

一种简单实用的鱼眼镜头中心补偿方法

James Li

Automotive FAE

摘要

汽车全景摄像系统在目前国产 SUV 中成为越来越普遍的配置。这套系统通过安装在车头、车尾和两侧后视镜共 4 个鱼眼摄像头捕获图像，然后使用拼接软件做变形、拼接处理，从而形成一张从车顶鸟瞰的俯视图用于辅助驾驶。全景拼接算法需要用到四个摄像头的参数。摄像头的参数包括内参和外参两部分。摄像头的外参是世界坐标系（以汽车中心点为原点）到镜头坐标系（以镜头光轴中心为原点）的变换矩阵，和摄像头安装的位置、角度有关。摄像头的内参指的是摄像头的焦距，镜头中心和鱼眼镜头的畸变曲线等。在汽车全景应用中安装在车前，车后和左右后视镜的四个镜头的外参是不同的，外参通过全景标定可以求出。四个摄像头的内参的理论值是已知的。但是由于制造工艺的限制，各个摄像头的内参相对理论值会有细微的偏差，全景拼接算法直接使用摄像头内参的理论值。如果摄像头内参的实际值和理论值偏差过大就会影响全景拼接的效果。最常见的内参偏差是镜头中心不准。本文提出了一种简单的镜头中心补偿方法，利用全景标定时检测出的角点拟合直线，计算拟合误差。在一定范围内遍历可能的镜头中心，以直线拟合误差最小的镜头中心为最佳中心。经过实车测试，这种方法简便，计算量小，可以有效的补偿镜头中心在垂直方向的偏差。本文首先分析了镜头中心对全景拼接的影响，然后简单对比 OpenCV 中的镜头中心检测方法，最后详细介绍了我们提出的镜头中心补偿的方法。

目录

1	镜头中心偏差对全景拼接的影响	3
2	OpenCV 中计算镜头中心的方法	5
3	本文的镜头中心补偿方法	5
4	总结	8
	参考文献	8

Figures

Figure 1.	鱼眼畸变示意图	3
Figure 2.	镜头坐标系到鱼眼图像素映射的几何图示	4
Figure 3.	镜头中心不准导致全景图不合格的示例	4
Figure 4.	在全景标定流程中新增的镜头中心补偿	5
Figure 5.	标定场景和前视检出的角点示例	6
Figure 6.	搜索垂直方向最佳镜头中心的直线拟合和误差计算	6
Figure 7.	遍历垂直方向镜头中心得到的直线拟合误差	7
Figure 8.	镜头中心补偿前（左）后（右）的效果对比	8

Tables

Table 1.	鱼眼镜头畸变表	3
-----------------	---------------	---

1 镜头中心偏差对全景拼接的影响

标清图像的显示分辨率是 720x480，理想的镜头中心是水平坐标 360 像素，垂直坐标 240 像素。由于镜头制造工艺的限制，摄像头的实际镜头中心相对理想中心会有偏差而且各个镜头的偏差是随机分布。制造工艺不好的镜头中心偏差可能达到 10 个像素。全景拼接需要两步变换来算出全景图对应的鱼眼图像位置。第一步把鸟瞰图的世界坐标位置变换到镜头坐标系，第二步经过鱼眼变换把镜头坐标系中的位置映射到鱼眼图的像素位置。这里的映射就是根据鱼眼镜头的畸变曲线计算出一个像点经过经过鱼眼失真的成像位置。

鱼眼镜头的畸变曲线可以使用 Table1 示例的 LUT 表描述（该 LUT 表对应的是我们实验使用的摄像头），LUT 表的输入是光线入射角度 FOV （本文公式中标记为 θ ），输出是对应的鱼眼成像像高（又称 **real height**，本文公式中标记为 rd ）。作为参照，表中第三列 **paraxial height** 是无畸变的成像像高（本文公式中标记为 ru ），有 $ru = \tan(\theta) * f$ 。Figure1 显示了这几个参数的物理意义。

