

一种毫米波雷达和摄像头联合标定方法

罗 逍, 姚 远, 张金换

(清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 汽车安全技术正向着统一化的方向发展,传统的汽车被动安全领域可以通过如毫米波雷达、摄像头等主动式传感器进一步提高乘员保护效果。由于被动安全技术关注的车辆前方范围比主动安全近,该文以汽车被动安全研究为出发点,为了实现对目标的准确探测和定位,提出了以车辆纵向对称平面为基准的毫米波雷达和摄像头的联合标定方法,获取了必要的标定参数,并建立了2种传感器之间的坐标转换关系。试验结果表明,使用该标定方法后毫米波雷达和摄像头对目标的测量精度较高,坐标转换后也能较好地还原目标的真实位置,可以为汽车被动安全系统提供可靠的数据。

关键词: 汽车安全; 毫米波雷达; 摄像头; 标定

中图分类号: U 461.91

文献标志码: A

文章编号: 1000-0054(2014)03-0289-05

Unified calibration method for millimeter-wave radar and camera

LUO Xiao, YAO Yuan, ZHANG Jinhuan

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy,
Department of Automotive Engineering, Tsinghua University,
Beijing 100084, China)

Abstract: Unified automotive safety technology is the tendency of developing automotive safety technologies. The occupant protection performance of conventional automotive passive safety technology can be further improved by cooperating with active sensors such as millimeter-wave radars and cameras. The view of interest in automotive passive safety technology is nearer than that in active safety technology. A calibration method for radars and cameras was developed using vehicle longitudinal symmetry plane as a datum to more accurately detect and locate in automotive passive safety application. Calibration parameters were obtained, with the coordinate transformation relationship between the two sensors being developed. Validation tests show that the radar and the camera in this method have good measurement accuracy, and the target location can be transformed into picture coordinate accurately. This method can provide reliable data for automotive safety systems.

Key words: automotive safety; millimeter-wave radar; camera; calibration

汽车一体化安全概念的提出打破了原有的汽车主动安全技术与被动安全技术之间的界限^[1-2],碰撞时间轴的延伸将整个汽车安全技术统一为一体。在这种背景下,多种车载传感器融合是一种发展趋势,它将大大提高车辆对环境的感知能力,提高汽车整体的安全性能^[3-4]。其中测距传感器和图像传感器的融合能发挥二者的长处,在获取环境信息、进行目标识别等方面优势明显^[5-6]。毫米波雷达相较于其他测距传感器具有探测范围广、受天气影响小等优点,在汽车上使用得比较普遍。在多传感器探测系统中,要有一个统一的坐标系,因此在使用毫米波雷达和摄像头进行传感器融合前必须对两种传感器进行联合空间标定,以确保两种传感器获得的数据有一个统一的参照标准,并能互相转换。

目前国内外介绍测距传感器和摄像头联合空间标定方法的文献比较少,这其中介绍激光雷达和摄像头联合标定方法的又占了多数。由于毫米波雷达的角度测量精度比激光雷达低,且测量结果不稳定,因此一些学者提出的激光雷达和摄像头联合标定方法并不适用于毫米波雷达和摄像头的联合标定^[7-8]。也有一些学者不标定摄像头的内参数和外参数,通过直接求解雷达投影坐标系到图像坐标系的变换矩阵来实现将雷达探测目标投影到图像坐标系^[9-11],但是该方法无法通过摄像头获得被测目标的位置和尺寸信息,并且雷达测量目标的转换结果也不够准确。

本文利用车辆纵向对称平面为基准,实现了毫米波雷达和摄像头的空间联合标定,并提高了目标位置在不同坐标系下转换的精度。

收稿日期: 2013-03-03

作者简介: 罗逍(1988—),男(汉),吉林,博士研究生。

通信作者: 张金换,教授, E-mail: zhjh@tsinghua.edu.cn

1 标定方法

在本标定方法中,确定车辆纵向对称平面至关重要。首先,在车辆表面选取若干组对称点,通过这些对称点找到车辆中点。然后,使用激光水平仪使竖直激光平面尽可能多地扫过已标记出的车辆中点,并使未被激光扫过的车辆中点均匀地分布在激光两侧。该竖直激光平面即为车辆纵向对称平面,根据激光在车身和地面上做出标记。

