

3D 车载环视全景生成方法

刘冬^{1,3} 秦瑞^{1,2} 陈曦^{1,3} 李庆²

(中国科学院微电子研究所昆山分所 昆山 215347)¹ (中国科学院微电子研究所 北京 100871)²
(中国科学院物联网研究发展中心 无锡 214135)³

摘要 通过单应矩阵生成的鸟瞰视角全景图像存在严重的信息损失和边缘模糊形变。为三维空间点加入约束,将其限制在二维空间中,可以实现一幅图像从一个视角唯一变换另一视角。假设 3D 空间点来自于一个“包裹”车辆的曲面,使得原始摄像头图像上每一点对应的投影线都和曲面有交点,摄像头从不同角度观察曲面和车辆,便可生成多视角全景图像。针对相交区域也进行了特殊处理。最后的实验表明,生成的多视角的全景图像既可以充分利用原始图像信息从不同视角观测车辆周边场景,同时也减少了边缘模糊和扭曲,相交区域的过渡也显得更加自然、平滑。

关键词 车载环视系统, 曲面约束, 多视角全景

中图分类号 TP751.1 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.04.061

Generation of Three-dimension Vehicle Panorama

LIU Dong^{1,3} QIN Rui^{1,2} CHEN Xi^{1,3} LI Qing²

(Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Kunshan 215347, China)¹

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100871, China)²

(Chinese Internet of Things Center, Chinese Academy of Sciences, Wuxi 214135, China)³

Abstract Information loss, image blur and object deformation exist in bird-eye panoramic image generated by homography matrix. Confined 3D point to two-dimensional space, image in a view can transform to another uniquely. We selected a curved surface wrapping the vehicle as selected two-dimensional space. We can get the multi-view panorama image from different perspectives. A special process is also applied to the overlapping region. The final experiment demonstrate that, the multi-view panorama images make use of all the information in the source images, at the same time, image blur and object deformation decreases notably. The overlapping regions appear more naturally and smoothly.

Keywords Vehicle around view system, Surface constraint, Multi-view panorama

1 前言

车载环视系统利用安装在车辆四周的广角摄像头重构车辆以及周围场景,生成车载环视全景图像。驾驶员可以通过观察全景图像安全泊车、避开障碍物和消除视觉盲区,达到安全行车的目的。

车载环视系统的概念由 K. Kato 等人^[1]于 2006 年首先提出,并申请了美国专利。之后,各种主动安全技术如行车线检测^[7]、停车位检测跟踪和辅助泊车^[6]、运动物体检测^[10]被应用在车载环视系统上。Byeongchan Jeon 等人于 2015 年提出了高分辨率全景环视系统的解决方案^[11]。

鸟瞰视角全景图像基于两个图像的单应矩阵完成图像变换,生成的全景图像存在边缘模糊和物体形变等严重问题^[5]。因此,各个厂商展开了对多视角全景的技术研究和产品开发。2013 年日本富士通推出了三维 360°全景视角系统^[3](见图

1),该系统具有汽车接近物检测功能。2015 年,鲍千千^[2]详细阐述了摄像头内外参标定、多视角全景的曲面建模和 OPENGL 实现。



图 1 富士通 3D 全景系统

2 鱼眼摄像机的投影模型

车载环视四路摄像头是随着车辆运动的,四路原始图像和最终的拼接图像会随着汽车的运动而运动,为了处理方便,假设 3D 世界坐标系是以车辆为中心的,且坐标系标架会随着汽车的运动而变动。

到稿日期:2015-12-07 返修日期:2016-03-05 本文受移动互联网关键技术与应用(XDA06040300),汽车移动互联网总体技术研究(2012ZX03005018),面向智慧交通的车联网高安全性内容保障技术与核心产品研发(2012B0910)资助。

刘冬(1990—),男,硕士,主要研究方向为车联网终端和图像处理,E-mail: cache1990@163.com;秦瑞(1985—),男,助理研究员,主要研究方向为机器视觉和模式识别;陈曦(1989—),女,硕士,主要研究方向为图像处理和物联网技术;李庆(1972—),男,研究员,主要研究方向为车联网和数据融合。