Table 1. 鱼眼镜头畸变表

FOV (°)	real height(mm)	paraxial height(mm)
0.0	0	0
1.0	0.023549	0.022519
1.9	0.0471	0.04505
2.9	0.070652	0.067608
3.9	0.094207	0.090204
...
86.3	2.360239	20.73545
87.3	2.390905	28.20257
88.3	2.421359	44.03478
89.2	2.451566	100.2615

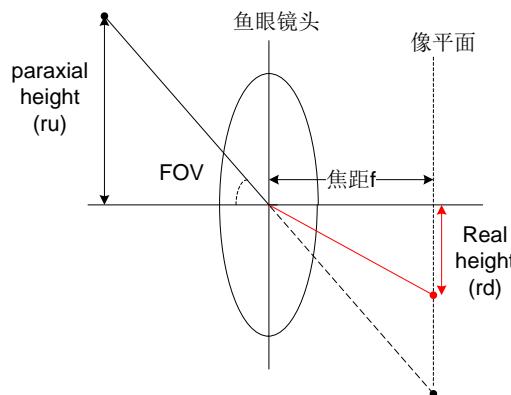


Figure 1. 鱼眼畸变示意图

用算术公式精确表示的鱼眼变换过程如下：

已知镜头坐标系的像素位置 (x, y) ，镜头中心 (cx, cy) 和镜头畸变映射表 LUT ，镜头焦距 f ，计算鱼眼畸变后的鱼眼像素位置 (x', y') 的过程是：

$$\begin{aligned}
 dx &= x - cx, dy = y - cy \\
 ru &= \sqrt{dx^2 + dy^2} \\
 \theta &= a \tan(ru / f) \\
 rd &= LUT(\theta) \\
 ratio &= rd / ru \\
 x' &= ratio * dx + cx, y' = ratio * dy + cy
 \end{aligned}$$

图 2 显示了这些变量的几何意义。

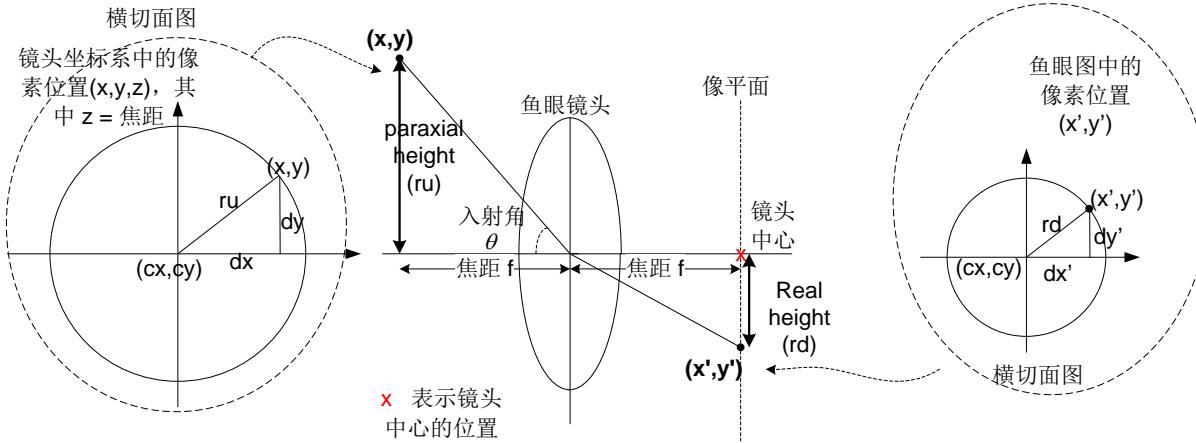


Figure 2. 镜头坐标系到鱼眼图像素映射的几何图示

可以看出镜头中心是鱼眼变换过程的关键参数。Figure3 是一个镜头中心不准导致全景拼接图像不合格的实例。需要强调的是镜头中心的垂直方向偏差对全景拼接的影响最大。本文介绍的方法主要就是补偿垂直方向的镜头中心。

