

文章编号 1004-924X(2025)12-1929-11

融合语义与三维信息的路面图像逆透视变换

夏晓华*, 高霄飞, 段智威, 冯鑫淼

(长安大学 陕西省高速公路施工机械重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要:路面图像逆透视变换是实现基于图像的车距感知和路面病害测量的前提条件。传统静态逆透视变换方法具有变换参数无法动态调整的问题,而现有动态逆透视变换方法对路面车道线及纹理等信息依赖性较强,容易造成图像透视失真校正效果不佳。针对这些问题,提出了基于深度相机语义分割与三维平面拟合的路面图像动态逆透视变换方法。首先,通过 RGB 图像语义分割模型提取路面区域,在路面区域对应的点云数据中实现三维平面拟合,剔除非路面点云对路面拟合的干扰;在此基础上,利用路面信息和相机与路面的空间位置关系,通过建立的相机位姿估计方法计算相机相对路面位姿;最后,基于路面在相机不同位姿下的成像关系,利用构建的路面图像逆透视变换模型实现原图到任意基准点的透视失真校正。仿真实验结果表明,提出方法在常见的相机位姿变化情况下透视失真校正误差稳定在 10^{-2} mm 级,优于目前先进的逆透视变换方法,能够有效提高路面图像的逆透视变换质量。实际实验结果进一步验证了提出方法的有效性。

关键词:机器视觉;路面图像;动态逆透视变换;语义分割;位姿估计

中图分类号: TP391.41; TN911.73 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253312.1929 **CSTR:** 32169.14.OPE.20253312.1929

Inverse perspective mapping of pavement image combining semantic and 3D information

XIA Xiaohua*, GAO Xiaofei, DUAN Zhiwei, FENG Xinmiao

(Key Laboratory of Expressway Construction Machinery of Shaanxi Province,
Chang'an University, Xi'an 710064, China)

* Corresponding author, E-mail: xhxia@chd.edu.cn

Abstract: Inverse perspective mapping (IPM) of pavement images is a prerequisite for image-based vehicle distance perception and pavement damage measurement. The traditional static IPM methods have the problem that the transformation parameters cannot be dynamically adjusted, and the existing dynamic IMP methods are highly dependent on the information such as road lane lines and textures, which often lead to suboptimal correction of perspective distortion. To solve these problems, this study proposed a dynamic IPM method for pavement images based on depth-camera semantic segmentation and 3D plane fitting. First, a semantic-segmentation model was used to extract pavement regions from RGB images, and 3D plane fitting was performed on the corresponding point-cloud data within the pavement regions, eliminat-

收稿日期: 2024-12-11; 修订日期: 2025-02-10.

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (No. 2024GX-YBXM-197, No. 2025CY-YBXM-545); 陕西省交通运输厅科研项目 (No. 23-10X, No. 24-74K)

ing the interference of non-pavement point clouds on pavement fitting. On this basis, using pavement information and the spatial positional relationship between the camera and the pavement, the relative pose of the camera with respect to the pavement was calculated through a camera-pose-estimation method. Finally, based on the imaging relationship of the pavement under different camera poses, a constructed pavement-image IPM model was used to correct perspective distortion from the original image to any reference point. Simulation experiments show that the perspective distortion correction error of the proposed method is stable at 10^{-2} mm when the camera pose has common variations, which is better than the current advanced IPM methods, demonstrating that the proposed method effectively improves the quality of pavement image IPM. Real-world experiments further validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: machine vision; pavement image; dynamic inverse perspective mapping; semantic segmentation; pose estimation

1 引言

随着机器视觉技术的发展以及应用需求的增加,相机常装备于道路场景下的车辆和机器人上以执行路面环境感知任务,但相机拍摄路面时光轴与路面一般呈现非垂直状态,会产生近大远小的透视投影图像失真以及倾斜投影图像失真^[1]。逆透视变换(Inverse Perspective Mapping, IPM)是一种用于校正相机透视投影过程中成像失真的图像处理方法,通过建立变换矩阵,消除图像的透视变形。当前逆透视变换被应用于道路病害测量^[2]、车辆导航定位^[3]、车距测量^[4]、车速测量^[5]、道路标线识别^[6]以及车辆行驶中的风险检测^[7]等任务。

逆透视变换根据变换参数是否变化分为静态逆透视变换和动态逆透视变换。静态逆透视变换假设道路平坦、车辆静止或匀速稳定行驶,相机位姿稳定不变,因原理相对简单且易于实施而应用广泛。刘景峰等^[8]和Xue等^[3]通过选取四个对应点计算单应性矩阵来实现静态逆透视变换,在此基础上进行车道线检测和车辆定位的研究。李海华等^[9]将相机安装高度和角度代入简化相机模型中实现静态逆透视变换,然后进行车道线检测的研究。然而,实际场景存在诸多复杂因素,一方面,道路存在起伏、坡道、坑洼和减速带等各种路况,另一方面,车辆自身在加减速和转向操作时悬挂系统会产生相对运动。因此,相机相对于路面的角度和高度会改变,导致静态逆透视变换方法在工程应用中存在显著局限性。相机高度变化会引起透视失真校正图像产生一定

程度的缩放,影响尺寸测量等任务的测量结果。相机的俯仰角、偏航角和滚转角变化时,分别会导致逆透视变换后道路车道线不能恢复平行关系、车辆与道路间存在旋转偏差以及道路横向产生倾斜扭曲变形,致使路面图像透视失真不能充分校正。