设有 3D 空间中任意一点 R ,那么 P 在摄像头 O_c 的图像像素坐标系下的坐标 $p_c(u, v)$ 和汽车坐标系下的坐标 $P_w(x_w, y_w, z_w)$ 的关系为^[4]:

$$\lambda \begin{bmatrix} u-c_x \\ v-c_y \\ w \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} u-c_x \\ v-c_y \\ a_0+a_1\rho+a_2\rho^2+\dots+a_n\rho^n \end{bmatrix} = [R \quad t] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, R 和 t 分别为世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量。 c_x, c_y 都为鱼眼图像的形变中心。 $\rho = \sqrt{(u-c_x)^2+(v-c_y)^2}$ 为像素点到形变中心的距离。摄像头曲面方程的泰勒展开式为:

$$f(\rho) = a_0 + a_1\rho + a_2\rho^2 + \dots + a_n\rho^n \quad (2)$$

3 逆投影变换模型

由于单视图成像的不可逆映射,3D 空间中景物的三维坐标是无法获知的,因此需要人为地加入一个约束。通常,假设所有投影到摄像机图像上的 3D 空间点都来自于三维空间中的某个二维曲面 C 。任意一个空间点 $P(x, y, z)$ 在摄像头 O_c 上的投影 p 等于曲面 C 上的某一点 $P'(x', y', z')$ 在摄像头 O_c 上的投影。根据投影模型,可以得出:

$$\begin{cases} \alpha p = KRP + Kt \\ \alpha' p = KR P' + Kt \end{cases} \quad (3)$$

加上曲面 C 的约束 $f(x', y', z') = 0$, 可以得出:

$$\begin{cases} P' = \lambda P + (1-\lambda)O_c \\ f(x', y', z') = 0 \end{cases} \quad (4)$$

显然,通过式(4)可以得到任意一点 $P(x, y, z)$ 在曲面 C 上的等价点 $P'(x', y', z')$ 。

4 鸟瞰视角全景图像

鸟瞰视角全景假设 3D 空间点全部来自于地面平面,即二维曲面 C 的方程为 $z' = 0$ 。那么式(4)变为:

$$\begin{cases} x' = x + \beta(x - x_{c0}) \\ y' = y + \beta(y - y_{c0}) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\beta = \frac{z}{z_{c0} - z}$ 。 $z < z_{c0}$, z 越大, β 越大。

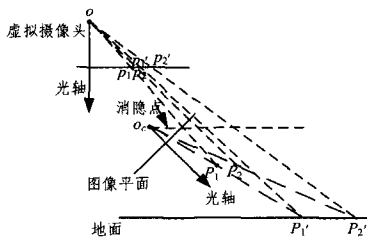


图 2 鸟瞰视角全景投影模型

如图 2 所示, P_1, P_2 在 O_c 中的投影等价于 p_1', p_2' , P_1, P_2 在鸟瞰摄像头 O 下的投影点应为 p_1, p_2 , 而在鸟瞰视角全景的假设下, P_1, P_2 的实际投影点为 p_1', p_2' , 其为 P_1', P_2' 在鸟瞰摄像头 O 下的投影点。

鸟瞰视角全景存在如下缺点:

(1) 高于地面的物体在鸟瞰视图全景图像中的投影存在严重的拉伸形变。从式(5)中可以看出,景物越高,距离车辆越远,景物的形变越大。

(2) 由于射影变换的作用,车辆周边的景物在图像中呈现

出近大远小的效果,如果将其映射为鸟瞰视角全景,相同的实际景物面积在全景图像中的面积也相同,这会导致边缘地区存在严重的锯齿。

(3) 鸟瞰视图全景图像中只保留了原始图像中的部分信息,大部分信息在逆投影变换中损失掉了。如图 2 所示,消隐点之上的图像信息完全没有可能取到,而在消隐点附近的区域也只有全景图像足够大时才能保留。

