

# 基于机器视觉的雷达测角精度评估系统

江利中, 雷威, 王 磊, 杨晓飞

(上海无线电设备研究所, 上海 200090)

**摘要:** 利用光学成像原理, 设计了基于机器视觉的雷达测角精度评估系统, 主要包括光学部分 (CCD 相机)、图像采集部分和图像处理与目标角度信息提取部分等; 机器视觉的定位成像和高精度测角, 保证了该系统能在紧缩场中对雷达系统进行自动化、高精度、实时的角度测量校准和测量精度评估试验; 理论分析和仿真结果表明, 补偿由于雷达系统和机器视觉系统安装位置不同引起的角度测量偏差后, 在正常的实验测量误差条件下, 基于机器视觉的角度测量校准和评估系统能达到  $0.005^\circ$  的校准和评估精度。

**关键词:** 雷达; 角度测量; 机器视觉; 校准; 评估

## System for Evaluating Precision of Radar Angular Measuring Based on Machine Vision

Jiang Lizhong, Lei Wei, Wang Jun, Yang Xiaofei

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** an evaluation system for the precision of radar angular measuring based on the principle of optical imaging is proposed in this paper, which is composed by optical part (CCD camera), image sampling part and the image processing and target angle extracting part. With this system, the experimentation of calibrating fixed error and evaluating precision for radar angular measuring can be carried out with automation, high precision, and real-time processing. Theoretical analysis and simulation results show that the calibration and evaluation system based on machine vision has a precision of  $0.005^\circ$  for calibrating and evaluating radar angular measuring, under the condition that the usual experimental measurement error is achieved and the deviation caused by the difference of the position between radar system and machine vision system is compensated.

**Keywords:** radar; angular measuring; machine vision; calibration; evaluation

## 0 引言

雷达测量误差有两类: 系统误差和随机误差<sup>[1-2]</sup>。其中系统误差在相应的标定和校准后可以修正。另外, 为确保雷达的工作性能, 研制中需要对雷达进行测量精度的评估和验证。传统雷达 (如地基雷达) 的标定、校准和评估技术已较为成熟, 常用的方法主要是利用光学瞄准镜 (或电视望远镜)<sup>[3-4]</sup>。但利用该传统方法标定过程复杂, 且获得的标定精度有限, 难以满足现代雷达的要求。现代雷达的研制、试验和校准均在实验室或紧缩场 (微波暗室) 中进行。如多台经纬仪 (一般 6 台) 结合棱镜可以实现高精度的角度测量校准、标定和评估<sup>[5]</sup>, 但不能实现自动化实时连续校准, 且有标定过程复杂、高精度的光学测量设备昂贵等缺陷。为提高雷达角度测量的校准和标定精度, 同时具有操作方便、自动化和试验中实时校准的能力, 本文提出基于机器视觉与图像处理、结合利用二维扫描架和二维转台的大视角范围雷达角度测量实时高精度校准方法。其中, 机器视觉就是用机器代替人眼来做测量和判断。基于机器视觉的测量技术是图像传感、图像处理、测量等技术的有机结合, 具有自动化、非接触、高精度等优点<sup>[6]</sup>, 在当前的研究和应用较多、技术也相对成熟<sup>[7][8]</sup>。且已有的研制成果主要用于精加工和产品加工微小误差的检测, 测量精度均在微米级<sup>[9]</sup>。因此, 基于机器视觉的方法可用于高精度的雷达

角度测量校准和标定。

## 1 雷达角度测量的实时校准试验系统

星载/弹载雷达通常采用单脉冲测角技术, 常用的有振幅式、相位式、振幅和差式等测角方式<sup>[10]</sup>。但不管哪种方式测角, 测量的都是信号到达方向相对雷达某一平面 (一般为天线口径平面) 的夹角。如果在雷达角度测量的校准和标定过程中, 利用 CCD 相机拍摄目标模拟器, 然后将图像数字化并通过千兆以太网技术传输到计算机, 再通过目标识别、边缘提取、中心点提取等图像处理和目标角度计算, 便可实时得到高精度的目标角度信息。将此角度信息与雷达测量的角度信息对比便可用于雷达角度测量的校准和标定。如图 1 所示为雷达角度测量的校准、标定和评估试验系统 (平视图)。

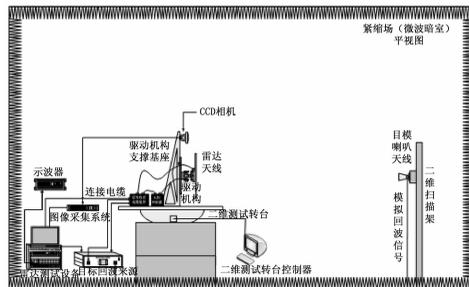


图 1 雷达角度测量的校准和标定试验系统 (平视图)