针对静态逆透视变换方法存在的上述问题,国内外学者开展了在车辆行驶过程中更新变换参数的动态逆透视变换方法研究。Yang等^[10]和刘军等^[11]基于路面纹理检测路面消失点的位置以计算相机角度,实现考虑相机俯仰角和偏航角变化的动态逆透视变换,但当消失点位于图像外或路面纹理不清晰以及被部分遮挡时,消失点检测的不确定性使得路面逆透视变换效果有待进一步提升;关闯^[5]等通过计算车道线交点得到路面消失点的位置以实现动态逆透视变换,然而该方法在车道线被遮挡或偏航角较大时存在一定的局限性。此外,虽然该类基于消失点的逆透视变换方法计算速度较快,但普遍采用简化相机模型进行变换,因模型假设的局限性导致校正精度有限,并难以有效考虑滚转角变化对逆透视变换的影响。蒋凯伟等^[12]利用卷积神经网络建立图像与逆透视变换所需对应点之间的关系,通过计算每幅图像的单应性矩阵实现路面图像动态逆透视变换,但逆透视变换结果容易受到路面障碍物的影响,并且不能适应相机偏航角、滚转角和高度的变化。Lee等^[13]利用激光雷达获取路面点云并进行三维平面拟合,根据图像坐标系与道路平面模型的关系建立投影方程实现动态逆透视变换,但其主要实现三维空间中的像素投影,若

要生成二维图像仍需计算相机角度,且由于未能有效分割非路面点云而影响三维平面拟合结果的准确性。

针对上述方法存在的问题,本文提出一种基于语义分割与三维信息的路面图像动态逆透视变换方法,主要贡献如下:

(1)针对道路三维平面拟合难以准确提取路面点云的问题,提出结合语义信息的道路平面拟合方法。利用语义分割识别 RGB 图像中的路面区域并对应到深度图中,以实现路面三维点云的准确分割及平面拟合,从而消除道路中车辆、人群以及两侧环境的无效点云对道路平面拟合的干扰。

(2)针对现有方法中基于道路消失点的相机位姿估计方法容易受路面条件的限制以及无法计算相机滚转角的问题,提出基于路面三维信息的相机位姿估计方法,根据相机与建立的路面坐标系的关系计算相机相对于路面的高度、横向位置和姿态角等信息,实现准确全面的相机位姿估计。

(3)针对现有方法无法准确实现从相机拍摄视角到任意视点俯视图的逆透视变换,提出基于单应性矩阵构建的图像逆透视变换模型,通过相机相对路面的位姿关系推导图像进行逆透视变换的单应性矩阵,代入不同的相机位姿实现路面图像从拍摄位置到任意基准点的逆透视变换。

2 提出的路面图像逆透视变换方法

2.1 方法流程

本文使用深度相机同步采集路面的 RGB 图像和深度图像,通过提出的方法将倾斜拍摄的透视失真路面图像校正为正对路面的俯视视角图像。本文提出的路面图像逆透视变换方法的流程如图 1 所示,其主要步骤如下:

(1)通过 DeepLapV3+ 语义分割网络提取 RGB 图像中的道路区域,将该区域对应到深度图像中进行计算,得到不含路面障碍物和环境点云的路面区域点云。

(2)采用随机抽样一致性算法分离平面点云中的内点和外点,针对内点应用最小二乘法拟合路面方程,得到路面法线方向与相机高度信息。

(3)采用直线检测算法检测 RGB 图像中的

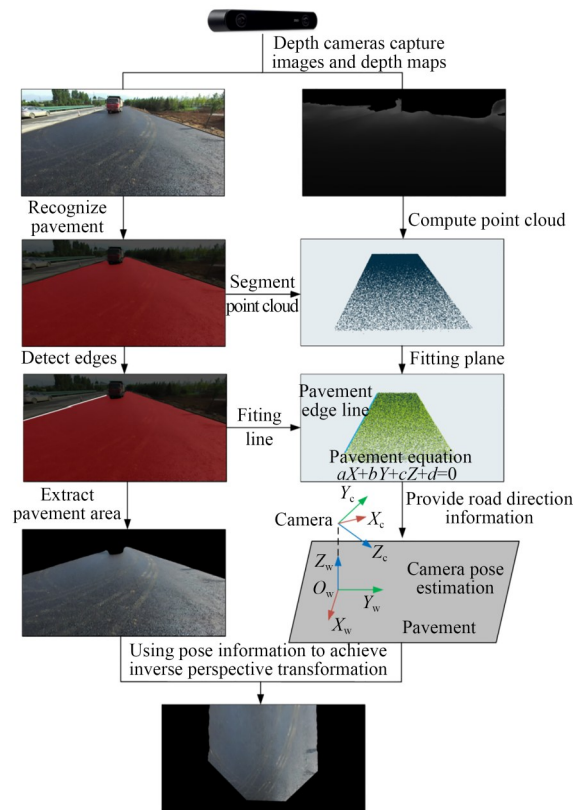


图 1 路面图像透视失真校正流程

Fig. 1 Perspective distortion correction process for pavement images

路边线,利用其对应的深度信息获取点云进行三维直线拟合,得到含有道路走向信息的三维直线方程。

(4)利用路面法线方向及道路走向建立世界坐标系,根据相机与世界坐标系的空间位置关系计算相机相对路面的位姿。

(5)将相机位姿和内参代入构建的逆透视变换模型,得到透视失真图像变换到任意基准点俯视图的单应性矩阵,对原图像变换插值实现逆透视变换。

2.2 相机位姿估计方法

在实际道路中,车载相机相对于路面的位姿会发生变化,因此需要动态更新相机位姿来对逆透视变换参数进行调整。本文借助道路平面方程得到相机高度,利用相机与路边线的关系计算相机横向位置,再通过相机与路面的空间关系得到相机姿态信息。

本文提出的相机位姿计算方法主要涉及相机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 和世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$,

如图 2 所示,世界坐标系原点 O_w 是相机在路面上的正投影, X_w 轴位于路面中且平行于路面横向方向, Y_w 轴位于路面中且方向平行于路面纵向方向, Z_w 轴方向垂直于路面。由于利用深度图像计算的点云数据以相机坐标系作为基准, 因此选用相机坐标系计算相机位姿。