5 车辆周边 3D 模型的建立

由于单视图成像的不可逆映射,3D 空间中景物的三维坐标是无法获知的。在 2D 鸟瞰视角全景中,假设 3D 空间点全部来自于地面平面,但实际上,车载环视图像中存在许多高于地面障碍物的投影点像素,这与之前的假设不符。

因此,为了减少全景图像中的拉伸形变和边缘锯齿,保留原始图像中的更多信息,可以假设 3D 空间点部分来自于地面平面,部分来自于高于地面的点,即假设 3D 空间点全部来自于一个曲面,如图 3 所示,曲面段 1(地面区域)的投影模型和 2D 的投影模型一致,曲面段 2 位于经过点 O_c 平行于地面的平面 π' 之下,曲面段 3 位于平面 π' 之上,其对应于无法投影到地面的区域。

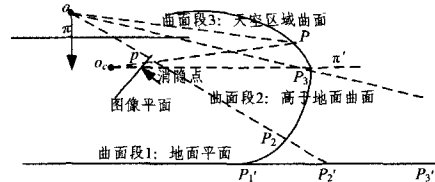


图 3 3D 视角全景投影模型

假设曲面段 2 的函数表达式为 $z = f(x, y)$, 任意一个空间点 $P(x, y, z)$ 在摄像头 O_c 上的投影等价于曲面上的一点 $P'(x', y', z')$, P' 和 P 的关系满足:

$$\begin{cases} P' = \lambda P + (1-\lambda)O_c \\ z' = f(x', y') \end{cases} \quad (6)$$

曲面段 2 上的 P_2 点和地面上的 P_2' 投影到虚拟摄像头 O 上的同一点, P_3 和地面上更远处的某点 P_3' 投影到 O 的同一点,地面段 $[P_1', \infty)$ 映射到曲面段 2,使得最终的全景图像呈现出近大远小的效果,保持了较高的像素清晰度。

曲面段 3 位于无法投影到 2D 全景图像的区域中,但仍可投影到摄像头 O_c 中。由于摄像头 O_c 为鱼镜头,视野范围为约 180 度,可以用曲面段 1, 2, 3“包裹”住摄像头的投影区域,这样就有:对于摄像头 O_c 成像平面上的任意一点 p ,都有曲面上的一点 P ,其在 O_c 中的投影正好为 p 。同时假设: O_c 成像平面上的任意一点 p 都来自于曲面上的某一点 P 的投影。

图 4 所示为曲面 C 模型,曲面 C 包括车辆前、后、左、右 4 个方向的非融合区域曲面,以及前左、前右、后左、后右 4 个方向的融合区域曲面。曲面 C 将车辆包裹在其中,因此进入前、后、左、右 4 个摄像头的光线都会经过曲面 C 。

使用曲面 C ,可以基于摄像头成像平面上的任意一点 p 得到曲面 C 上的点 P ,然后将点 P 投影到虚拟摄像 O 投影平面上得到 p_0 ,即通过曲面 C 实现了虚拟摄像头图像和真实摄像头图像之间的一一映射。摄像头 O 可以旋转,这样可以不同角度观察曲面 C 。

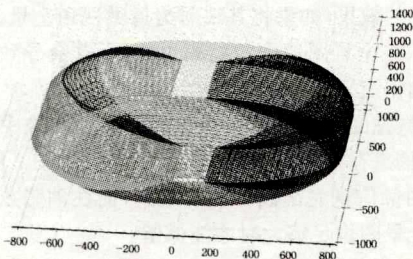


图4 曲面C模型

6 融合区域的处理

在两个摄像头 O_1 和 O_2 视野范围的交叉区域 $C_m \subset C$ 中, 一个点 $P \in C_m$ 可投影到两个摄像头图像中的点 p_1, p_2 , 一般情况下, p_1, p_2 点的像素值并不相同。融合 p_1, p_2 点的像素值, 会导致较严重的模糊。可以利用双目视觉技术, 恢复特征点的三维坐标 P' , 一般情况下, P' 点并不位于曲面 C 上。使用双目视觉时计算复杂度高, 同时在交叉区域到非交叉区域的过渡过程中, 重建的三维空间点 P' 会突然“跳”到曲面 C 上, 全景图像会呈现出非自然过渡现象。