收稿日期: 2014-04-15; 修回日期: 2014-05-16。

作者简介: 江利中 (1986-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事星载微波雷达设计方向的研究。

## 2 基于机器视觉的角度实时测量系统

雷达角度测量实时校准试验系统中,除了雷达系统本身外,最关键的就是基于机器视觉的角度实时测量系统,该系统由光学部分(CCD相机)、图像采集部分和图像处理与目标角度信息提取等部分组成。其中,图像采集部分包括图像采集模块和千兆以太网图像数据实时传输模块。

### 2.1 光学部分

CCD相机的光学头部示意图如图2所示。当用固定像距相机对目标成像时,目标的方位和俯仰角可以由光学图像中目标位置坐标计算得到。设CCD焦平面的中心坐标为 $(V_0, H_0)$ ,目标成像的中心坐标为 $(V, H)$ ,则目标方位角 $\alpha$ 和俯仰角 $\beta$ 可由下面两个公式得到:

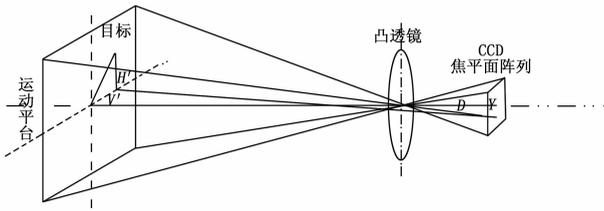


图2 光学系统示意图

$$\alpha = \arctan\left(\frac{V - V_0}{D}d\right) \quad (1)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{H - H_0}{D}d\right) \quad (2)$$

其中: $d$ 为CCD象元的尺寸, $D$ 为像距。目标的视线偏离角度则为:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\sqrt{(H - H_0)^2 + (V - V_0)^2}}{D}d\right) \quad (3)$$

为得到目标成像距透镜光心的光学距离,可由凸透镜成像规律公式精确计算:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D} + \frac{1}{L} \Rightarrow D = \frac{Lf}{L - f} \quad (4)$$

其中: $f$ 为焦距, $L$ 为物距。如此,只要从目标图像中准确的提取出目标中心点坐标和图像视场零角度坐标,结合目标到相机的水平距离,就可以根据以上公式精确求解出目标所在的俯仰,方位和视线偏角等位置信息。

### 2.2 图像采集和千兆以太网传输部分

为实现角度测量的自动化和实时性,直接在片上系统进行相应的图像处理显然实时性不能满足要求,因此需要将图像传输到计算机中进行实时处理。要实现图像大数据量的传输,同时又要求较高的实时性,必须利用目前新兴的千兆以太网大数据量传输技术<sup>[11-12]</sup>。

根据角度实时测量的要求,图像采集和千兆以太网传输部分主要完成如下功能:

- 1) 图像信息的数字化;
- 2) 图像数据的发送和接收;
- 3) 网络传输数据包的抓取;
- 4) 网络协议的处理,数据解包;
- 5) 完成相关逻辑功能。

大吞吐量千兆以太网传输技术包括软件和硬件,其软硬件结构关系如图3所示。

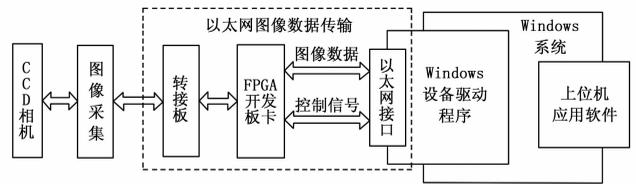


图3 千兆以太网传输系统软硬件结构关系图

软件部分包括上位机软件和FPGA软件两个部分:上位机软件主要功能是处理数据的抓包和解包操作,FPGA软件主要完成FPGA内部相关逻辑功能的实现。为减少设计难度,软件部分可以基于现有的开源软件WinPCAP实现。硬件电路主要是建立PC和图像采集单元之间的数据传输链路,实现不同类型接口间的数据转换。

### 2.3 图像处理与目标角度信息提取部分

图像处理与目标角度信息提取部分主要有3个模块:中值滤波,二值化和目标中心点坐标提取。1)中值滤波是为了降低成像时噪声的影响,以一定大小的图像模板,对整个图像遍历,每次都取灰度中间值作为模板中心点的像素灰度值,这样可以有效的降低图像中的噪声;2)图像二值化是对图像中目标区域及其轮廓进行提取之前的一个必经过程,它不仅可以进行进一步的去除噪声的影响,而且可以提取出目标像素;3)目标中心点提取是为了确定目前目标所在的精确位置坐标。在光学图像中,点目标的位置是确定的,可直接参与计算。