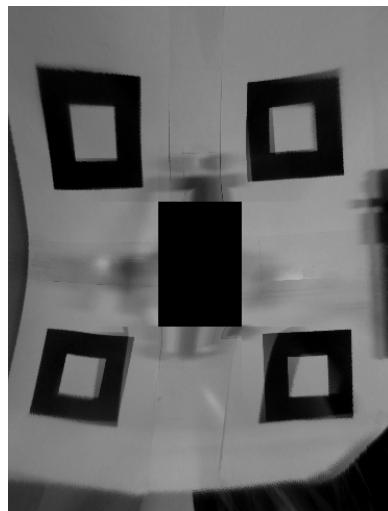


Figure 3. 镜头中心不准导致全景图不合格的示例

2 OpenCV 中计算镜头中心的方法

解决镜头中心不准最根本的方法是采购高质量的镜头，但这会增加造车成本。也可以用软件标定的方法对镜头的内参进行标定。OpenCV 中就有库函数可以做镜头标定。做法是保持相机位置固定，然后拍摄不同角度和距离的棋盘格图像。采集到的图像输入算法，软件先检测每幅棋盘格图像的角点。然后经过复杂的方程求解得出相机的内参。经过实测，抓取 10 张以上的合格图像可以计算出的比较准确镜头中心。这种方法计算出的镜头中心和专业机构测试的镜头中心比较，误差在 3 个像素以内。但是这种方法步骤较多，软件计算量大，不便于在生产线上实施。本文设计了一种非常简单的方法可以补偿镜头中心的垂直方向偏差。计算量小，实用效果较明显。

3 本文的镜头中心补偿方法

本文的镜头中心补偿是在现有全景标定流程的角点检测后面增加一个镜头中心补偿的步骤。补偿算法以检测到的鱼眼图角点做输入。补偿镜头中心后再继续原有流程即计算外参矩阵和生成全景拼接查找表。该补偿方法运算量小。实测表明在镜头中心偏差较大的情况下该方法对全景拼接的质量有较明显的改善。

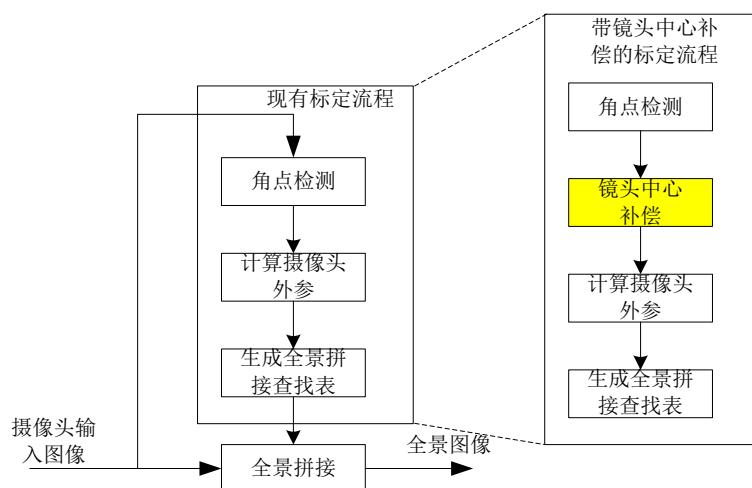


Figure 4. 在全景标定流程中新增的镜头中心补偿

全景标定方法是在车前和车后放置 4 个正方形标定布。角点检测就是在每个摄像头的鱼眼图中检测出正方形标定布的四个顶点。每个鱼眼镜头可以看到两个标定布，所以可以检出 8 个角点。