靠近车辆的投影到摄像头图像中的三维点大多位于地面平面。地面点 P 的投影点 p_1, p_2 的像素值大多近似相同。对于 $P \in C_m$, 需要将其变换到地面的某一点 P_g , 使用 P_g 的两个投影点 p_1', p_2' , 进行融合。利用式(3)可以计算出任意一点 $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$ 在摄像头 O_c 下的投影, 等价于地面点 $P'_w(X'_w, Y'_w, Z'_w)$ 在 O_c 下的投影, $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$ 和 $P'_w(X'_w, Y'_w, Z'_w)$ 的关系可以表示为:

$$\begin{bmatrix} x'_w \\ y'_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{z_{c0}}{z_{c0} - z_w} x_w - \frac{x_{c0}}{z_{c0} - z_w} z_w \\ \frac{z_{c0}}{z_{c0} - z_w} y_w - \frac{y_{c0}}{z_{c0} - z_w} z_w \end{bmatrix} \quad (7)$$

可以看出, 当 $z_w < z_{c0}$ 时, $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$ 不存在与之对应的地面点 $P'_w(X'_w, Y'_w, Z'_w)$ 。

如图5所示, $P(x, y, z) \in C_m$ 在 $O_1(x_1, y_1, z_1), O_2(x_2, y_2, z_2)$ 上的投影($z < \min(z_1, z_2)$)等价于 P_{g1}, P_{g2} 在 O_1, O_2 上的投影, 显然 P_{g1}, P_{g2} 在 O_1, O_2 上的投影点 p_1, p_2 的像素值并不相同。这里使用加权融合方法生成一个新的地面点 $P_g = \lambda P_{g1} + (1-\lambda)P_{g2}$ 。 $\lambda \in [0, 1]$ 为融合参数, 越靠近 O_1 地面段, λ 越大。使用 P_g 在 O_1, O_2 的投影点 p_1', p_2' 进行融合, 可以得到最佳的融合效果, 且融合区域到非融合区域的过渡更加自然。

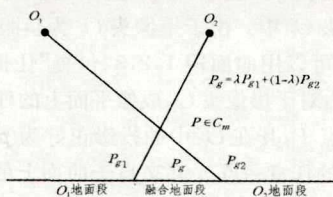


图5 融合区域的处理

7 真车实验

这里采用的曲面 C 由 C_1, C_2, C_3 3 个曲面构成, 表达式为:

$$C = \begin{cases} C_1 = \{P(x, y, 0) | 0 \leq d(x, y) \leq r\} \\ C_2 = \{P(x, y, k(\sqrt{R^2 - r^2} - \sqrt{R^2 - d(x, y)^2}) | \\ \quad r < d(x, y) \leq R\} \\ C_3 = \{P(x, y, k(\sqrt{R^2 - r^2} + \sqrt{R^2 - d(x, y)^2}) | \\ \quad 0 < d(x, y) \leq R\} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $d(x, y)$ 为 $P(x, y, z)$ 和车辆在 xy 平面的距离, R 和 r 可以控制曲面的大小和曲面平面段的大小, k 可以控制曲面的弯曲程度。

车长 5.1m, 宽 1.7m, 前后摄像头安装高度为 0.8m, 后摄像头向下 10° , 左右摄像头安装在后视镜上, 高度为 1.2m, 距前 1.4m, 向后偏转 30° , 如图6所示。

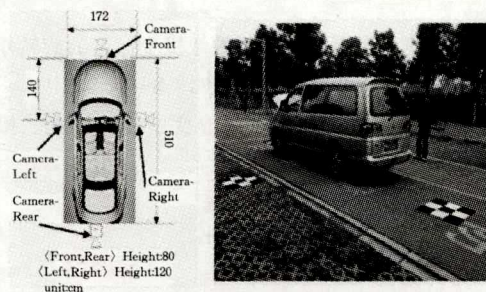


图6 室外真车摄像头安装示意图

选择 $r=3, R=6, k=1$ (单位:m), 图7为四路原始图像, 图8为生成的3D全景, 可以设置摄像头的位置和角度, 生成不同角度、不同视野范围的全景图像。图8(a)~图8(c) 3个子图都是摄像头距离车辆6m生成的前视角、后视角和左视角全景, (d)子图是摄像头距离车辆12m生成的右视角全景。对比原始图像和多视角全景可以看到, 原始图像中远离车辆的区域信息都得到了利用, 全景图像有了更大的视野范围。