## 3 系统间异位引起测量角度偏差分析

由图1可知,校准、标定和评估系统中,雷达天线的位置和光学部分(CCD相机)的安装位置不一致,雷达和机器视觉两个测角系统测量的结果必然存在一个固有的角度偏差。

如图4所示,设雷达到目标模拟器的水平距离为 $L$ ,目标偏离雷达天线中垂线方位向距离 $l$ 、俯仰向高度 $h$ ,机器视觉的光学部分与雷达天线的安装位置水平差为 $m$ 、高度差为 $n$ ,则在校准和标定过程中,方位和俯仰角度差分别为:

$$\Delta\alpha = \arctan\left(\frac{l}{L}\right) - \arctan\left(\frac{l}{L+m}\right) \quad (5)$$

$$\Delta\beta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{h}{L}\right) - \arctan\left(\frac{h-n}{L+m}\right), h < 0 \text{ 或 } h > n \\ \arctan\left(\frac{h}{L}\right) - \arctan\left(\frac{n-h}{L+m}\right), 0 \leq h \leq n \end{cases} \quad (6)$$

在 $L=20\text{ m}$ 、 $m=0.2\text{ m}$ 、 $n=0.3\text{ m}$ 时,两系统测量的角度偏差仿真结果如图5所示。从图中可以看出,方位角度差在目标真实角度为 $20^\circ$ 左右时达到 $0.2^\circ$ ,俯仰方向达到 $0.75^\circ$ ,而且目标真实角度确定后,测量结果中方位和俯仰角度差就随之确定,因此在试验中可以对机器视觉测角系统测量的结果进行相应的补偿即可作为雷达测角的校准参考。

## 4 校准和评估系统的精度和性能分析

从上述分析可知,基于机器视觉的雷达角度测量实时校准系统结构紧凑,实现简单,计算方法也不复杂,能够实时完成目标角度的测量。而且通过像素级的计算来求解目标相对雷达的角度,其灵敏度非常高。实际测量过程中,测角灵敏度可用一个像素的位置变化来衡量:

此, 如何提高算法的鲁棒性是下一步研究的侧重点。

参考文献:

[1] 何伟红, 金荣红, 耿军平, 等. 一种基于分数阶傅里叶变换域加权 MUSIC 算法的移动单站多目标无源定位方法 [J]. 上海交通大学学报, 2011, 45 (3): 345-349.

[2] 刘春辉, 丁文锐, 李红光. 基于相位差测量的无人机单站无源定位系统 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (9): 2015-2018.

[3] 曹铁超. 无线电定位算法研究及目标运动分析 [D]. 南京: 东南大学, 2009.

[4] Li G, Yang S W, Nie Z P, Direction of Arrival Estimation in Time Modulated Linear Arrays With Unidirectional Phase Center Motion [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 28

(4): 1105-1111.

[5] Wang X, He Z S. Target motion analysis in three-sensor TDOA location system [J]. Information Technology Journal, 2011, 10 (6): 1150-1160.

[6] Deming R, Schindler J, Perlovsky L. Multi-Target/Multi-Sensor Tracking using Only Range and Doppler Measurements [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45 (2): 593-611.

[7] 吴 昊, 陈树新, 张衡阳, 等. 基于递推最小二乘的单站无源定位仿真分析 [J]. 火力与指挥控制, 2013, 38 (6): 19-22.

[8] 王 鼎, 张 莉, 吴 瑛. 基于角度信息的约束总体最小二乘无源定位算法 [J]. 中国科学 E 辑: 信息科学, 2006, 36 (8): 880-890.

[9] 吴顺华, 辛 勤, 万建伟. 对卫星目标的仅测角地基单站无源定位可观性分析 [J]. 航空学报, 2009, 30 (1): 104-108.