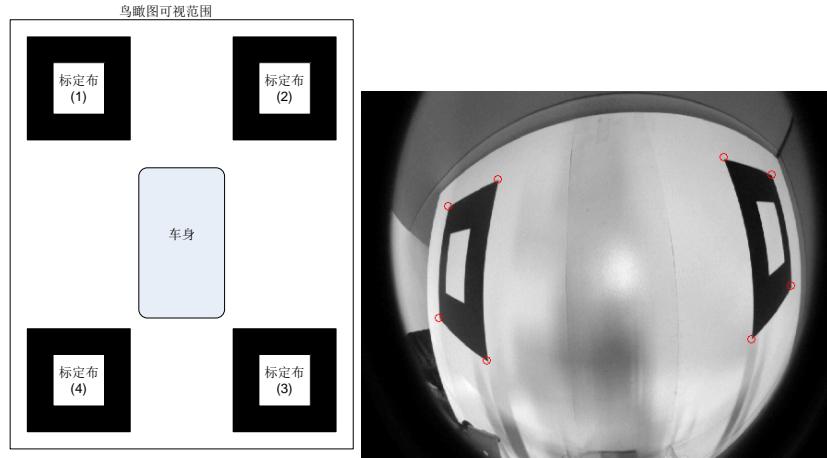


Figure 5. 标定场景和前视检出的角点示例

镜头中心的补偿算法首先对鱼眼图角点做展平，展平是前述的鱼眼变换的逆过程：

已知鱼眼图中的像素位置 (x', y') ，镜头中心 (cx, cy) 和镜头畸变映射表 LUT ，镜头焦距 f 。

鱼眼图中的角点位置在水平和垂直方向到镜头中心的距离是 $dx' = x' - cx$ 和 $dy' = y' - cy$

鱼眼图中的像高 $rd = \sqrt{dx'^2 + dy'^2}$ ，反查鱼眼畸变表得出对应的入射角度 $\theta = LUT(rd)$ ，展平后的像高是 $ru = \tan(\theta) * f$ ，得出 $ratio = ru / rd$ ，计算出展平后的角点位置 $x = ratio * dx' + cx$ 和 $y = ratio * dy' + cy$

展平的过程中镜头中心也是一个重要参数。展平结果的好坏反映了镜头中心的准确程度。我们可以在一定范围内遍历镜头中心做展平，选择展平结果最好的镜头中心作为最佳镜头中心。展平结果的好坏可以用直线拟合误差来衡量。如 Figure6，鱼眼图的八个角点展平后得到 a~h 共八个点。

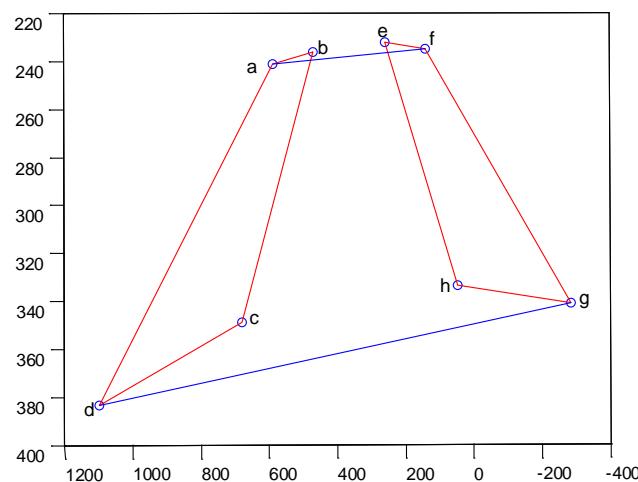


Figure 6. 搜索垂直方向最佳镜头中心的直线拟合和误差计算

因为标定布的摆放是水平对称的，所以在展平图中，*abef* 四个点应该位于同一条直线上，*cdgh* 四个点也应该位于同一条直线上。实际存在偏差，以 *cdgh* 四个点为例，点 *c* 和点 *h* 偏离直线 *cdgh* 的距离可以作为直线拟合的偏差。直线拟合和计算点到直线距离都是很简单的几何计算，本文不赘述。实验表明直线拟合偏差和镜头中心的偏差是有关的。实验中以默认镜头中心 $cx = 360, cy = 240$ 为中点，在正负 15 像素范围内遍历垂直方向的镜头中心 cy ，把不同的镜头中心值代入展平运算，用展平后的角点拟合直线，并计算直线的拟合误差。得到的部分结果如下：

