPM 公式一、公式二及公式三的变换结果. 从图中不难发现: IPM 公式一得到的图像在最左端出现了明显的扭曲, 两条道路边缘线在图中的最左端有向中间靠拢的趋势, 路面地砖也发生了变形; IPM 公式二得到的图像在最左端同样出现了畸变, 但畸变程度较轻, 两条道路边缘线在图中的最左端有离开的趋势, 这与 IPM 公式一对应的畸变趋势相反; 同样可以看出, 由本文推导的 IPM 公式获得的图像没有扭曲变形的现象, 道路边缘线平行度良好.

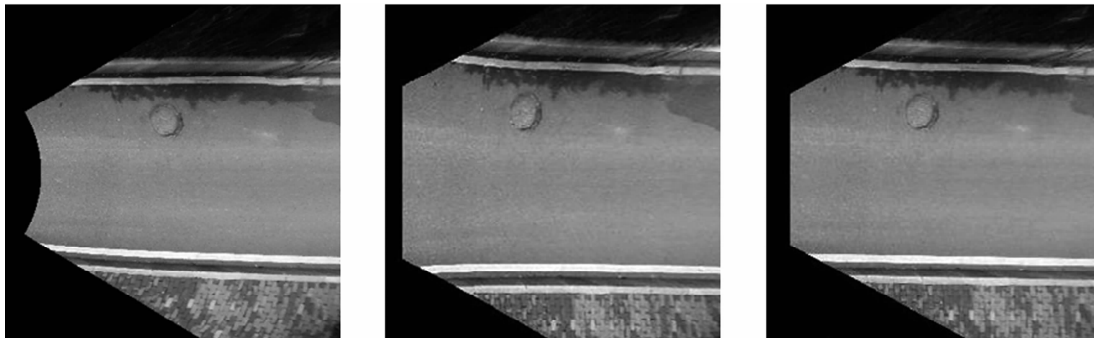


图 6 三个公式的 IPM 变换效果局部放大图

Fig. 6 Partial enlarged view of IPM results by the three formulae

上述实验只是定性的判断三个 IPM 公式其逆透视映射效果的差别, 要验证本文 IPM 公式的逆透视映射的准确度, 需要设计更精确的实验来给出定量的评价结果. 与实验一所用的相机参量不同, 实验

二将测试相机架设高度较低、镜头焦距较短且 IPM 变换范围 1 m 以内时, 三个公式的表现. 实验思路是: 将相机固定并倾斜向下架设; 准确测量出相机的架设高度、姿态角等参量; 在相机视场内的路面铺上

标准的网格模板;对相机拍摄到的同一幅包含透视效果的模板图像,分别使用本文所讨论的三个 IPM 公式对其实施 IPM 变换;通过计算 IPM 变换后图像中的模板变形量来定量获得各公式的准确度表现. 实验选用 Point Grey 公司的 Flea2-14S3 黑白相机来获取图像,分辨率 640×480 像素;镜头视场角为 $69.4^\circ \times 52.05^\circ$,焦距为 4.8 mm 的广角镜头. 选用 Xsens 公司的 MTI 姿态参考系统来测量相机的姿态角,其静态测角准确度为 0.3 度. 图 7 为实验装置图. 图 8 为相机拍摄的畸变校正后网格模板图.

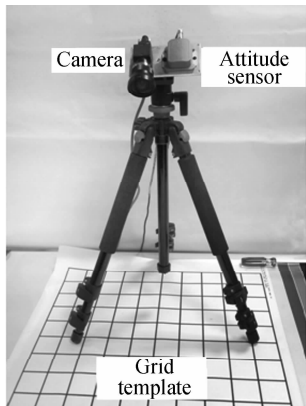


图 7 实验装置图
Fig. 7 Experiment setting

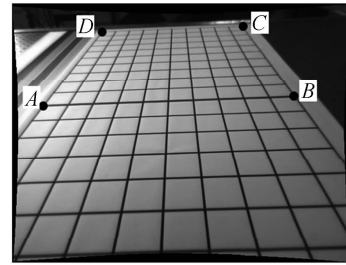


图 8 相机拍摄的网格模板图像
Fig. 8 The image of gridding template gained by camera

首先,测得相机高度 0.26 m,俯仰角 34.7° ,横滚 0.0° . 将以上各参量分别代入三个逆透视映射公式,得到图 6 所示结果. 图 9 左图为 IPM 公式一的结果,中图为 IPM 公式二的结果,右图为本文推导的 IPM 公式三的结果. 从图中可以看出,公式一的变换结果横向网格线经变换后成为了圆弧状;公式二的变换结果的网格下方竖向直线出现了类似双曲线的形状. 这些结果均与上文的分析是吻合的. 同样可以发现,本文推导的 IPM 公式三其变换结果较理想.