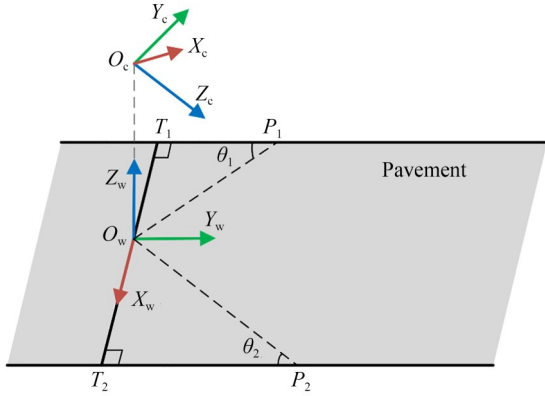


图 2 相机坐标系与路面坐标系位置关系

Fig. 2 Position relation between camera coordinate system and road coordinate system

记路面点云在相机坐标系中的坐标为 (x, y, z) , 采用随机抽样一致性算法根据点到随机平面的距离阈值将路面点云划分为平面内点与外点, 通过迭代选取内点数量最多的平面模型, 用式(1)三维平面方程对筛选的路面点云进行最小二乘拟合:

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (1)$$

其中, A, B, C, D 均为三维平面方程参数。

考虑到相机高度 d 为相机坐标系原点到三维道路平面的距离, 因此:

$$d = \frac{|D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (2)$$

结合路面三维平面的法向量 $\mathbf{n}(A, B, C)$, 可计算出世界坐标系 O_w 点在相机坐标系中的坐标:

$$O_w = -d * \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|}. \quad (3)$$

世界坐标系 Y_w 轴在相机坐标系中的方向向量对应于道路走向, 通过在 RGB 图中检测路边线并对应到深度图中以获取路边线点云, 根据式(4)三维直线方程对其进行随机抽样一致性

拟合:

$$\frac{x - x_0}{m} = \frac{y - y_0}{n} = \frac{z - z_0}{p}, \quad (4)$$

其中: (x_0, y_0, z_0) 是路边线上一点的坐标, (m, n, p) 组成的向量为路边线方向向量 L , 即 Y_w 轴方向向量。

世界坐标系 X_w 轴向量通过联合 Y_w 轴向量和 Z_w 轴向量 $\mathbf{n}$ 并根据向量叉乘原理进行计算:

$$\mathbf{X}_w = \mathbf{Y}_w \times \mathbf{Z}_w. \quad (5)$$

同时以路边线三次方程中包含的道路方向向量和路边线一点坐标为基础, 可以得到相机相对于该路面线的距离:

$$\theta_1 = \arccos\left(\frac{L \cdot \mathbf{V}_{P_1 O}}{L \|\mathbf{V}_{P_1 O}\|}\right), \quad (6)$$

$$O_w T_1 = O_w P_1 * \sin \theta_1, \quad (7)$$

其中: L 为道路方向向量, $\mathbf{V}_{P_1 O}$ 为 P_1 点到 O_w 点的向量, P_1 为路边线一点坐标, 具体位置关系如图 2 所示。式(7)中 $O_w T_1$ 为相机到该路边线的距离。根据已知的路面宽度或另一条路边线方程, 可获取相机位于路面的具体横向位置。

将相机相对于路面坐标系的俯仰角、偏航角及滚转角参数转换至自身坐标系下, 通过建立相机以特定旋转顺序绕自身坐标系进行旋转的角度计算式, 利用相机坐标轴与前文得到的路面坐标轴方向向量实现相机姿态估计。

在角度计算式中, 相机坐标轴方向向量 X_c, Y_c, Z_c 均为单位向量, 对应的旋转变换按照 YXZ 旋转顺序, 即依次绕相机坐标系的 Y_c 轴, X_c 轴和 Z_c 轴进行旋转, 图(3)为相应的旋转过程示意图。

相机绕 Y_c 轴的旋转角度为 θ_y , 通过 Z_w 轴与相机坐标轴的关系进行计算, 式(8)为 Z_w 轴在相机 X_c - Z_c 面投影向量 Z_p 的计算式, 式(9)为 Z_p 与 Z_c 的夹角计算式。相机以任意姿态绕 Y_c 轴旋转 θ_y° 到图 3(b)姿态后, Z_p 与 Z_c 重合, 相机 Y_c - Z_c 面垂直于路面。

$$Z_p = \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|} - \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{Y}_c}{|\mathbf{n}|} * \mathbf{Y}_c, \quad (8)$$

$$\theta_y = \arccos\left(\frac{\mathbf{Z}_p \cdot \mathbf{Z}_c}{|\mathbf{Z}_p|}\right). \quad (9)$$

相机绕 X_c 轴的旋转角度为 Y_c 与路面的夹角,利用 Y_c 与路面法线 n 进行计算。相机从图 3(b)绕 X_c 轴旋转 θ_x 到图 3(c)位置后,相机 X_c - Y_c 面平行于路面。

$$\theta_x = \arcsin\left(\frac{Y_c \cdot n}{|n|}\right). \quad (10)$$

相机绕 Z_c 轴的旋转角度为 Y_c 在路面的投影与道路走向之间的夹角,式(11)是 Y_c 在路面上的投影向量 Y_p 的计算式,式(12)即 Y_p 与 Y_w 之间夹角的计算式。相机从图 3(c)绕 Z_c 轴旋转 θ_z 到图 3(d)位置后,相机处于理想俯拍位置。

$$Y_p = Y_c - \frac{Y_c \cdot n}{|n|} \frac{n}{|n|}, \quad (11)$$

$$\theta_z = \arccos\left(\frac{Y_p \cdot Y_w}{|Y_p| |Y_w|}\right). \quad (12)$$

由于相机先绕 Y_c 轴旋转时 Y_c 轴固定不动, θ_x 计算公式有效,再绕 X_c 轴旋转, Y_c 轴在路面的投影 Y_p 不变,故 θ_z 计算公式仍有效。根据此旋转顺序和对应角度进行旋转后,相机与路面俯仰角、偏航角及滚转角均为 0° 。相反,对路面以相同角度相反顺序旋转即可将路面各点坐标基准从图 3(d)相机坐标系变换到图 3(a)相机坐标系,为构建相机外参矩阵提供基础。