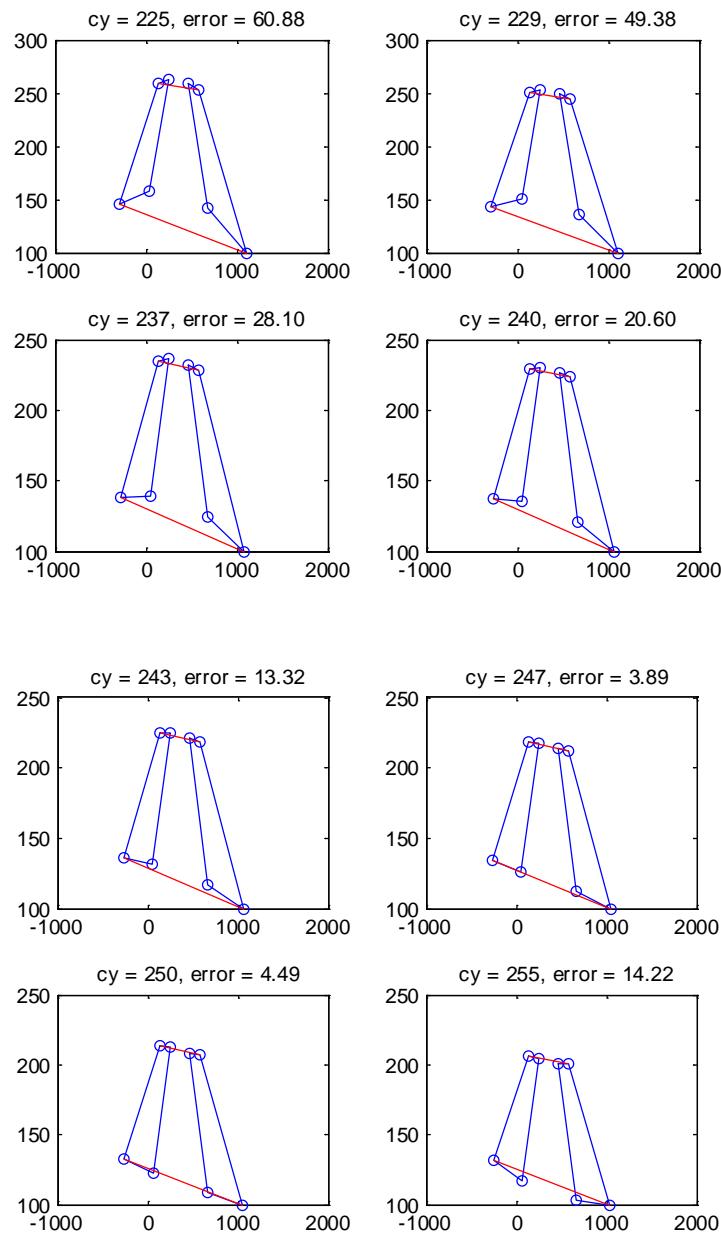


Figure 7. 遍历垂直方向镜头中心得到的直线拟合误差

可以看出误差值有明显的收敛趋势，最佳值是 $cy = 247$ 。我们把 $cx = 360, cy = 247$ 代入后续的外参计算和全景拼接。输出的全景图如 Figure8 右图，Figure8 左图是使用镜头中心 $cx = 360, cy = 240$ 算出的全景图。左下图中的标定回字框出现了弯曲变形而右下图有很大改善，说明这种方法补偿垂方向镜头中心是有效的。