1.1 雷达标定

毫米波雷达在安装时需要确保其水平角度、横摆角度和俯仰角度满足安装要求。3个角度如图1所示,其中水平角度和俯仰角度可以通过角度尺和重锤等工具进行测量,并通过调整雷达安装机构来满足雷达安装的角度要求。

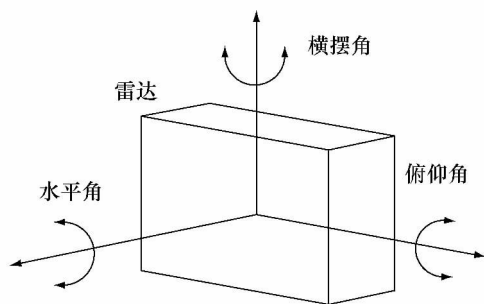


图1 雷达安装角度示意图

为了使雷达平面的法向量能够与车辆纵向对称平面平行,在车辆正前方 20 m 和 30 m 处分别放置截面积较小的杆状障碍物作为雷达探测目标。在标定横摆角的过程中,通过调整机构每次以相同的步长调整雷达横摆角度,分别测量放置车辆正前方的两处障碍物的横向距离,计为 d_1 和 d_2 ,按照式(1)计算横摆角度标定系数 k 。当调整机构调整到使 k 取最小值时,即认为雷达探测表面的法向量与车辆纵向对称平面平行。

$$k = |d_1 - d_2|, \quad (1)$$

1.2 摄像头标定

进行摄像头标定需要获取摄像头的内、外参数,保证摄像头的安装角度符合要求。为了简化摄像头测距模型,需要将摄像头外参数中的横摆角和水平角调零。首先标定摄像头的内参数,标定过程采用张正友标定方法^[12],使用摄像头采集不同角度的标准棋盘网格图像,通过 MATLAB 标定工具箱计算得到摄像头的光轴偏移量、焦距、镜头畸变参数等内参数。然后,在摄像头前设置标准的水平标志物和横向位置标志物,水平标志物为一把调平的水平尺,

横向位置标志物仍为车辆正前方 20 m 和 30 m 处放置的障碍物。使用摄像头进行图像测量,并将图像测量结果作为反馈信息将摄像头的水平角和横摆角调零。最后进行摄像头剩余外参数标定,本文采用消失点标定法^[13],选取空间中已知间距的两条平行线标定摄像头的安装高度 H 和俯仰角 θ 。

2 坐标系转换关系

毫米波雷达和摄像头分别单独标定使雷达探测面的法向量和摄像头光轴分别与车身纵向对称平面平行,在此基础上建立雷达投影坐标系 $O_{rw} - x_{rw}y_{rw}z_{rw}$,原点为雷达探测中心点在地面上的投影点, x_{rw} 轴指向车身右侧, y_{rw} 轴指向车辆前进方向, z_{rw} 轴为竖直方向;摄像头投影坐标系 $O_{cw} - x_{cw}y_{cw}z_{cw}$ 的原点为摄像头光心在地面的投影点, x_{cw} 轴指向车身右侧, y_{cw} 轴指向车辆前进方向, z_{cw} 轴为竖直方向。雷达投影坐标系与摄像头投影坐标系是空间中相互平行的 2 个坐标系,它们之间的空间相对关系如图 2 所示。

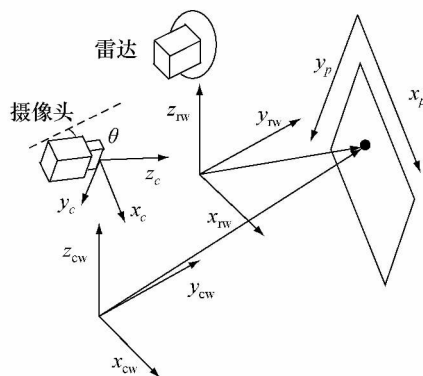


图2 雷达和摄像头坐标系示意图

图 2 中 $O_p - x_p y_p$ 为图像坐标系,原点位于图像的左上角; $O_c - x_c y_c z_c$ 为摄像头坐标系, z_c 轴与摄像头光轴重合, x_c 轴和 y_c 轴分别与 x_p 和 y_p 轴平行。根据小孔成像模型,2 个坐标系之间有如下关系。

$$\begin{cases} a = \frac{x_c}{z_c} = \frac{x_p - c_x}{f_x}, \\ b = \frac{y_c}{z_c} = \frac{y_p - c_y}{f_y}. \end{cases} \quad (2)$$