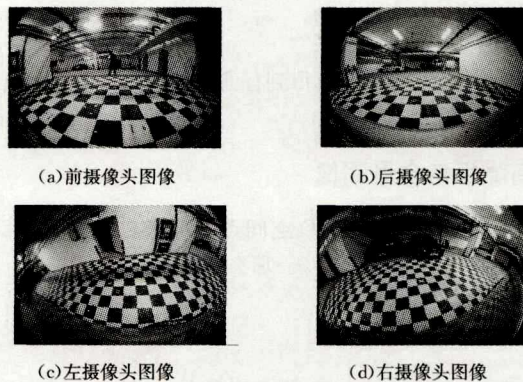


图7 四路原始图像

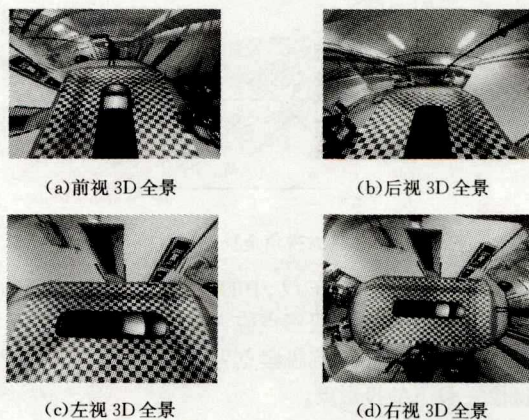


图8 多视角全景图像

图9对比了 $k=1$ 和 $k=2.5$ 时的鸟瞰视角全景图像。平面段的全景图一致, 但在曲面段则 k 值越大, 生成的全景弯曲越大, 视野范围也越大。

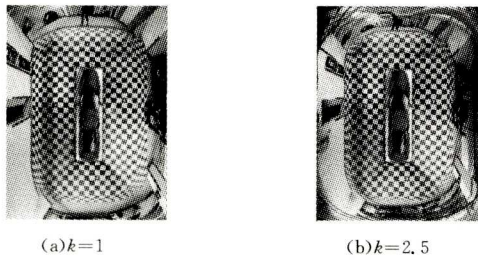


图 9 全景图像和清晰度

为了对比平面约束生成的 2D 全景和曲面约束生成的 3D 全景,取 3D 全景的视角为鸟瞰视角,同时,生成的全景分辨率都为 0.026m/pixel,最终生成的 2D 和 3D 全景如图 10 所示。使用文献[5]所示的方法标示全景图像的清晰度,可以看出,相对于 2D 全景图像中边缘地区存在的严重模糊和扭曲,3D 全景图像中只在车辆的右下角和左下角区域存在一定的模糊,大多数区域的模糊度都小于或等于 1,远远大于 2D 全景图像的清晰度。

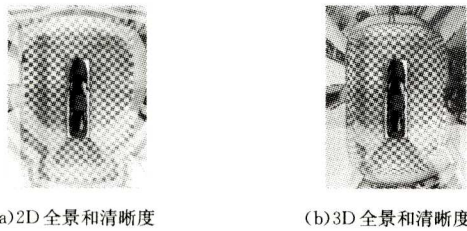


图 10 全景图像和清晰度

图 11 的横坐标表示图像像素的模糊度,值越大,表示该像素的清晰度越低;纵坐标表示图像像素数量。可以看出,3D 全景的所有像素的模糊度都小于 4,而 2D 全景图像的大量像素的模糊度都大于 4。

