
密级：_____

浙江大学

硕 士 学 位 论 文



论文题目 非接触式测量天线姿态的技术与系统

作者姓名 姜锦正

指导教师 耿卫东 教授

学科(专业) 计算机应用技术

所在学院 计算机科学与技术

提交日期 2014-3-9

A Dissertation Submitted to Zhejiang
University for the Degree of
Master of Engineering



TITLE: THE NON-CONTACT ANTENNA ATTITUDE
ESTIMATION TECHNOLOGY AND
SYSTEMS

Author: Jiang JinZheng

Supervisor: Prof. Geng Weidong

Subject: Computer Application

College: Computer Science and Technology

Submitted Date: March 9, 2014

摘要

无线覆盖是网络优化工作的基础，其中天线方位角下倾角的精确规划是影响覆盖最重要因素之一。传统的计算方位角和下倾角的方法基于人工物理测量，该方法存在着测量复杂，测量不方便，测量受限制于测量环境等问题。

针对此问题，本文提出了一套非接触式测量天线姿态的技术解决方案。该方案通过配置有惯性传感器（三轴加速度，磁通，陀螺仪传感器）和高精度照相机的智能手机对天线拍照的方式计算出天线的方位角和下倾角。

本文首先对该解决方案进行了一个总体的阐述，并给出了方案的总体架构。在此架构设计的基础上，本文重点做了如下几块内容：设计并实现了两种不同传感器配置下估算手机朝向的算法；在此算法的基础上，结合相机标定，联合优化计算算法，离线标定出了手机传感器坐标系和相机坐标系之间的旋转矩阵；结合现有的三维重建和 ICP 点云配准算法计算得到天线的方位角和下倾角。从最终实验结果上，该套解决方案所得结果的精度符合了预期操作平台的要求。最后，在完整实现了该方案所有模块的基础上，本文也额外设计和实现了两款辅助软件。一款是运行在 android 平台上用来异步采集照片和传感器数据的采集程序，另外一款是基于物理接触方式测算天线方位角下倾角的 downtilt 软件以用于对非接触式计算结果进行辅助验证。

后续工作中将进一步考虑使用更好的去噪算法对传感器数据进行处理并使用更好的物理测量方法来提高测试基准数据的精度。

关键词：天线方位角下倾角，手机姿态估算，联合标定，三维重建，ICP

Abstract

Wireless coverage is the basis of network optimization, especially for the precision of antenna azimuth and downward inclination Angle. Traditional method has many problems such as hard for measuring, etc.

We proposed a non-contact measuring antenna attitude. The system can calculate the antenna attitude based on taking pictures from a smartphone equipping with inertial sensor (Three axis acceleration, magnetic flux, the gyro sensor) and high precision camera.

First of all, we proposed a general and overall architecture design of the system. And on the basis of it, we researched the following contents: Two estimation algorithm based on different sensor configuration was designed and implemented. And on the basis of this estimation algorithm, we calculated the rotation matrix between sensor coordinate system and the camera coordinate system through camera calibration and a joint optimization algorithm. According to the experimental results, the accuracy of this calibration algorithm meets the requirement of the expected operating platform. In the last, we developed two auxiliary applications. One is a collection app running on android platform and the other is a down tilt app used for fast measurement of the antenna attitude.

Better denoising algorithm and better physical measurement method will be considered in our future work.

Keywords: azimuth and downward inclination angle, orientation estimation, unite calibration, 3d reconstruction, ICP

目录

摘要	i
Abstract.....	ii
图目录	V
表目录	VII
1 绪论	1
1.1 课题背景	1
1.2 本文研究目标与内容	2
1.3 本文结构安排	3
1.4 本章小结	4
2 天线姿态测量问题描述	5
2.1 坐标系定义	5
2.1.1 世界坐标系	5
2.1.2 相机坐标系	6
2.1.3 手机坐标系	6
2.1.4 手机传感器坐标系	7
2.2 天线姿态定义	7
2.3 接触式测量天线姿态方法	8
2.4 非接触式测量天线姿态问题描述	10
2.5 本章小结	10
3 非接触式测量天线姿态总体解决方案	11
3.1 方案概述	11
3.2 总体架构	11
3.3 离线处理模块	13
3.3.1 模块概述	13
3.3.2 模块内容	13
3.4 在线计算模块	15
3.4.1 模块概述	15