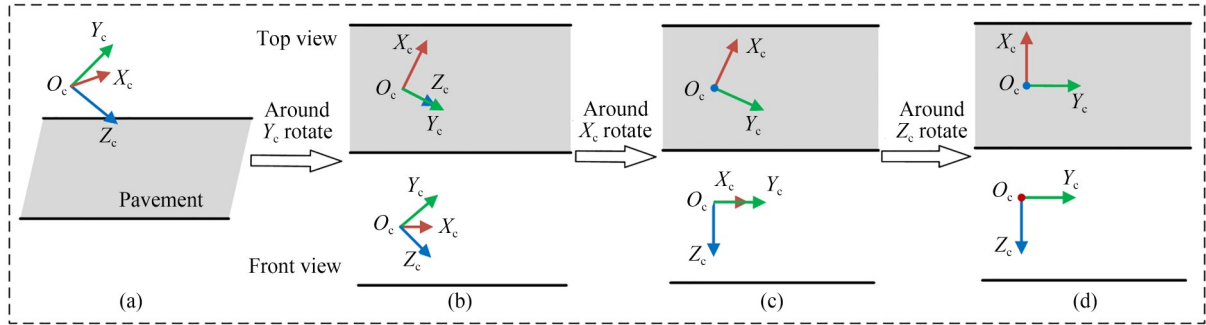


图 3 相机旋转过程

Fig. 3 Camera rotation process

2.3 路面图像逆透视变换模型

为获取路面图像从透视失真视角到俯视视角的映射关系,本文基于相机成像原理对逆透视变换所需的单应性矩阵进行推导,单应性矩阵 H 用来表示同一平面内的点在两个不同拍摄视角图像下的变换关系^[14]:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

相机成像原理主要涉及世界坐标系、相机坐标系、图像坐标系和像素坐标系四个坐标系之间的变换,其中坐标点从世界坐标系到相机坐标系的变换为旋转与平移,分别用 3×3 的旋转矩阵 R 和 3×1 的平移向量 t 表示:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + t. \quad (14)$$

从相机坐标系变换到图像坐标系再到像素

坐标系的变换用相机内参矩阵 K 表示:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}. \quad (15)$$

其中, f_x, f_y, c_x 和 c_y 均为相机内参参数,由相机标定获取。

联立式(14)和式(15)可得相机成像模型:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \left(R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + t \right). \quad (16)$$

单应性矩阵的推导涉及相机初始透视失真位姿 1 和俯视位姿 2,如图 4 所示。根据相机成像模型,世界坐标系中点 P_w 经坐标变换后到姿 1 像素坐标 p_1 的过程用式(17)表示,同理,点 P_w 经坐标变换后到姿 2 像素坐标 p_2 的过程用式(18)表示:

$$z_{c1} p_1 = K(R_1 P_w + t_1), \quad (17)$$

$$z_{c2} p_2 = K(R_2 P_w + t_2), \quad (18)$$

其中: R_1, t_1 和 R_2, t_2 分别表示点从世界坐标系变换到位姿 1 和位姿 2 相机坐标系的旋转矩阵和平移向量, 点 p_1, p_2 用齐次坐标 $(u_i, v_i, 1)$ 表示。

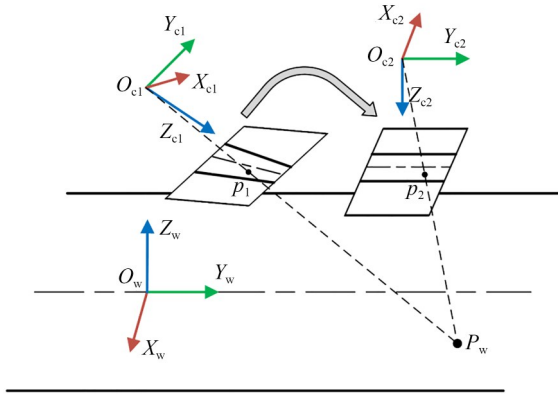


图 4 逆透视变换模型

Fig. 4 Inverse perspective mapping model

由点云平面拟合得到的透视失真位姿 1 相机坐标系下的道路平面方程得:

$$n_{c1}^T P_{c1} + d = 0 \rightarrow n_{c1}^T \frac{P_{c1}}{d} = -1, \quad (19)$$

其中: n_{c1}^T 是位姿 1 相机坐标系下道路平面方程的单位法向量, P_{c1} 是该相机坐标系下路面点的坐标, d 是相机到路面的距离。

由相机成像模型可得, 世界坐标系下的 P_w 、位姿 1 相机坐标系下的 P_{c1} 和像素坐标系的 p_1 三者之间具有如下关系:

$$P_{c1} = K^{-1} z_{c1} p_1, \quad (20)$$

$$P_w = R_1^{-1} (P_{c1} - t_1). \quad (21)$$

以式(18)为基础, 先后代入式(19)~式(21), 可得相机俯视位姿 2 图像中点 p_2 与该点在透视失真位姿 1 图像中对应点 p_1 的对应变换关系:

$$p_2 = \frac{z_{c1}}{z_{c2}} K R_2 (I + \frac{(R_1^{-1} t_1 - R_2^{-1} t_2) n_{c1}^T R_1}{d}) R_1^{-1} K^{-1} p_1, \quad (22)$$

$$n_{c1} = R_1 n_w \rightarrow n_w^T = n_{c1}^T R_1, \quad (23)$$

其中: z_{c1}/z_{c2} 为尺度因子, 式(23)中 n_w 为路面在世界坐标系下的单位法向量, 代入式(23)的数学推导得到单应性矩阵的最终表达形式:

$$H = K R_2 (I + (R_1^{-1} t_1 - R_2^{-1} t_2) n_w^T / d) R_1^{-1} K^{-1}. \quad (24)$$