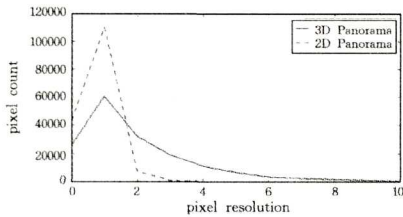


图 11 清晰度和像素关系

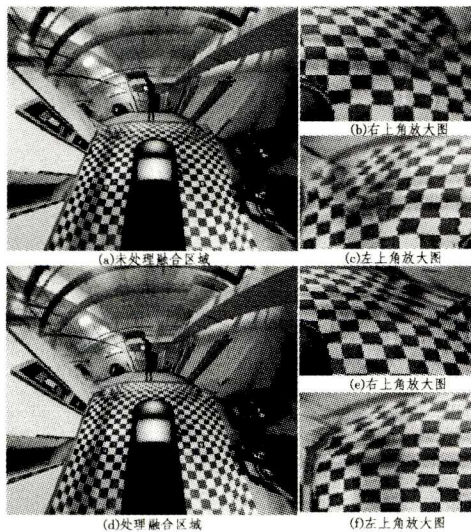


图 12 融合区域对比图

图 12 示出了融合区域处理前后的前视角全景的对比图。从右侧的区域放大的结果可以看出,融合区域处理之后,车辆左上角和右上角的融合区域的黑白块界限分明,相较于融合前的图像,过渡更加自然和不留痕迹。

结束语 本文简要介绍了基于曲面约束的车载环视全景的生成原理,相比基于单应矩阵生成的 2D 鸟瞰视角全景,基于曲面约束的多视角全景的生成方法更加灵活。针对相交区域,本文也提出了提高融合质量的新方法。实验结果证明,利用曲面约束生成的全景能充分利用原始鱼眼图像的信息,且边缘区域的清晰度有了很大提高。最后,融合区域的实验也证明,本文提出的方法使得融合区域图像更加清晰,过渡更加自然。

参 考 文 献

- [1] KATO K, SUZUKU M, FUJITA Y, et al. Image synthesis display method and apparatus for vehicle camera; U. S. Patent 7, 139,412[P]. 2006.
- [2] BAO Q Q. Research on algorithm of vehicle panoramic system based on projection to variable curved surface[D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2010. (in Chinese)
鲍千千. 基于可变曲面投影的汽车全景系统算法研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2010.
- [3] TANIGUCHI S, YAMADA M, HAYASHIDA T, et al. Multi Angle Vision System to Supplement Driver's Visual Field[C]// 17th ITS World Congress. 2010.
- [4] SCARAMUZZA D, MARTINELLI A, SIEGWART R. A flexible technique for accurate omnidirectional camera calibration and structure from motion[C]// IEEE International Conference on Computer Vision Systems, 2006(ICVS'06). IEEE, 2006; 45-45.
- [5] CHANG J Y, QIN R, LI Q, et al. Image Quality Assessment of Panoramic Imag[J]. Computer Science, 2014, 41(6): 278-281. (in Chinese)
常嘉义, 秦瑞, 李庆, 等. 全景鸟瞰拼接图像的质量评价方法[J]. 计算机科学, 2014, 41(6): 278-281.
- [6] SUHR J K, JUNG H G. Sensor Fusion-Based Vacant Parking Slot Detection and Tracking[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(1): 21-36.
- [7] GU X L. Panorama-based detection and recognition of road markings[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese)
顾霄琳. 基于全景环视的道路交通标线检测与识别方法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2014.
- [8] 陈秀新, 邢素霞. 图像/视频检索与图像融合[M]. 北京:机械工业出版社. 2012; 130-224.
- [9] BAGGIO D L, EMAMI S, ESCRIV D M, et al. Mastering OpenCV with practical computer vision projects[M]. Birmingham: Packt Publishing, 2012.
- [10] CHOI Y W, KIM K Y, PARK M R, et al. Development of around view system based on moving object detection for safe bus getting on and off[C]// 2015 IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE). IEEE, 2015.
- [11] JEON B, PARK G, LEE J, et al. A Memory-Efficient Architecture of Full HD Around View Monitor Systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(6): 2683-2695.