3.4.2	模块内容	15
3.5	本章小结	16
4	手机朝向估算	17
4.1	问题描述	17
4.2	现有方法概述	17
4.3	传感器预处理	19
4.4	加速度，磁通传感器数据计算朝向	22
4.4.1	yaw, pitch, roll 姿态角度定义	22
4.4.2	计算朝向算法推导	24
4.5	加速度，磁通，陀螺仪传感器数据融合计算朝向	26
4.5.1	四元数表示形式	27
4.5.2	角速度积分计算朝向四元数	28
4.5.3	加速度，磁通传感器计算朝向四元数	29
4.5.4	传感器融合计算朝向	31
4.6	测试	33
4.6.1	测试用例	33
4.6.2	测试方法	34
4.6.3	测试结果	35
4.7	本章小节	39
5	传感器，相机坐标系旋转矩阵标定	40
5.1	问题定义	40
5.2	计算步骤	41
5.3	相机标定	45
5.3.1	问题描述	45
5.3.2	成像模型	45
5.3.3	定标计算	48
5.4	优化计算	50
5.4.1	数据采集	50
5.4.2	定标板平面方位角和下倾角基准值测量方式	51
5.4.3	计算定标板下倾角和方位角	51
5.4.4	建立优化方程	53

5.4.5	优化方程求解	54
5.4.6	计算函数定义	55
5.5	测试	56
5.5.1	测试用例	56
5.5.2	测试方法	57
5.5.3	测试结果	58
5.6	本章小结	62
6	天线姿态计算	63
6.1	问题描述	63
6.2	三维重建	64
6.2.1	概述	64
6.2.2	算法流程	64
6.3	配准算法	66
6.3.1	刚性配准算法概述	66
6.3.2	算法流程	67
6.4	扫描三维天线模型	68
6.5	天线姿态估算	70
6.6	测试	73
6.6.1	测试用例	73
6.6.2	测试方法	75
6.6.3	测试结果	76
6.7	本章小结	78
7	天线姿态估算系统设计与实现	79
7.1	系统需求分析	79
7.2	downtilt 辅助测量软件设计与实现	79
7.2.1	开发环境	80
7.2.2	运行结果	80
7.3	采集程序设计与实现	81
7.3.1	需求分析	81
7.3.2	模块定义	81
7.3.3	开发环境	84

7.3.4	运行结果	84
7.4	传感器，相机坐标系旋转矩阵标定	87
7.4.1	需求分析	87
7.4.2	模块定义	87
7.4.3	开发环境	88
7.4.4	运行结果	89
7.5	本章总结	91
8	本文总结	92
8.1	总结	92
8.2	本文工作展望	93
参考文献		94
攻读硕士学位期间主要的研究成果		98
致谢		99

图目录

图 2.1 世界坐标系定义	5
图 2.2 相机坐标系统	6
图 2.3 Android 手机坐标系	7
图 2.4 下倾角方位角计算示例图	8
图 2.5 天线倾角计算模型	9
图 3.1 非接触式天线姿态测量方案总体架构	12
图 3.2 离线标定模块计算流程图	14
图 3.3 在线计算模块流程图	16
图 4.1 normalization 计算流程图	22
图 4.2 手机姿态描述图（参考文档 ^[10] ）	23
图 4.3 传感器融合计算流程	33
图 4.4 传感器融合计算，不同配置下 yaw 角度平均绝对值误差	36
图 4.5 传感器融合计算，不同配置下 pitch 角度平均绝对值误差	37
图 4.6 传感器融合计算，不同配置下 roll 角度平均绝对值误差	37
图 4.7 传感器融合计算，不同配置下 pitch 和 roll 平均绝对值误差	38
图 5.1 联合标定计算流程图	44
图 5.2 小孔成像原理	45
图 5.3 成像平面点与空间物体平面的投射投影关系	46
图 5.4 径向畸变模型成像效果（左）和切向畸变模型成像效果（右）	47
图 5.5 相机定标操作方式	49
图 5.6 联合标定优化方位角结果 – 使用传感器融合算法估算朝向	59
图 5.7 联合标定优化下倾角结果 – 使用传感器融合算法估算朝向	60
图 6.1 三维重建算法流程 ^[6]	66
图 6.2 ICP 配置算法计算流程图 ^[7]	68
图 6.3 天线扫描模型结果	69