利用相机位姿估计方法得到的相机位姿构造旋转矩阵 R_1 和平移向量 t_1 ; R_2 表示相机绕 Y_w 轴旋转 180° 到俯视视角的旋转矩阵, t_2 可以手动设定来实现从世界坐标系平移到任意位置相机坐标系。通过代入所需参数可以获得初始透视失真图像变换到任意基准俯视图像的单一性矩阵, 对原图进行变换及插值以实现原图到任意基准点的逆透视变换。

3 实验与分析

3.1 实验设置

为验证本文方法的有效性和准确性, 将其与传统的对应点对静态逆透视变换方法及现有的动态逆透视变换方法进行对比, 由于现有动态逆透视变换通常仅考虑俯仰角变化对校正结果的影响, 本文则选取了更为先进的关闯等^[5]和 Yang 等^[10]提出的方法作为对比方法 1 和对比方法 2, 两者均能修正俯仰角和偏航角变化对校正结果的影响。同时选取同样基于路面三维信息的 Lee 等^[13]提出的方法作为对比方法 3, 该方法通过实时更新路面模型参数实现考虑相机位姿变化的动态逆透视变换。

考虑到仿真实验能够获取路面图像逆透视变换后的真值图像, 因此采用仿真实验验证本文逆透视变换方法的精度。通过实际实验进一步检验该方法在各类实际复杂场景以及从拍摄位置到任意基准点的逆透视变换效果。

仿真实验中, 在三维空间内生成规则化的道路点云, 将其旋转不同俯仰角、偏航角和滚转角并模拟相机成像过程, 生成相应的透视失真路面图像。为了更直观地展示校正效果, 在道路点云中加入两侧边线以及等距离横向线段。校正效果的定量评价则通过计算理想矩形区域 4 个角点在校正后与真实世界坐标之间的偏移量来确定。理想情况下, 变换后 4 个角点应形成理想矩形, 且角点坐标与世界坐标系中的坐标对应一致。由于平移不影响逆透视变换效果, 本文通过平移一个角点至真实坐标位置, 计算其他三对角点的距离偏差来衡量校正误差。式(25)为误差评价指标计算公式:

$$e = \sum_{i=1}^3 \sqrt{(x_{ei} - x_i)^2 + (y_{ei} - y_i)^2}, \quad (25)$$

其中: x_{ei}, y_{ei} 为其余三个角点平移后的计算坐标值, x_i, y_i 为这三个角点的真实坐标。

3.2 仿真对比实验

为验证本文方法在路面图像透视失真校正中的优越性,针对生成的常见角度和高度变化范围的路面图像分别采用本文方法、传统静态逆透视变换方法、对比方法 1~方法 3 进行校正,其中,由于对比方法 3 主要研究从像素到车辆坐标系的三维映射,生成俯视图像时需要借助相机角度将其转换至世界坐标系,作为本实验的对比方法时直接使用对比方法 1 的角度结果。校正结果如图 5 所示(彩图见期刊电子版),图中可见,传统静态方法在初始位姿下能有效校正透视变形,但在相机位姿变化时存在局限性,如图 5 第 2 列,图中红圈

内为具体问题表现位置。俯仰角变化会导致道路边线未呈现平行关系,偏航角变化时图像中道路会倾斜,滚转角变化时校正结果也会倾斜并产生扭曲变形,而相机高度变化则引起校正图像比例变化。对比方法 1~方法 3 由于未考虑相机滚转角变化对逆透视变换的影响,因此,在相机滚转角变化时,校正结果出现倾斜扭曲变形,如图 5 第 4~6 列。并且对比方法 2 存在偏航角变化时的倾斜以及高度变化时图像中道路比例变化的情况,如图 5 第 5 列。本文方法在所有情况下的校正结果视觉效果均准确,对比方法 1~方法 3 在一些情况下能获得较好效果,但由于其均为动态逆透视变换方法,能一定程度适应相机位姿变化,难以基于视觉比较变换精度,因此采用定量评价对四种方法进行对比。

