

一种嵌入式汽车鸟瞰全景图拼接算法

杨 力, 朱 株, 刘 济 林

(浙江大学 信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 为了解决汽车周围 360°场景重建问题, 提出一种适用于车载嵌入式平台的鸟瞰全景图拼接算法, 可作为智能汽车环境感知的有效手段. 将 4 个鱼眼摄像头安装于汽车车身, 可获得近距离道路环境的图像; 采用一种鱼眼图像投影到地面的方法, 克服传统方法中存在盲区的问题, 同时大大提高计算速度; 提出一种基于时域和空域信息的图像融合方法, 可以解决摄像机位置差异给拼接造成的困难; 为了解决摄像机快速标定问题, 采用一种交互式姿态调整方法, 运算过程简单, 对摄像机安装角度没有精确要求. 结果表明, 该算法能够实时生成高质量的全景图.

关键词: 图像拼接; 辅助驾驶; 摄像机标定; 全景图

中图分类号: TN 911

文献标志码: A

文章编号: 1008-973X(2014)02-292-05

Bird's-eye panoramic view algorithm for vehicle's embedded system

YANG Li, ZHU Zhu, LIU Ji-lin

(Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A panoramic image stitching algorithm for embedded system was proposed to reconstruct the 360-degree scene for intelligent vehicles. We used four fish-eye cameras to acquire the images of the near road area. A method of mapping the fish-eye image to the bird's-eye view eliminated the blind spots of the driver with low computational complexity. An image fusion method solved the parallax problem in image stitching by combining time and space-domain information. For convenience of installation and calibration of the cameras, an interactive tuning process was proposed to simplify the installation and make the calibration of extrinsic parameters easy. The experiment results indicate that the proposed method can produce panoramic image with high quality.

Key words: image stitching; assisted driving; camera calibration; panoramic image

全视野环境感知可以提高车辆在复杂环境中的安全性能, 在智能车辆中的应用正得到越来越多关注. 利用车载摄像头, 采用图像拼接技术, 对车辆周围进行 360°全景重建, 可以消除盲区, 减少汽车安全事故发生.

现有的汽车全景拼接方法主要是由传统的图像拼接算法^[1]引申而来. Liu 等^[2]提出一种典型的汽车全景图算法, 该方法在图像匹配阶段需要寻找一

条最佳缝合线, 在动态图像中视觉连续性不好, 另外该方法计算复杂度高. Yebes 等^[3]将鱼眼摄像头的原图在圆柱面上展开后拼接, 最终结果转换到极坐标下, 以环状图像显示出来. 此方法点是可以得到视野范围较远的鸟瞰图, 但在实际车载环境中, 图像重合区域较小, 并且重合区域分辨率不高, 图像拼接效果不理想. Li 等^[4]使用 3 个摄像头实现汽车两侧和车后方的图像拼接, 本文提出一种快速自动标定的算法.

收稿日期: 2012-10-22.

浙江大学学报(工学版)网址: www.journals.zju.edu.cn/eng

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60534070, 90820306).

作者简介: 杨力(1979—), 男, 湖北人, 博士生, 主要从事机器视觉研究. E-mail: larryy@zju.edu.cn

通信联系人: 刘济林, 男, 教授、博导. E-mail: liujl@zju.edu.cn

汽车全景图拼接^[2-6]不同于普通的图像拼接. 传统的图像拼接一般分成 2 个基本步骤:1)图像匹配,利用图像公共区域的相似特性,把多幅图像变换到同一坐标系下;2)图像融合,目的是消除图像之间的匹配误差,使合成图像看起来一致. 传统图像拼接常用于远距离拍摄,物体可近似认为在同一平面,摄像机位置移动相对拍摄距离而言很小.

汽车全景拼接的特点在于:1)360°拼接,图像首尾相连;2)被摄目标离摄像机比较近,例如 3 m 以内;3)摄像机一般相对位置固定;4)不同摄像头光照条件可能差异很大;5)典型的情况是采用 4 个鱼眼摄像头,公共视场小.