图 6.4 摆放天线模型说明	72
图 6.5 天线姿态算法测试采集场景	74
图 6.6 天线姿态估算测试步骤说明	75
图 6.7 姿态估算反向计算效果图	77
图 7.1 downtilt 程序运行截图	80
图 7.2 数据采集模块设计	82
图 7.3 采集程序计算流程	83
图 7.4 采集程序运行截图	84
图 7.5 采集程序采集结果截图	85
图 7.6 采集程序工程文件示例	85
图 7.7 采集程序传感器数据文件示例	86
图 7.8 联合标定数据流图	88
图 7.9 联合标定程序配置样例	90
图 7.10 联合标定输出结果	91

表目录

表 4.1 离线归一化系数估算手机姿态结果	35
表 4.2 在线归一化系数估算手机姿态结果	35
表 4.3 在融合传感器计算手机姿态结果	38
表 5.1 联合标定 – 计算手机姿态输入输出数据格式	41
表 5.2 联合标定 – 相机标定输入输出数据格式定义	42
表 5.3 联合标定 – 测量天线平面基准数值输入输出数据格式	43
表 5.4 联合标定 – 优化计算模块输入输出数据格式	43
表 5.5 联合标定优化计算测试用例	56
表 5.6 联合标定优化结果 – 使用基于加速度，磁通数据估算朝向	58
表 5.7 联合标定优化结果 – 使用传感器融合算法估算朝向	60
表 5.8 联合标定优化结果 – 代入标准形态矩阵进行计算	61
表 6.1 天线扫描模型测量值与物理测量值对比	70
表 6.2 天线姿态估算测试结果	76

1 绪论

1.1 课题背景

随着移动通信网络规模的扩大，无线网络优化工作的重要性不言而喻。无线覆盖是网络优化工作的基础，其中天线方位角（天线平板在水平面上投影与磁北方向的夹角）、下倾角（天线平板与重力方向的夹角）的精确规划是影响覆盖最重要因素之一。

在网络优化中，基站天线方位角的准确性一直是优化工程师最关注的事情。一方面，准确的方位角能保证基站的实际覆盖与所预期的相同，保证整个网络的运行质量；另一方面，依据话务量或网络存在的具体情况对方位角进行适当的调整，可以更好地优化现有的移动通信网络。

另外一方面，天线倾角的调整在网络优化中也起着非常重要的作用。选择合适的下倾角可以使天线至本小区边界的射线与天线至受干扰小区边界的射线之间处于天线垂直方向图中增益衰减变化最大的部分，从而使受干扰小区的同频及邻频干扰减至最小；另外，选择合适的覆盖范围，使基站实际覆盖范围与预期的设计范围相同，同时加强本覆盖区的信号强度。

但是，在现实生活中，由于天线长期工作在室外环境中，不可避免地受到风、雨、雪、雹等外界因素的影响，导致天线方位角、倾角发生异常偏离。另一方面，存在着一些人为操作，比如工程验收把关不严，日常的优化调整等，都会引起天线的实际方位角与要求数值不一致。这样会影响天线频率、邻区规划的准确性进而引起小区掉话、切换失败等现象。

考虑到天线方位角和下倾角对于移动网络通信的重要性，网络提供商必须定期组织人员去对天线设备的方位角和下倾角进行测量。但是传统的测量方法需要测量人员爬上天线杆，使用指南针，倾角仪等设备进行测量。该方法即耗时、耗人、耗力，同时也会存在诸多的误差，使得测量结果不准确。因此，为了能够快速准确地定位天线的方位角和下倾角，研究出一种快速，准确，且方便有效的测量方法是非常有意义的。

基于这样的课题背景，本文提出了一套非接触式测量天线姿态的完整技术解决方案。并重点就该方案中涉及到的手机朝向估算，相机坐标系和传感器坐标系旋转矩阵离线标定，以及天线姿态估算等几个关键技术难点进行深入研究。