由于选择的逆透视映射范围为横向 1 m,纵向 0.9 m,设定图 7 中三幅图像分辨率均为 1000×900 像素,可知逆透视映射后图像中每像素对应世界坐

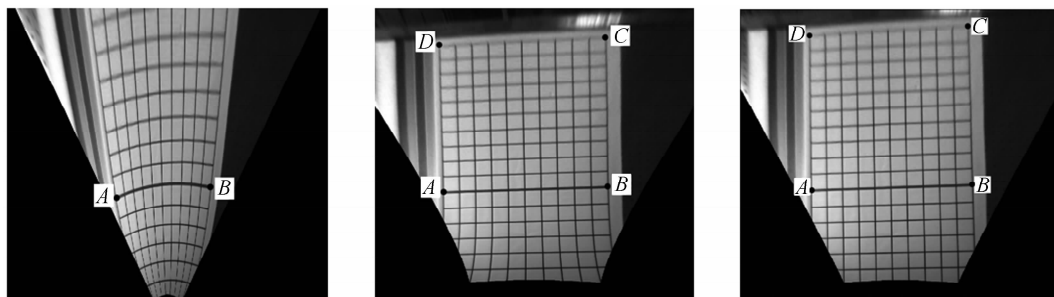


图 9 三种不同的逆透视映射公式其变换结果比较
Fig. 9 The comparison of IPM results from different formulae

标系下 1 mm 的尺寸. 为定量检验逆透视映射结果的准确度,我们在图像上测量了网格模板正方形

ABCD 的四个边长,并换算成长度数据,由三个公式分别给出的准确度验证结果如表 1 所示.

表 1 网格模板变换结果失真度对比
Table 1 Result of gridding template's distortion degree

Line segment	Real length /cm	Length in picture/pixels			Converted length/cm			Error rate/%		
		Formula1	Formula2	Formula3	Formula1	Formula2	Formula3	Formula1	Formula2	Formula3
AB	50	297	516	498	29.7	51.6	49.8	40.6	3.2	0.4
BC	50	>557	467	495	>55.7	46.7	49.5	>11.4	6.6	1.0
CD	50	>539	521	497	>53.9	52.1	49.7	>7.8	4.2	0.6
DA	50	>598	462	493	>59.8	46.2	49.3	>19.6	7.6	1.4

从表 1 中看到,在由 IPM 公式一得到的映射图像中,正方形 ABCD 的四个边长与实际长度相比,最大误差达到 40.6%;由 IPM 公式二得到的映射图像最大误差达到 7.6%;而本文算法的逆透视映射结果其四个边的最大误差为 1.4%,平均误差 0.85%. 由此可以看出本文算法的 IPM 准确度较高.

4 结论

在某些特定的应用场合下需要对距离相机较近处实施 IPM 变换,而现有的简化 IPM 公式由于对近处路面的 IPM 变换结果存在较大的误差. 因此,本文针对该问题推导了新的简化 IPM 公式,并设计

实验验证了分别由三个公式获得的 IPM 结果的准确度差别. 实验结果表明: IPM 公式一的结果准确度误差最大达到 40.6%; 公式二达到 7.6%, 而由本文推导的公式获得的 IPM 结果最大误差为 1.4%, 平均误差 0.85%. 因此相对于 IPM 公式一和公式二, 本文推导的公式大大提高了 IPM 准确度.

IPM 公式一和公式二的误差一直被人们忽略, 是因为该公式一般应用在车辆自动驾驶领域, 用于获取平行的车道边界线信息以供导航使用. 由于对相机获取的路面透视图像进行 IPM 运算时, 选择的变换范围是在车辆前方距离相机较远的地方, 使得以上两个公式的变换结果误差不易察觉. 但是, 当 IPM 算法应用于自主泊车、路面状况检测等领域时, 需要对车辆近处的路面状况有准确的掌握, 此时 IPM 公式一和公式二便不再适用.

综上所述, 本文推导的 IPM 公式无论相机内外参量如何变化, 其 IPM 变换准确度均较高, 因此可替代传统公式实现高准确度的 IPM 变换, 具有广阔的应用前景.