又根据摄像头坐标系及摄像头投影坐标系之间的平移和旋转关系,可以得到二者之间的坐标转换公式如下:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin\theta & -\cos\theta \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cw} \\ y_{cw} \\ z_{cw} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ H\cos\theta \\ H\sin\theta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

假设地面为平面,并且目标在地面上,即目标在摄像机投影坐标系当中有 $z_{cw}=0$,则联合式(2)和式(3)可以得到由图像坐标系到摄像头投影坐标系之间的转换公式:

$$\begin{cases} x_{cw} = ay_{cw}\cos\theta + aH\sin\theta, \\ y_{cw} = \frac{H(\cos\theta - b\sin\theta)}{b\cos\theta + \sin\theta}. \end{cases} \quad (4)$$

在之前毫米波雷达与摄像头标定工作的基础上,雷达投影坐标系和摄像头投影坐标系的相互转换只需要平移即可实现,如式(5)。

$$\begin{cases} x_{cw} = x_{rw} - L_x, \\ y_{cw} = y_{rw} + L_y. \end{cases} \quad (5)$$

根据式(2)、(4)和(5)可以得到雷达投影坐标系中任意一点转换到图像坐标系中的转换关系:

$$\begin{cases} x_p = c_x + \frac{(x_{rw} - L_x)f_x}{H\sin\theta + (y_{rw} + L_y)\cos\theta}, \\ y_p = c_y + \frac{[H\cos\theta - (y_{rw} + L_y)\sin\theta]f_y}{H\sin\theta + (y_{rw} + L_y)\cos\theta}. \end{cases} \quad (6)$$

其中: c_x 、 c_y 为光轴偏移量; f_x 、 f_y 为焦距,为摄像头内参数,通过标定获得; L_x 、 L_y 分别为雷达投影

坐标系和摄像头投影坐标系 x 轴之间的间距和 y 轴之间的间距,可以通过测量获得。

3 试验验证

在本文中,毫米波雷达和摄像头都可以独立地测量目标与本车间的相对位置关系,并且可以通过式(6)将毫米波雷达探测得到的目标位置转换到图像坐标系中,从而可以进行目标识别等后续工作。因此,在试验验证的过程中,毫米波雷达和摄像头所得的测量数据将分别和实际数据做比较。汽车碰撞预判系统所关注的前向距离相比于自适应巡航系统等汽车主动安全系统所关注的前向距离要近许多,关注的横向距离限于本车行车道内。本文在车辆前方30 m、左右各2 m的范围内设置目标物。为减小毫米波雷达测量横向位置的不确定性,本文使用界面为方形的铁杆作为目标物,目标物正面宽度为7.8 cm。2种传感器在试验中测得的数据如表1所示。

表1 试验数据

目标实际距离		雷达测量值		摄像头测量值	
纵向/m	横向/m	纵向/m	横向/m	纵向/m	横向/m
10.22	1.50	10.49	1.53	10.33	1.50
10.22	-1.20	10.53	-1.28	10.38	-1.24
10.22	0.00	10.54	-0.01	10.28	-0.01
14.03	1.50	14.22	1.48	14.18	1.55
14.03	-1.50	14.32	-1.49	14.18	-1.53
14.03	0.00	14.24	0.05	14.36	0.02
19.86	1.50	20.03	1.46	19.96	1.53
19.86	-1.50	20.05	-1.48	20.13	-1.52
19.86	0.00	20.01	0.04	20.13	0.01
29.44	1.50	30.03	1.62	29.28	1.53
29.44	-1.50	29.81	-1.42	29.96	-1.53
29.44	0.00	29.40	0.12	29.28	0.02