1.2 本文研究目标与内容

针对课题背景中提出的需求，本文提出了一套非接触式测量天线姿态的完整技术解决方案。该方案使用配置有惯性传感器（三轴加速度传感器，三轴磁通传感器，三轴陀螺仪传感器）和高精度照相机的智能手机作为采集设备采集不同角度上天线的照片，以此作为输入数据进行天线姿态估算。

该方案具有两个主要计算模块：离线处理模块和在线计算模块。

其中离线处理模块主要任务是标定出拍照手机传感器坐标系和相机坐标系之间的旋转矩阵。这其中需要使用手机朝向估算算法计算得到手机传感器在世界空间中的朝向；使用相机标定算法计算得到相机坐标系和定标板坐标系的旋转矩阵；通过物理测量的方式得到定标板坐标系在世界坐标系下的旋转矩阵标准值；最后结合该标准值以及计算得到两个旋转矩阵数据，建立优化方程求解出手机传感器坐标系和相机坐标系之间的旋转矩阵。该离线计算结果将保存在数据库中，并将会作为在线处理模块的输入。

在线处理模块的主要任务是通过在线拍照天线照片的方式计算出天线的下倾角方位角。这其中需要结合离线标定结果和三维重建算法重建出在世界坐标系下表示的天线点云，再将该点云数据和标准点云模型（通过三维扫描设备获得）进行点云配准，从而推算出天线的方位角和下倾角。

基于上面的讨论，本文重点研究的内容可以概括为下面几个方面：

- 1) 提出一套非接触式测量天线姿态的完整技术解决方案。并对方案中的主要技术路线，技术难点，计算流程，计算模块等内容进行一定的研究。
- 2) 由于本方案中需要通过传感器数据估算手机姿态，因此手机在拍照的同时也需要采集传感器数据。为此需要设计并实现一种基于 android 系统的数据采集程序。该程序可以在记录拍照数据的同时异步地采集传感器数

据，并使用工程文件的方式对采集程序得到的数据进行管理。所采集得到的工程文件数据将作为离线和在线计算模块的标准输入。

- 3) 为了得到手机在空间中的朝向信息，需要根据不同的传感器配置设计不同的朝向估算算法。一种算法基于加速度和磁通传感器数据估算静止状态下手机朝向。另一种算法基于加速度，磁通，陀螺仪传感器进行多传感器融合计算得到运动状态下的手机朝向。
- 4) 设计并实现一种相机标定算法。该程序通过对含有定标板照片处理可以得到拍照相机的内定标参数和外定标参数。
- 5) 设计并实现一种标定相机坐标系和传感器坐标系相对旋转矩阵的算法。该算法可以通过已知的传感器坐标系和世界坐标系旋转矩阵，定标板坐标系和相机坐标系相对旋转矩阵，以及通过测量方式得到的定标板坐标系在世界坐标系下的旋转矩阵这三个数据，建立优化关系求解出相机坐标系和传感器坐标系的相对旋转矩阵。
- 6) 设计并构建一套在线计算天线姿态的计算算法。该算法可以在线采集天线数据，并通过 Wi-Fi 传输到 PC 上进行天线方位角下倾角计算。这其中将涉及到三维重建，点云配准，以及根据点云配准计算结果推算方位角下倾角这几个主要技术点。

1.3 本文结构安排

本文结构安排如下：

第一章：绪论。介绍了课题的研究背景、研究意义、研究目标和本文研究的相关内容，以及论文整体组织结构。

第二章：天线姿态测量问题描述。对天线姿态测量问题进行了系统的描述，这包括介绍了相关的坐标系，并给出了天线方位角下倾角的数学定义。最后给出了非接触式测量天线姿态问题的完整问题描述。

第三章：基于非接触式测量天线姿态完整解决方案。对该解决方案的总体框架，每一步的计算步骤，计算流程，以及加工逻辑等内容逐一进行了介绍。

第四章：手机朝向估算算法。介绍了两种不同传感器配置下计算手机朝向的算法并进行了测试和结果比较。

第五章：传感器坐标系，相机坐标系旋转矩阵标定。介绍了标定计算所涉及到的相关技术内容，包括相机标定，数据采集，定标板平面方位角下倾角真实值测量方式，估算定标板平面方位角下倾角算法，以及优化计算求解的过程与原理。