参考文献

- [1] ZHENG Bang-gui, TIAN Bing-xiang, DUAN Jian-min. Lane recognition technique of prediction and inverse projection based on Kalman[J]. *Computer Engineering and Design*, 2009, **30**(6):1548-1554.
郑榜贵, 田炳香, 段建民. 基于 Kalman 预测及逆投影的车道识别技术[J]. *计算机工程与设计*, 2009, **30**(6):1548-1554.
- [2] FU Meng-yin, LI Bo, WANG Mei-ling. Inverse perspective transform based lane detection in autonomous vehicle [J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(3):368-371.
付梦印, 李博, 王美玲. 一种基于逆投影变换的智能车道路识别方法[J]. *光学技术*, 2008, **34**(3):368-371.
- [3] JIANG Ze-min, YANG Yi, FU Meng-yin. Indoor visual navigation based on parallel[J]. *Robot*, 2007, **29**(2):128-132.
江泽民, 杨毅, 付梦印. 基于平行线的室内视觉导航[J]. *机器人*, 2007, **29**(2):128-132.
- [4] DAI Bin, QIU Wei. On line estimation of lane departure time under IPM [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, **43**(16):235-238.
戴斌, 裴伟. 逆透视投影下车道偏离时间的在线估计[J]. *计算机工程与应用*, 2007, **43**(16):235-238.
- [5] GUO Lei, XU You-chun, LI Ke-qiang, et al. Study on real-time distance detection based on monocular vision technique [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, **11**(1):74-81.
郭磊, 徐友春, 李克强, 等. 基于单目视觉的实时测距方法研究[J]. *中国图像图形学报*, 2006, **11**(1):74-81.
- [6] GUO Lei, LI Ke-qiang, MA Ying. Inverse perspective transform based on directional 2-D interpolation [J]. *Journal of Tsinghua University (Sci&Tech)*, 2006, **46**(5):712-715.
郭磊. 基于定向二维插值的逆投影变换方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, **46**(5):712-715.
- [7] TAN S, DALE J, ANDERSON A, et al. Inverse perspective mapping and optic flow: a calibration method and a quantitative analysis [J]. *Image and Vision Computing*, 2006, **24**(2):153-165.
- [8] BERTOZZI M, BROGGI A, FASCIOLI A A. Vislab and the evolution of vision-based UGVs [J]. *IEEE Computer Society*, 2006, **39**(12):31-38.
- [9] DENG Jian-wen, AN Xiang-jing, HE Han-gen. ALV vision navigation based on road structure characteristic [J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2004, **22**(4):415-419.
邓剑文, 安向京, 贺汉根. 基于道路结构特征的自主车视觉导航[J]. *吉林大学学报(信息科学版)* 2004, **22**(4):415-419.
- [10] BROGGI A, BERTOZZI M, FASCIOLI A. Visual perception of obstacles and vehicles for platooning [J]. *Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2000, **1**(3):164-176.
- [11] BERTOZZI M, BROGGI A, GOLD; a parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, **7**(1):62-81.
- [12] BERTOZZI M, BROGGI A, FASCIOLI A. Stereo inverse perspective mapping: theory and applications [J]. *Image and Vision Computing*, 1997, **16**(8):585-590.
- [13] YUAN Qi-ping, SONG Jin-ze, WU Tao. A method for stitching images based on inverse perspective mapping (IPM) [J]. *Control & Automation*, 2010, **26**(7-3):208-210.
袁启平, 宋金泽, 吴涛. 基于逆透视映射的图像拼接方法[J]. *微计算机信息*, 2010, **26**(7-3):208-210.
- [14] HE Yuan-jun. Perspective and its projection transformation [J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2005, **17**(4):110-115.
何援军. 透视和透视映射[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, **17**(4):110-115.
- [15] XU You-chun. Research on initiative security of vehicle based on machine Vision [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003.
徐友春. 基于机器视觉的汽车主动安全技术的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2003.

Error Analysis and Precision Validation of Inverse Perspective Mapping Formulae

CAO Yu, FENG Ying, LEI Bing, YANG Yun-tao, ZHAO Li-shuang

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Errors of two Inverse Perspective Mapping (IPM) formulae are analyzed in mathematics, and a new IPM formula is deduced. An experiment is designed to validate the IPM result from different formulae. Experimental results show that, whatever the parameter of camera is, the IPM result obtained by the third formula has no distortion. In the special condition of camera installation, the average error of the deduced formula is 0.85%. Consequently, the IPM transform result of the improved formula is more precise and can satisfy the system requirement in smart navigation and road surface reconnaissance field.

Key words: Image processing; Inverse perspective mapping; Smart navigation; Road surface reconnaissance