本文基于安装在汽车车身的 4 个广角(鱼眼)摄像头来实现车辆全视野环境感知. 为了解决以上分析中存在的问题,文章提出了一种图像投影变换的方法,生成地面重投影图像;在此基础上,结合时域和空域信息,消除摄像机视差造成的图像拼接错误,得到车体周围 360°全景重建结果. 为了满足车载快速安装要求,提出了一种多摄像机联合标定方法,可以大大提高标定效率. 实验结果表明,本文提出的方法可以生成实时的高质量全景图,满足车载计算平台要求.

1 图像投影变换

本文采用安装在汽车前、后、左、右的 4 个摄像头实现全景感知,算法流程如图 1 所示. 要实现 4 个摄像机的图像融合,关键步骤是将图像转换到同一坐标系下. 本文提出一种图像投影到地面的方法,克服了传统方法采用畸变矫正和单应映射造成的图像视角的损失.

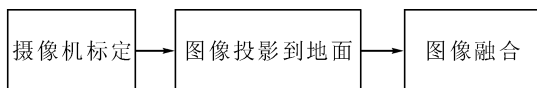


图 1 本文采用的全景图算法流程

Fig. 1 Flow chart of proposed panoramic view algorithm

1.1 虚拟摄像机

假设汽车正上方有一个虚拟摄像机,其光轴垂直于地平面,拍摄得到车身周围的鸟瞰图. 根据摄像机视野范围等参数,可以得出此虚拟摄像机的内参数. 具体如图 2、3 所示.

假设虚拟摄像机焦距为 f ,距地平面高度为 L ,车身四周视野范围为 W, H (包括车身尺寸). 那么图像尺寸 W_i, H_i 分别为

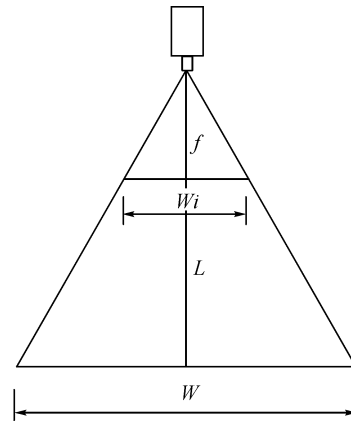


图 2 虚拟摄像机成像模型

Fig. 2 Virtual bird's-eye camera geometry model

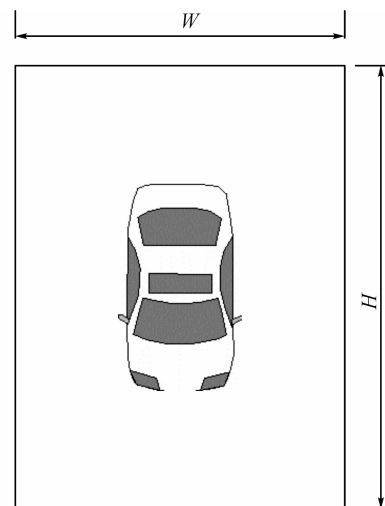


图 3 虚拟鸟瞰图示意图

Fig. 3 Example of virtual bird's-eye image

$$W_i = f/LW, \quad (1)$$

$$H_i = f/LH. \quad (2)$$

设鸟瞰图像宽、高分别为 w_0, h_0 (单位为像素), 则归一化焦距:

$$f_x = f w_0 / W_i,$$

$$f_y = f h_0 / H_i.$$

把式(1)、(2)代入上式得

$$f_x = L w_0 / W, \quad (3)$$

$$f_y = L h_0 / H. \quad (4)$$

摄像机光心为

$$u_0 = (w_0 - 1)0.5,$$

$$v_0 = (h_0 - 1)0.5.$$

于是得到虚拟摄像机内参数:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

1.2 鱼眼图到鸟瞰图的快速转换

对于虚拟摄像机上任一像素点 \tilde{m}^T , 其反投影直线与地平面交点为

$$X = K^{-1}[\tilde{m}^T, 1]^T s, \quad (6)$$

式中: T 为转置, s 为尺度系数, 标量. 摄像机坐标系下地平面方程为

$$n^T X = d,$$

式中: n 为平面法向量, d 为原点到平面的距离.