第六章：天线姿态计算。首先描述了计算天线姿态的技术路线，并就该路线中涉及到的三维重建，点云配准，天线扫描等技术进行了描述，最后给出了总体算法的测试结果。

第七章：系统实现。详细介绍了根据本文中提出的解决方案实现的系统的详细情况。

第八章：本文总结。对本论文的总结与归纳，并对系统后续待发展部分进行了展望。

1.4 本章小结

本章从天线姿态估算研究的课题背景出发，阐述了本文所提出的非接触式测量天线姿态技术方案的现实意义。并就该方案中涉及到的具体工作内容和相关核心技术做了概述说明。最后，介绍了一下本文的结构安排。

2 天线姿态测量问题描述

为了更好的描述天线姿态测量问题，本章节首先对该问题中涉及到的几个主要坐标系进行了定义，并对天线下倾角方位角进行了数学描述。

2.1 坐标系定义

坐标系在本问题的解决过程中其中至关重要的作用，为了更好的对问题进行描述，我们首先定义了天线姿态估算问题中遇到的主要几个坐标系（所有的坐标系都定义在右手坐标系内）。

2.1.1 世界坐标系

世界坐标系被定义为，如图 2.1 所示：

- 1) X 轴被定义为 Y 轴和 Z 轴的向量积。
- 2) Y 轴是地面上设备的当前位置和磁北方向的切向。
- 3) Z 轴指向天空，并且垂直于地面。

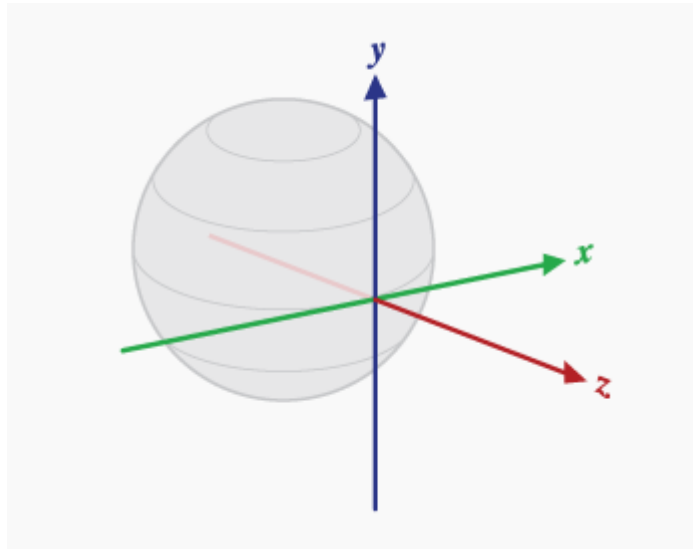


图 2.1 世界坐标系定义

2.1.2 相机坐标系

在右手坐标系中,相机坐标系一般被定义为 X 和 Y 轴指向相机的右和上方向, Z 轴指向摄像机拍照的负方向,也就是说摄影机正对着 $-Z$ 方向进行拍摄,如图 2.2 所示:

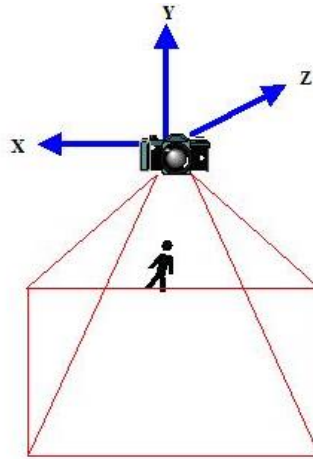


图 2.2 相机坐标系

2.1.3 手机坐标系

手机的坐标系统描述了采集设备载体自身的坐标系统,如果使用 android 系统的手机,其坐标系统被定义为(如图 2.3 所示):