表1中摄像头测量值是经过测距模型转换后得到的数据。从表中可以看出,在测试区域内2种传感器测量目标的纵向距离误差都在0.6 m以内,在20 m以内的测试区域摄像头测量误差较小,在20 m~30 m之间的测试区域,雷达的测量误差较小。主要原因是,摄像头在测量远处目标时单位像素所对应的实际空间距离变大,因此在进行图像测量的过程中由于像素计算误差而带来的实际空间测量误差变大。2种传感器的横向距离测量误差都在0.12 m

以内。毫米波雷达的角分辨率不高,横向距离测量误差大于摄像头。雷达在整个测试范围内,纵向测量误差和横向测量误差都较为平均。

为了进行进一步的目标识别和数据融合,用式(6)将雷达测量值转换到图像坐标系中,得到如图3所示转换结果。图中白点为雷达测量值转换后的坐标点,可以看出与实际试验中使用的杆状目标物位置吻合得较好。

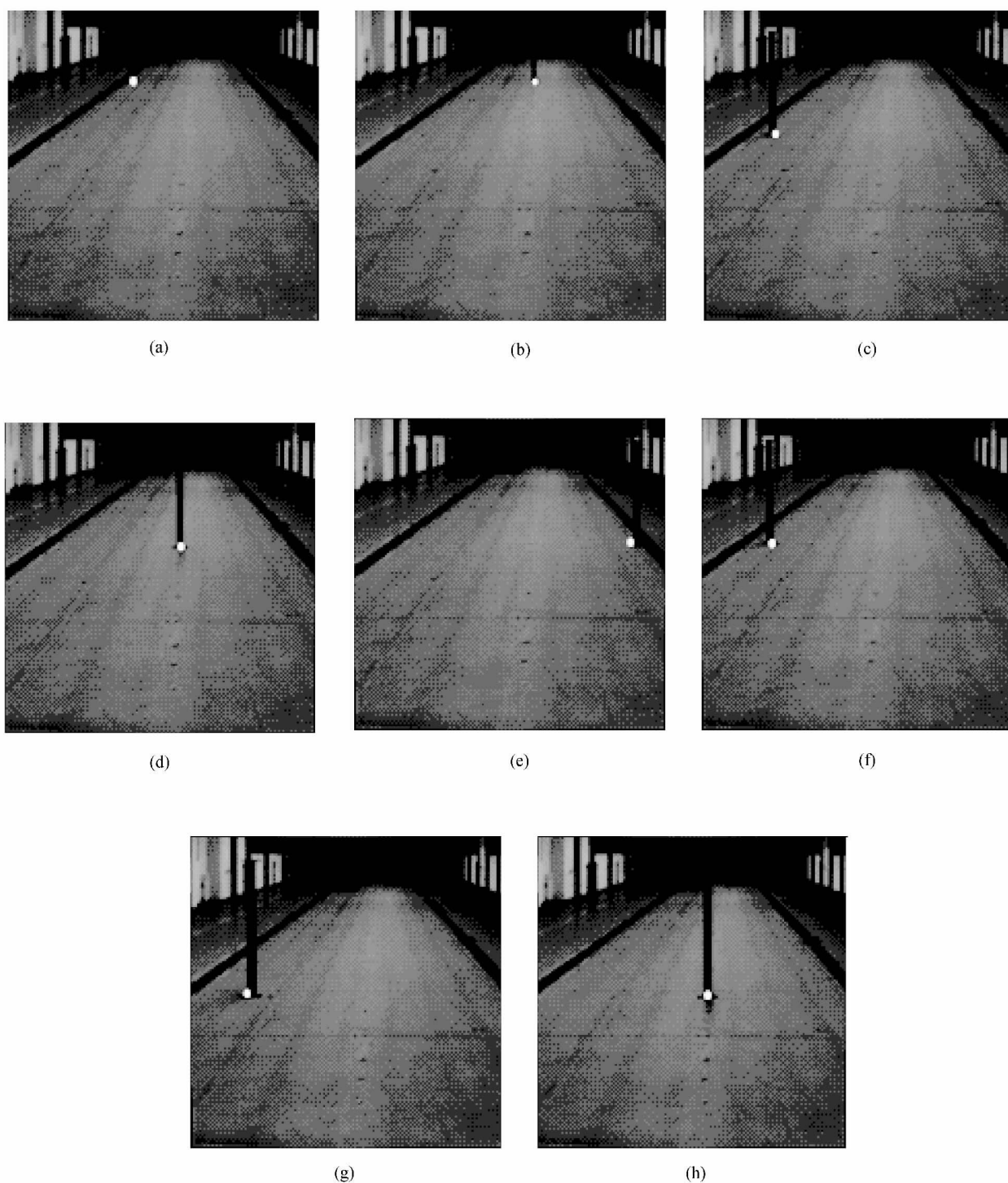


图3 雷达测量数据转换示意图

4 结 论

本文通过找取车辆纵向对称平面作为标定基准,校准了车载毫米波雷达和摄像头的安装角度,标定了摄像头的内、外参数,统一了雷达投影坐标系和摄像头投影坐标系的三坐标轴方向,实现了毫米波雷达和摄像头的联合标定。并建立了雷达投影坐标

系到图像坐标系的转换关系。试验结果表明,这种以车辆纵向对称平面为统一基准的联合标定方法能够保证毫米波雷达和摄像头都获得较高的数据测量精度,毫米波雷达探测目标投影到图像坐标系的位置也比较准确,这也为之后的数据融合工作奠定了基础。

参考文献 (References)

- [1] Gietelink O. Design and validation of advanced driver assistance system [D]. Delft; Delft University of Technology, 2007.
- [2] Lemmen P, Fagerlind H, Unselt T, et al. Assessment of integrated vehicle safety systems for improved vehicle safety [J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2012, **48**: 1632-1641.
- [3] Pietzsch S, Vu T, Burlet J, et al. Results of a precrash application based on laser scanner and short-range radars [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2009, **10**(4): 584-593.
- [4] Bertolazzi E, Biral F, Da L, et al. Supporting drivers in keeping safe speed and safe distance: The SASPENCE subproject within the European framework programme 6 integrating project PREVENT [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(3): 525-538.
- [5] Alessandretti G, Broggi A, Cerri P. Vehicle and guard rail detection using radar and vision data fusion [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2007, **8**(1): 95-105.