联解上两式可得

$$s = \frac{d}{n^T (K^{-1}[\tilde{m}^T, 1]^T)},$$

上式代入式(6)可得

$$X = (K^{-1}[\tilde{m}^T, 1]^T) \frac{d}{n^T (K^{-1}[\tilde{m}^T, 1]^T)}, \quad (7)$$

根据虚拟摄像机和鱼眼摄像机之间的位姿关系, 可将 X 转换到鱼眼摄像机坐标系下, 设为 X'

$$X' = RX + t, \quad (8)$$

式中: R 和 t 分别为虚拟摄像机在原摄像机坐标系下的旋转矩阵和平移向量. t 可以通过测量摄像机的位置和高度得到, 对同一款车型测量一次即可, R 可以采用初始估计值, 并微调, 见后文详述.

把式(7)代入(8)得

$$X' = (R + tn^T/d)K^{-1}[\tilde{m}^T, 1]^T,$$

根据鱼眼摄像机失真模型, 把 $X' = [x', y', z']^T$ 转换为鱼眼图像像素坐标 $m' = F(X')$, F 是一个非线性的转换, 由式(9)~(13)给出.

$$(x'', y'') = (x'/z', y'/z') \frac{r(\theta)}{r}, \quad (9)$$

$$m' = \begin{bmatrix} f'_x & 0 & u'_0 \\ 0 & f'_y & v'_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [x'', y'', 1]^T, \quad (10)$$

$$r = \sqrt{(x'/z')^2 + (y'/z')^2}, \quad (11)$$

$$\theta = \arctan(r), \quad (12)$$

$$r(\theta) = \theta + k_1 \theta^3 + k_2 \theta^5 + k_3 \theta^7 + k_4 \theta^9. \quad (13)$$

式中: $f'_x, f'_y, u'_0, v'_0, k_1, k_2, k_3, k_4$ 是鱼眼摄像机的内参, 由标定程序事先计算出.

最后, 可以得到虚拟摄像机和鱼眼摄像机之间的像素坐标转换关系:

$$m' = F[(R + tn^T/d)K^{-1}[\tilde{m}^T, 1]^T]. \quad (14)$$

由式(14)可以得到鸟瞰图和鱼眼图像像素点的对应关系. 如图4所示为鱼眼图和鸟瞰图转换的示例, 从中可以看出本文算法的优点. (a)为原图, 如果先进行畸变矫正(b), 再投影到地面(c), 可以看到视角有很大损失; 采用本文的方法, 可得到 180° 视角无



(a) 原图



(b) 矫正图



(c) 将(b)投影到地面得到的鸟瞰图



(d) 采用文本方法得到的鸟瞰图, 视角没有损失

图4 鱼眼图投影到地面示例

Fig. 4 Projection of fisheye image to bird's-eye image loss conversion.

1.3 鱼眼摄像机内参标定

鱼眼摄像机内部参数标定也就是求取式(9)~(13)中 $f'_x, f'_y, u'_0, v'_0, k_1, k_2, k_3, k_4$ 参数的过程, 可以通过离线计算得到. 标定方法与^[8]类似.

2 摄像机外参数校准

摄像机外参数是用来描述摄像机相对世界坐标系的位置和姿态. 鱼眼摄像头的安装位置是可以手动测量的, 但鱼眼摄像头姿态角难以准确估计. 传统的方法^[2], 利用单应矩阵求摄像机之间的相对关系,

标定过程不够简洁直观. Li 等^[4]采用了一种先由自标定求粗略外参,再通过最大化相邻摄像机图像的相关系数,对摄像机外参进行修正,这个修正过程采用迭代优化的方法,计算量较大,不利于嵌入式实时实现.

当摄像机安装之后,可以在某个初始角度基础上,通过手动微调,使图像重叠区域匹配最佳. 对每一步微调,重新生成鸟瞰图,需要为每一个像素点重新计算式(9)~(13),计算量非常大. 本节旨在提出一种摄像机角度调整的快速算法.

假设鸟瞰图上点 m_1 , 经过摄像机调整后变为 m_2 , 根据式(14),

$$m'_1 = F[(R_1 + tn^T/d)K^{-1}[\tilde{m}_1^T, 1]^T], \quad (15)$$

$$m'_2 = F[(R_2 + tn^T/d)K^{-1}[\tilde{m}_2^T, 1]^T], \quad (16)$$

式(15)的逆变换为

$$m_1 = K(R_1 + tn^T/d)^{-1}F^{-1}(m'_1), \quad (17)$$

由于 m_1, m_2 是对应点, $m'_1 = m'_2$, 因此,

$$m_1 = K(R_1 + t \frac{n^T}{d})^{-1}(R_2 + t \frac{n^T}{d})K^{-1}[\tilde{m}_2^T, 1]^T. \quad (18)$$

式(18)给出了 m_1 和 m_2 通过一个 3×3 矩阵进行转换的关系, 这使摄像机角度调整的计算量降到很低. 根据实际嵌入式平台测试, 单步调整的计算时间由 2 s 降低到 0.5 s.