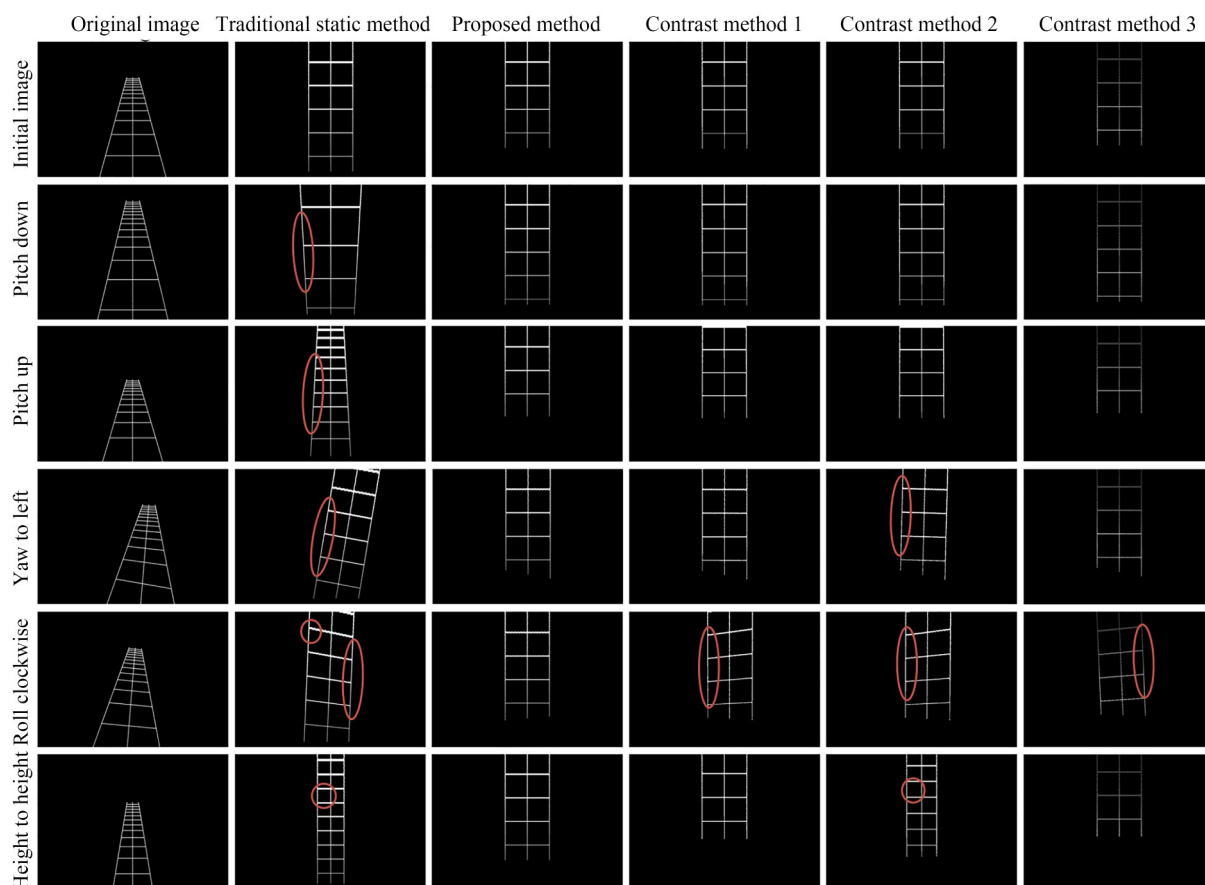


图 5 参数变化时各方法的透视失真校正结果

Fig. 5 Perspective distortion correction results of each method when parameters change

在定量评价实验中,设定相机初始俯仰角为水平向下 30° ,偏航角及滚转角均为 0° ,相机高度

为 1.5 m。针对车辆行驶中角度及高度变化的情况,模拟生成俯仰角最大变化 $\pm 10^\circ$ 的路面图像,

由于偏航角和滚转角变化时结果对称,误差一致,故进行单向旋转,同时变化相机高度。相机角度、高度的具体参数以及利用所提定量评价指标比较分析的实验结果如表 1 所示。

表 1 相机位姿变化时的透视失真校正误差
Tab. 1 Perspective distortion correction error when camera position changes (mm)

Camera pose	Perspective distortion correction error			
	Contrast method 1	Contrast method 2	Contrast method 3	Proposed method
Pitch 20°	30.894	30.894	0.028	0.016
Pitch 25°	24.009	24.009	0.020	0.016
Pitch 30°	19.580	19.580	0.035	0.052
Pitch 35°	15.054	15.054	0.020	0.014
Pitch 40°	11.021	11.021	0.030	0.021
Yaw 5°	20.570	136.682	0.058	0.057
Yaw 10°	20.657	270.397	0.044	0.040
Roll 2°	222.405	212.739	259.076	0.016
Roll 5°	564.880	545.245	661.983	0.025
Height 1.6 m	19.363	671.800	0.016	0.005
Height 1.4 m	18.878	726.620	0.020	0.005

由于对比方法 1 和方法 2 的俯仰角计算公式以及高度不变条件下的透视失真校正公式一致,表 1 可见,俯仰角相同时两者的校正误差一致,且随着俯仰角变化时产生小范围波动。偏航角变化时,对比方法 1 误差在 20 mm 附近,对比方法 2 校正误差较大并随偏航角增加而变大。由于未考虑滚转角的影响,导致存在滚转角时校正误差均较大。相机高度变化时,对比方法 1 误差较小,而对比方法 2 未考虑相机高度变化对逆透视变换的影响,导致校正误差明显增大。对比方法 3 多数场景下校正误差与本文方法基本一致,但其精度优势源于给定的角度,其方法本身聚焦于三维空间投影建模,未构建相机的角度解算方法。

本文所提逆透视变换方法在各种情况下的透视失真校正误差均较小,达到 10^{-2} mm 级别,而对比方法 1、方法 2 的最小校正误差为 mm 级别以上,对比方法 3 在给定角度的基础上与本文方法误差基本一致,但在个别情况仍有较大误差。在仿真实验环境下,本文方法和对比方法 1 的相机位姿估计结果完全正确,但本文逆透视变换模

型由相机成像原理推导,相较于对比方法 1 基于简化相机模型推导的逆透视变换式误差更小。同时本文方法在理想情况下应无误差,但校正误差为 10^{-2} mm 级,经分析,这一误差主要来源于计算过程中的舍入误差。

3.3 实际道路逆透视变换实验

为进一步验证本文方法在实际复杂场景的逆透视变换效果,同时验证从相机拍摄位置到任意指定基准点进行逆透视变换的有效性,在实际场地进行逆透视变换实验。将深度相机以一定角度固定,在运动过程中进行 RGB 图像和深度图像的同步采集。

首先对采集图像分别利用本文方法和对比方法 1~方法 3 进行处理获得校正后的俯视角图像。利用本文方法对实际路面进行逆透视变换时需要构建一个路面语义分割的数据集,并且数据集中需要包含不同光照、行人以及车辆等各类场景的路面图像,以确保模型对路面区域的准确稳定分割。随后通过 labelme 标注软件对图像中的路面区域进行精确标注,为模型的训练提供准确的标签信息。最后利用 Deep-

LapV3+语义分割网络对数据集进行训练,利用得到的模型能够对采集的RGB图像进行路面区域提取。

图6为采用本文方法和对比方法1~方法3对实际场景图像进行逆透视变换的结果,可以得出,本文方法在所有测试场景下均能有效进行逆透视变换。对比方法1在处理第2,4,5幅图时,由于图像中仅可检测出一条道路边线,消失点检测算法失效,进而导致校正失败;对比方法2在第3幅图中因道路消失点位于图像外而失效,该方法仅当俯仰角在一定范围内适用,然而在一些类