- [6] JI Zhengping, Luciw M, WENG Juyang, et al. Incremental online object learning in a vehicular radar radar-vision fusion framework [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, **12**(2): 402-411.
- [7] 郭磊, 刘志峰, 王建强, 等. 雷达与机器视觉的空间同步方法 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2006, **46**(11): 1904-1907.
GUO Lei, LIU Zhifeng, WANG Jianqiang, et al. Spatial synchronization method for lidar and computer vision [J]. *J Tsinghua Univ: Sci and Technol*, 2006, **46**(11): 1904-1907. (in Chinese)
- [8] GAO Dezhi, DUAN Jianmin, YANG Xining, et al. A method of spatial calibration for camera and radar [C]// *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation*. Jinan, China; IEEE Press, 2010: 6211-6215.
- [9] Sugimoto S, Tateda H, Takahashi H, et al. Obstacle detection using millimeter-wave radar and its visualization on image sequence [C]// *Proceedings of the 17th International Conference of Pattern Recognition*. Cambridge, UK; IEEE Press, 2004: 342-345.
- [10] LIU Xianru, CAI Zixing. Advanced obstacles detection and tracking by fusing millimeter wave radar and image sensor data [C]// *International Conference on Control, Automation and Systems*. Gyeonggi-do, Korea; IEEE Press, 2010: 1115-1120.
- [11] WANG Tao, ZHENG Nanning, XIN Jingmin, et al. Integrating millimeter wave radar with a monocular vision sensor for on-road obstacle detection applications [J]. *Sensors*, 2011, **11**(9): 8992-9008.
- [12] ZHANG Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330-1334.
- [13] Southall B, Taylor C. Stochastic road shape estimation [C]// *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. Vancouver; IEEE Press, 2001: 205-212.