3 图像融合

把 4 幅原图变换为同一虚拟摄像机下的鸟瞰图, 这时可以直接拼接得到一幅 360° 鸟瞰图. 为了减少拼接错误, 需要对公共视场区域进行图像融合.

Liu 等^[2]对每一帧选取最优缝合线, 对缝合线附近的像素进行融合. 由于最优缝合线是不断变化的, 所以会造成动态图像的视觉不连贯. 加权平均融合也是常采用的方法, 考虑到越靠近图像边界的像素越不清晰, 可根据像素点离公共视场区域边界的距离决定权重^[3]. 加权平均融合的缺点是容易引起图像模糊、重影, 特别是有障碍物出现在公共区域时. 有不少算法^[9-10]可以一定程度上解决拼接重影问题, 但算法复杂度很高. Chen 等^[6]根据时域上运动强度信息来进行图像融合, 即对有公共视场区域的 2 幅图像, 分别计算相邻 2 帧运动强度, 采用运动信息更剧烈的图像作为最终融合的结果. 此方法保留了图像清晰度, 避免了障碍物出现在公共视场区域时的重影问题, 但在图像交界处会出现图像拼接痕迹.

本文综合考虑时域和空域信息给图像融合的影响,

采用了一种更优的方法. 对编号为 n 和 $n+1$ 的相邻的摄像机, 融合之后的图像为

$$I_{\text{after}}(x) = w_n(x)I_n(x) + w_{n+1}(x)I_{n+1}(x), \quad (19)$$

式中: $I_{\text{after}}(x)$ 为像素点 x 融合后的像素值, $I_n(x)$ 与 $I_{n+1}(x)$ 是融合前 2 幅图像的像素值, 权重值是 $w_n(x), w_{n+1}(x)$ 定义为

$$w_n(x) = \frac{c_n}{c_n + c_{n+1}} \frac{d_n(x)}{d_n(x) + d_{n+1}(x)},$$

$$w_{n+1}(x) = \frac{c_{n+1}}{c_n + c_{n+1}} \frac{d_{n+1}(x)}{d_n(x) + d_{n+1}(x)},$$

$$c_n = \sum_{x \in \Omega} |I_{\text{down}, n}(x, t) - I_{\text{down}, n}(x, t-1)|,$$

$$c_{n+1} = \sum_{x \in \Omega} |I_{\text{down}, n+1}(x, t) - I_{\text{down}, n+1}(x, t-1)|.$$

式中: c_n, c_{n+1} 分别代表 2 个摄像机图像的时域复杂度, $I_{\text{down}, n}(x, t)$ 和 $I_{\text{down}, n+1}(x, t)$ 是 t 时刻对 2 幅图像下采样的结果, 下采样可以减少噪声影响, Ω 为公共视场区域, $d_n(x), d_{n+1}(x)$ 分别代表像素点 x 在 2 个摄像机图像中离图像边界的距离. 权值最后进行归一化.

如图 5 所示为本文算法与文献算法^[6]比较结果, 图中一个行人正经过汽车左后方, 可以看出, 对照算法存在一些拼接痕迹, 本文算法在保持图像融合清晰度的同时, 重叠区域过渡更加自然.