似于路面病害检测的任务中,为获取更原始的路面信息往往需要较大的相机俯仰角;且对比方法2在路面障碍物较多时,消失点检测精度会受到影响。对比方法3由于使用激光雷达对路面点云进行获取,在路面中存在障碍物的情况下,无法有效区分路面点云区域,导致逆透视变换失效,如第4~6张图。本文方法通过结合语义与三维点云信息,在各种测试条件下均能有效进行透视失真校正,并在语义分割网络的配合下,逆透视变换结果能够去除道路平面外的无效畸变信息。

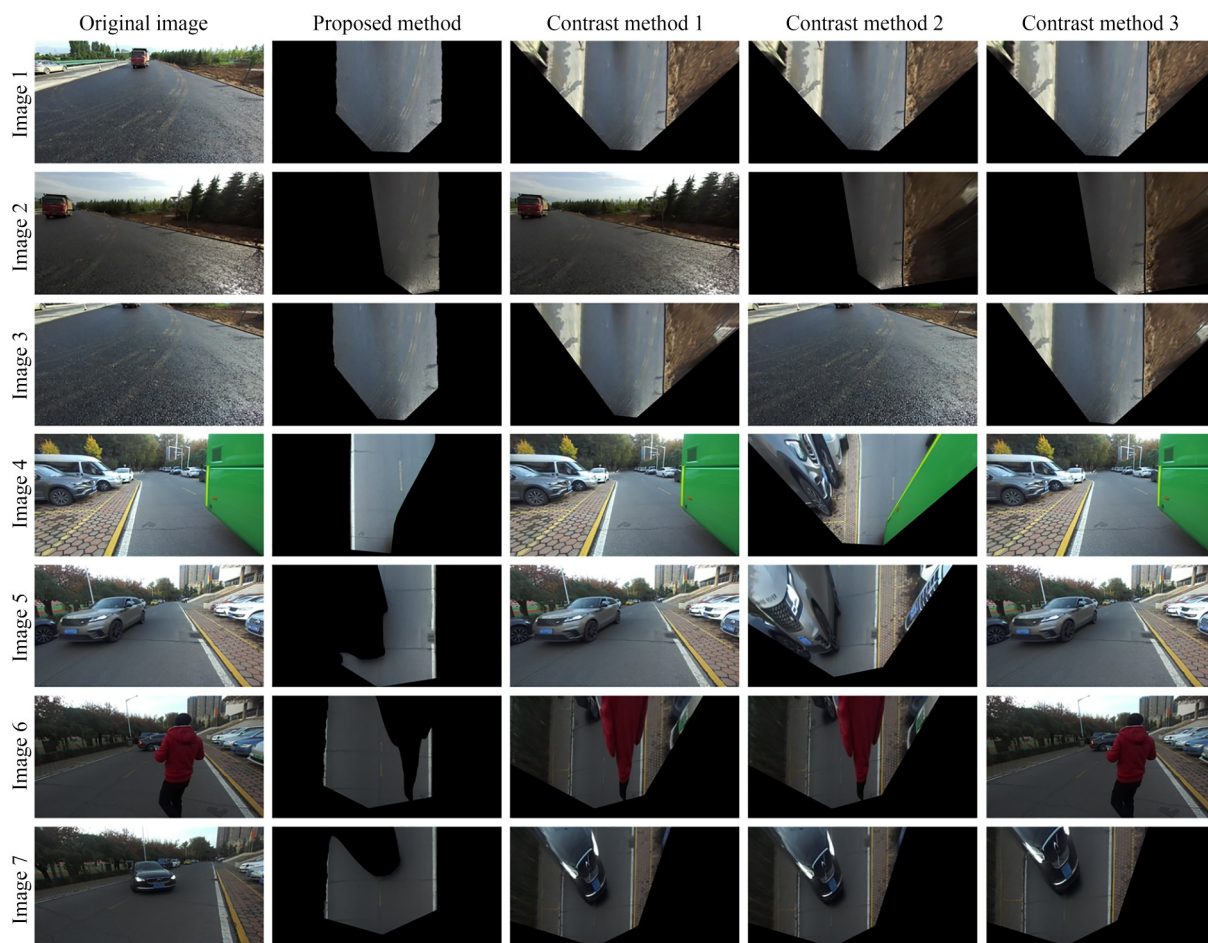


图6 实际图像透视失真校正结果

Fig. 6 Results of actual image perspective distortion correction

为验证本文方法能够实现从相机拍摄位置到任意基准点的逆透视变换,考虑到便于观察,实验选取路面上放置的一个具体目标作为基准点的参考位置,如图7左侧图像所示,黑圈内为放置的白色目标。通过移动白色目标表示基准点

选取的任意性,拍摄了白色目标在相机视野不同位置的图像,设定目标正上方4 m的位置为基准点,从相机拍摄位置到基准点进行逆透视变换,结果如图7右侧所示。图中圆心位置为相机俯视拍摄时光轴与地面的交点,白色目标距圆心越近

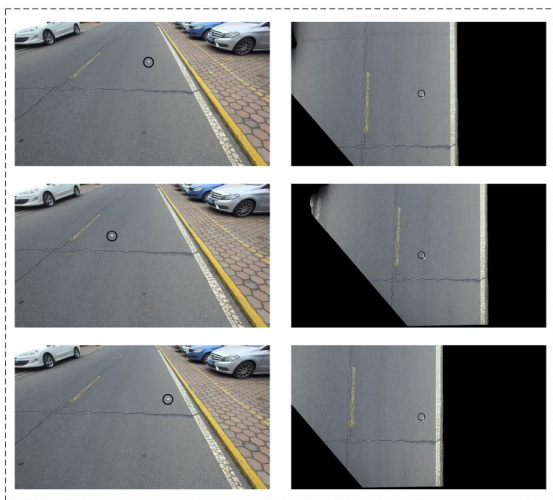


图7 相机拍摄位置至任意基准点逆透视变换结果

Fig. 7 IPM results of camera shot position to any reference point

则表明相机位置越靠近所选基准点。白色目标在左侧原图中位置不同,变换后均处于图像中心位置,但由于深度相机精度等原因导致结果存在一定误差。总体而言,白色目标均位于圆心附近,能够验证从相机拍摄位置到任意指定基准点逆透视变换的准确性。