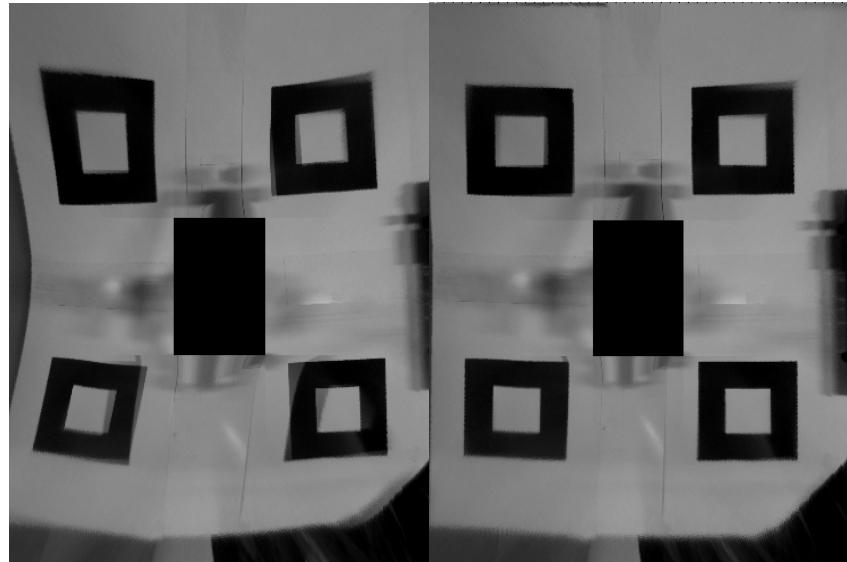


Figure 8. 镜头中心补偿前（左）后（右）的效果对比

4 总结

本文提出了一种简单的鱼眼镜头垂方向镜头中心偏差的补偿方法。计算量小，以角点检测的鱼眼图角点位置为输入。计算简单，应用于实车标定中几乎不增加标定时间。在镜头中心偏差大的情况下可以明显提升全景拼接的质量，具有很高的实用价值。

参考文献

1. *Learning OpenCV - Computer Vision with the OpenCV Library*. By Gary Bradski & Adrian Kaehler

有关 TI 设计信息和资源的重要通知

德州仪器 (TI) 公司提供的技术、应用或其他设计建议、服务或信息，包括但不限于与评估模块有关的参考设计和材料（总称“TI 资源”），旨在帮助设计人员开发整合了 TI 产品的应用；如果您（个人，或如果是代表贵公司，则为贵公司）以任何方式下载、访问或使用了任何特定的 TI 资源，即表示贵方同意仅为该等目标，按照本通知的条款进行使用。

TI 所提供的 TI 资源，并未扩大或以其他方式修改 TI 对 TI 产品的公开适用的质保及质保免责声明；也未导致 TI 承担任何额外的义务或责任。TI 有权对其 TI 资源进行纠正、增强、改进和其他修改。

您理解并同意，在设计应用时应自行实施独立的分析、评价和判断，且应全权负责并确保应用的安全性，以及您的应用（包括应用中使用的所有 TI 产品）应符合所有适用的法律法规及其他相关要求。你就您的应用声明，您具备制订和实施下列保障措施所需的一切必要专业知识，能够（1）预见故障的危险后果，（2）监视故障及其后果，以及（3）降低可能导致危险的故障几率并采取适当措施。您同意，在使用或分发包含 TI 产品的任何应用前，您将彻底测试该等应用和该等应用所用 TI 产品的功能。除特定 TI 资源的公开文档中明确列出的测试外，TI 未进行任何其他测试。

您只有在为开发包含该等 TI 资源所列 TI 产品的应用时，才被授权使用、复制和修改任何相关单项 TI 资源。但并未依据禁止反言原则或其他法理授予您任何 TI 知识产权的任何其他明示或默示的许可，也未授予您 TI 或第三方的任何技术或知识产权的许可，该等产权包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权或与使用 TI 产品或服务的任何整合、机器制作、流程相关的其他知识产权。涉及或参考了第三方产品或服务的信息不构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用 TI 资源可能需要您向第三方获得对该等第三方专利或其他知识产权的许可。

TI 资源系“按原样”提供。TI 兹免除对 TI 资源及其使用作出所有其他明确或默认的保证或陈述，包括但不限于对准确性或完整性、产权保证、无屡发故障保证，以及适销性、适合特定用途和不侵犯任何第三方知识产权的任何默认保证。

TI 不负责任何申索，包括但不限于因组合产品所致或与之有关的申索，也不为您辩护或赔偿，即使该等产品组合已列于 TI 资源或其他地方。对因 TI 资源或其使用引起或与之有关的任何实际的、直接的、特殊的、附带的、间接的、惩罚性的、偶发的、从属或惩戒性损害赔偿，不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害赔偿，TI 概不负责。

您同意向 TI 及其代表全额赔偿因您不遵守本通知条款和条件而引起的任何损害、费用、损失和/或责任。

本通知适用于 TI 资源。另有其他条款适用于某些类型的材料、TI 产品和服务的使用和采购。这些条款包括但不限于适用于 TI 的半导体产品 (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、评估模块和样品 (<http://www.ti.com/sc/docs/samptersms.htm>) 的标准条款。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2017 德州仪器半导体技术（上海）有限公司