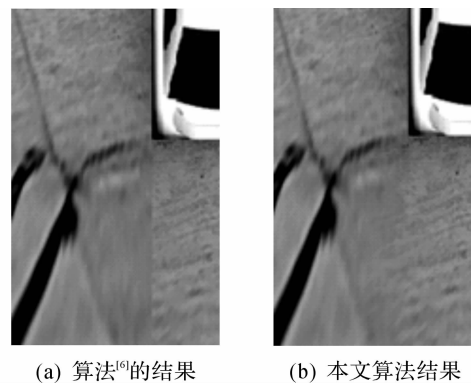
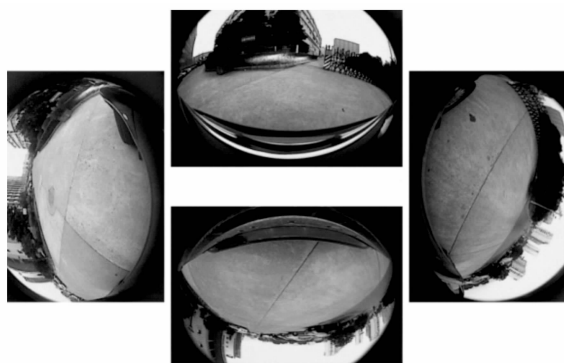


图 5 图像融合结果, 图为一行人经过汽车左后方的画面
Fig. 5 Result of image blending, showing a man passing by vehicle

4 实验结果

在 PC 上实现了算法原型, 并将算法移植到 DSP 平台上进行验证. DSP 平台为 TI DM6437, 输入为 4 路鱼眼图像, 输入分辨率为 CIF (352×288), 输出分辨率为 256×480 . 在一辆长 4.9 m, 宽 1.8 m 的普通汽车上安装本系统, 4 个摄像头分别固定安

装在车身前、后、左、右4个方位. 算法效果见如图6所示. 可以看出, 对4幅鱼眼图像进行拼接可以得到360°的、无盲区的全景鸟瞰图.



(a) 鱼眼摄像头输入原图



(b) 算法输出鸟瞰图

图6 本文算法效果

Fig. 6 Final result of our algorithm

为验证算法的实时性能, 在PC(Intel Core2, 2.3G)和DSP(TI DM6437)平台上测试了算法运行时间, 统计结果见表1. 可以看出, 在DSP平台上本算法可以达到实时要求. 在PC平台上, 输入图像分辨率对算法运行时间影响很小, 这是因为图像投影重建是一个查表过程, 运算时间主要由输出图像像素点个数决定.

表1 本文算法运行时间统计

Tab. 1 Performance of proposed algorithm

计算平台	输入分辨率/ 像素	输出分辨率/ 像素	运行时间/ ms
PC, 2.3G	352×288	256×480	8.2
PC, 2.3G	640×480	256×480	8.6
DM6437	352×288	256×480	25.0

5 结 语

本文提出了一种用于智能车辆环境感知的汽车全景实时拼接算法. 全视野、无盲区的环境感知越来越成为智能车辆发展的需要, 本文研究在无人车、车辆主动安全等领域有重要价值. 本文主要针对于车辆近距离全景感知, 进一步的研究可以侧重于车辆远距离全景重建.

参考文献(References):

- [1] RICHARD S. Image alignment and stitching: a tutorial [J]. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision archive*, 2006, 2(1): 1-104.
- [2] LIU Yu-chih, LIN Kai-ying. Bird's-eye view vision system for vehicle surrounding monitoring [C]// *Robvis'08 Proceedings Of The 2nd International Conference On Robot Vision*. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2008: 207-218.
- [3] YEBES J J, ALCANTARILLA P F. Surrounding view for enhancing safety on vehicles [C]// *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings of Workshop Perception in Robotics*. Spain: [s. n.], 2012: 596-601.
- [4] SHI Gang-Li, YING Hai. Easy calibration of a blind-spot-free fisheye camera system using a scene of a parking space [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(1): 232-242.
- [5] EHLGEN T, PAJDLA T, AMMON D. Eliminating blind spots for assisted driving [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2008, 9: 657-665.
- [6] CHEN Y Y, TU Y Y. An embedded system for vehicle surrounding monitoring [C]// *International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System*. Shenzhen: [s. n.], 2009: 92-95.
- [7] HARTLEY R, ZISSERMAN A. *Multiple view geometry in computer vision* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 325-340.
- [8] BOUGUET J V. Camera calibration toolbox for matlab [EB/OL]. 2012-12-08. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc
- [9] SRIKANTHA A, SIDIB E D. Ghost detection and removal for high dynamic range images: Recent advances [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2012, 27(6): 650-662.
- [10] UYTENDAELE M, EDEN A. Eliminating ghosting and exposure artifacts in image mosaics [C]// *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Kauai, Hawaii: [s. n.], 2001: 1063-6919.