4 结 论

(1)提出基于路面三维信息的相机位姿估计方法以及基于逆透视变换前后相机位姿关系的单应性矩阵构建方法,实现从拍摄位置到任意基

准点的路面图像动态透视失真校正。在仿真实验中,本文方法针对常见相机位姿变化情况下的透视失真校正误差稳定在 10^{-2} mm级别,优于目前先进方法,验证了本文方法在图像透视失真校正任务中的精确性;

(2)提出基于语义与三维信息融合的逆透视变换方法,利用RGB图像的语义信息分割路面点云。在实际实验中,该方法在加快计算速度的同时使路面点云平面拟合不受障碍物干扰,并达到去除变换后图像中畸变区域的效果。实际实验结果表明:本文方法在各种测试场景下均可实现路面图像透视失真校正,相较于其他方法受应用场景和路面环境的约束更小;

(3)由于本文方法在相机位姿估计中使用了点云数据,在精度提升的同时增加了计算开销,使得本方法更适用于路面图像拼接、路面病害测量以及非快速运动机器人的导航避障等精度要求高但实时性要求不高的任务。但考虑到自动驾驶中车距检测和道路标线识别等对实时性要求较高的应用场景,在采用高性能处理器和并行运算提高实时性的同时,未来也有必要优化点云处理方法以达到理想的实时性要求。

作者贡献说明:

夏晓华:方法提出,实验设计及论文修改;

高霄飞:方法提出,算法开发及论文撰写;

段智威:论文修改以及实验指导;

冯鑫森:实验数据分析和处理。

参考文献:

- [1] 段智威,夏晓华,贺鹏程,等.任意位姿圆柱曲面透视投影失真的图像校正[J].光学精密工程,2024,32(16):2577-2589.
DUAN Z W, XIA X H, HE P C, *et al.* Image correction for perspective distortion of cylindrical surfaces at arbitrary poses [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(16): 2577-2589. (in Chinese)
- [2] YANG H D, MA T, TONG Z, *et al.* Deployment strategies for lightweight pavement defect detection using deep learning and inverse perspective mapping [J]. *Automation in Construction*, 2024, 167: 105682.
- [3] XUE B H, YAN X Y, WU J, *et al.* Visual-marker-based localization for flat-variation scene [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1-16.
- [4] 王永森,刘宏哲.基于单目视觉的车辆下边沿估计和逆透视变换的车距测量[J].计算机工程与科学,2020,42(7):1234-1243.
WANG Y S, LIU H Z. Vehicle distance measurement with vehicle lower edge estimation and inverse perspective mapping based on monocular vision [J]. *Computer Engineering & Science*, 2020, 42(7): 1234-1243. (in Chinese)
- [5] 关闯,冯浩,张志勇,等.基于行车视频消失点和逆透视变换的车速测量[J].中国安全科学学报,2021,31(6):128-135.

- GUAN C, FENG H, ZHANG Z Y, *et al.* Vehicle speed measurement based on vanishing points of driving videos and inverse perspective mapping[J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(6): 128-135. (in Chinese)
- [6] FENG Y J, LI J. Robust accurate lane detection and tracking for automated rubber-tired gantries in a container terminal[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(10): 11254-11264.
- [7] SHI Q, CHEN Y, LIANG H X. Real-time risk assessment of road vehicles based on inverse perspective mapping[J]. *Array*, 2023, 20: 100325.
- [8] 刘景锋, 李炎亮, 江奎, 等. 基于改进逆透视变换的车道线检测算法[J]. *智能计算机与应用*, 2021, 11(3): 109-112.
- LIU J F, LI Y L, JIANG K, *et al.* Lane detection algorithm based on inverse perspective transform [J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2021, 11(3): 109-112. (in Chinese)
- [9] 李海华, 万热华, 陈小玲, 等. 一种基于逆透视变换的车道线检测方法[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2021(2): 97-100.
- LI H H, WAN R H, CHEN X L, *et al.* A lane line detection method based on inverse perspective transformation[J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2021(2): 97-100. (in Chinese)
- [10] YANG W B, FANG B, TANG Y Y. Fast and accurate vanishing point detection and its application in inverse perspective mapping of structured road [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, 48(5): 755-766.
- [11] 刘军, 后士浩, 张凯, 等. 基于单目视觉车辆姿态角估计和逆透视变换的车距测量[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(13): 70-76.
- LIU J, HOU S H, ZHANG K, *et al.* Vehicle distance measurement with implementation of vehicle attitude angle estimation and inverse perspective mapping based on monocular vision[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(13): 70-76. (in Chinese)
- [12] 蒋凯伟, 刘彪, 刘国豪, 等. 基于卷积神经网络的车道线逆透视变换算法[J]. *北京交通大学学报*, 2023, 47(2): 106-113.
- JIANG K W, LIU B, LIU G H, *et al.* An inverse perspective transformation algorithm for lane lines based on CNN [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2023, 47(2): 106-113. (in Chinese)
- [13] LEE H, JO A, HYUN Y, *et al.* LiDAR ground detection-based dynamic inverse perspective mapping of BEV lanes [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(24): 30950-30959.
- [14] 赵祖阳, 崔海华, 杜坤鹏, 等. 基于单应性矩阵的三维激光投影标定方法[J]. *光子学报*, 2022, 51(11): 312-321.
- ZHAO Z Y, CUI H H, DU K P, *et al.* Calibration method of 3D laser projection based on homography matrix[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(11): 312-321. (in Chinese)

通讯作者:



夏晓华(1987—),男,山东临沂人,博士,副教授,2009年于中国石油大学(华东)获得学士学位,2015年于西安交通大学获得博士学位,主要从事机器视觉与光机电一体化方面的研究。
E-mail:xhxia@chd.edu.cn

作者简介:



高霄飞(2001—),男,陕西渭南人,硕士研究生,2023年于长安大学获得学士学位,主要从事机器视觉方面的研究。
E-mail:1653791303@qq.com