(上接第 2843 页)

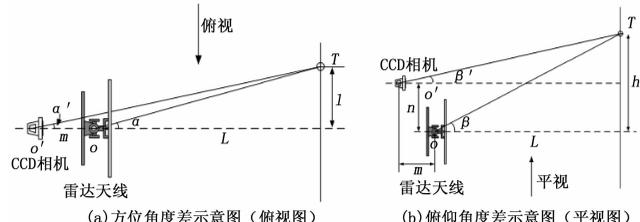


图 4 雷达系统与机器视觉测角系统安装位置不同引起的测量角度偏差示意图

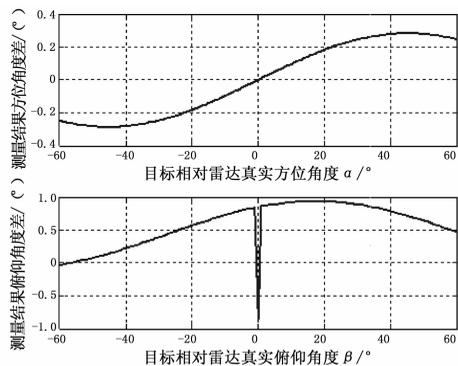


图 5 机器视觉测量系统与雷达系统安装位置不同导致的测量结果角度偏差分析

$$e = \arctan\left(\frac{d}{D}\right) = \arctan\left(\frac{Lf}{L-f}\right) \quad (7)$$

其中:  $L$  为目标模拟器到相机镜头的水平距离。若采用焦距为  $f = 10 \text{ cm}$  的相机, CCD 像元大小为  $d = 10 \mu\text{m}$ , 目标到相机的距离  $L = 20 \text{ m}$ , 则该测量系统的灵敏度为:  $e = 0.0057^\circ$ 。

从系统方案和上述分析可知, 影响机器视觉系统对雷达角度测量的校准精度和评估性能的主要因素有:

- 1) 目标距 CCD 相机水平距离的测量精度;
- 2) 目标图像点的提取精度;
- 3) 机器视觉系统与雷达系统视线平行情况;
- 4) 机器视觉系统与雷达系统异位引起测角偏差的补偿精度。

影响分析如下: 1) 距离的测量精度对系统角度测量精度

的影响较小, 仿真可知距离测量误差为  $0.5 \text{ m}$  时角度测量误差为  $0.0029^\circ$ ; 2) 目标图像点的提取精度受目标图像所占像元数、相机成像景深等影响, 为提高测量精度, 可以在目标模拟器上安装一个强光源代替目标; 3) 两系统视线平行情况可以通过在同一个平面地板上安装来保证; 4) 两系统安装位置不一致导致的测量角度偏差是固定的, 可以根据上述仿真结果进行相应的补偿。根据分析和仿真, 在正常的实验测量误差条件下, 雷达测角精度评估系统能达到  $0.005^\circ$  的校准和评估精度。

5 结论

本文首先介绍了基于机器视觉的雷达角度测量实时校准试验系统, 由光学模块 (CCD 相机)、图像采集模块和图像处理与目标角度信息提取模块等组成。然后针对雷达系统与机器视觉测角系统的安装位置不同引起的角度测量偏差问题提出实时补偿方法。最后分析了实时校准和评估系统的校准精度和评估性能。通过仿真和理论分析可知, 本文提出的系统能实现在紧缩场试验中雷达系统角度测量的自动化、高精度和实时连续的校准和性能评估。

参考文献:

[1] 吕亚强, 毛瑞娟, 严家明. 单脉冲雷达测量误差修正方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (8): 1155-1157.

[2] 贝 P. R. 文顿. 数据处理和误差分析 [M]. 北京: 知识出版社, 1986.

[3] QJ 2805-96. 地面雷达角度距离标校方法 [S].

[4] GJB 3153-98. 精密测量雷达标定与校正 [S].

[5] 邢济武, 王东伟, 孙 广, 等. 空间交会对接微波雷达测量系统地面校准技术研究 [J]. 宇航计测技术, 2011, 31 (6): 4-7.

[6] 李杏华, 张彦杰, 王伟超. 基于机器视觉的加工误差在线检测系统设计 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48 (4): 71-75.

[7] 储 珺, 姚晓春, 缪 君, 等. 基于图像的角度检测系统研究 [J]. 光电技术应用, 2009, 30 (6): 940-942.

[8] 何博侠, 张志胜, 戴 敏, 等. 基于序列局部图像的高精度测量 [J]. 光学精密工程, 2008, 16 (2): 367-370.

[9] 张舞杰, 杨义禄, 李 迪, 等. 自动影像测量系统关键算法 [J]. 光学精密工程, 2007, 15 (2): 294-301.

[10] 高 烽. 雷达导引头概论 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.

[11] 门金瑞, 姚大志, 韦伟. 基于千兆以太网的 CCD 相机设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49 (3): 142-146.

[12] 张 诚, 罗 丰. 基于千兆以太网的高速数据传输系统设计 [J]. 电子科学与技术, 2011, 24 (1): 44-46.