- 1) X 轴平行于手机短轴
- 2) Y 轴平行于手机长轴
- 3) Z 轴被定义为 X , Y 轴的向量叉积,从屏幕内侧指向屏幕外侧。

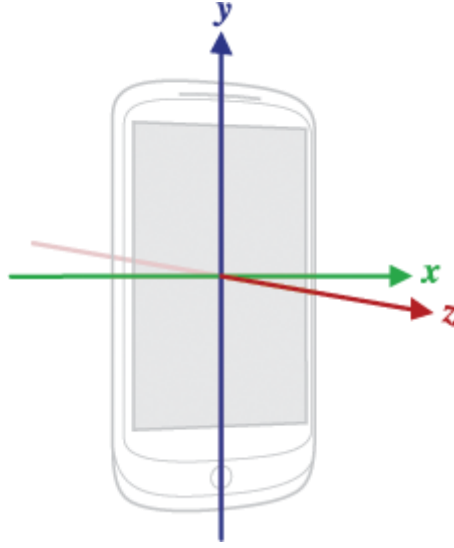


图 2.3 Android 手机坐标系

2.1.4 手机传感器坐标系

这里提到的传感器为惯性传感器单元 *IMU* (Inertial measurement unit), 包括一个三轴加速度传感器, 三轴角速度传感器, 和三轴磁通传感器。

由于传感器本身已经固定于手机上, 所以我们无从知道知道传感器本身的坐标系统如何定义, 这就像一个黑箱子, 存在于手机的某一个不知道物理位置, 我们也无法准确知道传感器的物理坐标定义。

在一定程度上说, android 手机的坐标系统和传感器的坐标系统是对齐的, 所以一般而言我们认为传感器采集到的数据就是在手机坐标体系中定义的数据。但是严格来说, 无论多精确的生产工艺或者是制造工艺也都无法保证手机的坐标系统和传感器的坐标系统是完全对齐的, 两者之间一定存在旋转量差值 ΔR , 该数值需要通过标定方式计算得到。

2.2 天线姿态定义

天线的姿态包括两个方面内容: 方位角和下倾角。其在物理上的定义为: 天线平板在水平面上投影与磁北方向的夹角叫做方位角, 天线平板与重力方向的夹角叫做下倾角。这里, 给出方位角下倾角在数学上的定义:

- 1) 方位角：天线板平面的法向量（垂直于天线平面的向量）在水平面上的投影分量与磁北方向向量的夹角。
- 2) 下倾角：90 度减去天线板平面的法向量（垂直于天线平面的向量）与重力方向的夹角。（当天线平面垂直放置时，天线平面法向量与重力相差 90 度，但此时下倾角为 0 度，两者之间存在 90 度差值）

具体可以参考下图 2.4 说明：

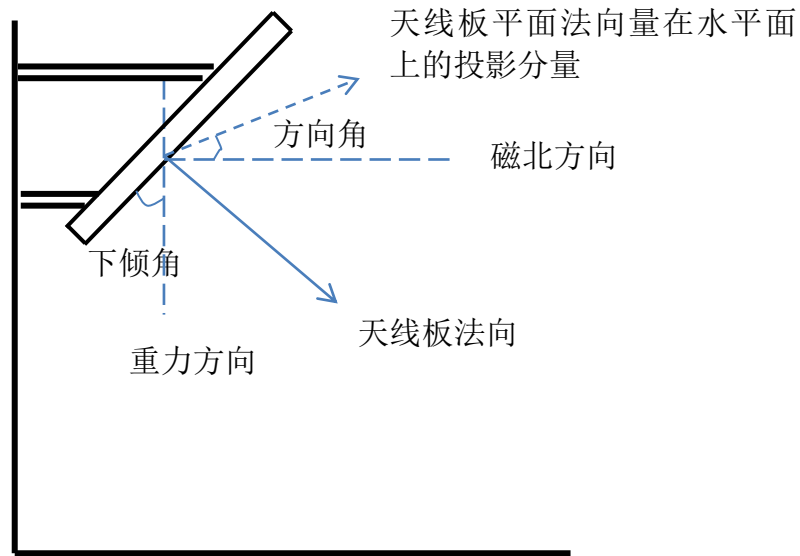


图 2.4 下倾角方位角计算示例图

2.3 接触式测量天线姿态方法

计算天线方向角的主要目前主要方法为：人工定期巡检的方法，通过罗盘测量出该小区的方位角。这些方法需要大量的人力和物力，以及消耗时间，持续时间长，严重影响了工作效率^[1]。另外一种自动核查天线方向角的方法是通过小区覆盖范围分析^[2]。目前小区覆盖范围通常通过路测数据分析^{[3][4]}该方法虽然节省了人工巡检的成本，但是受限于自然环境以及路测密度，难以准确核查天线方位角的偏差。

天线倾角的计算方法主要基于下面的模型，见图 2.5 说明：

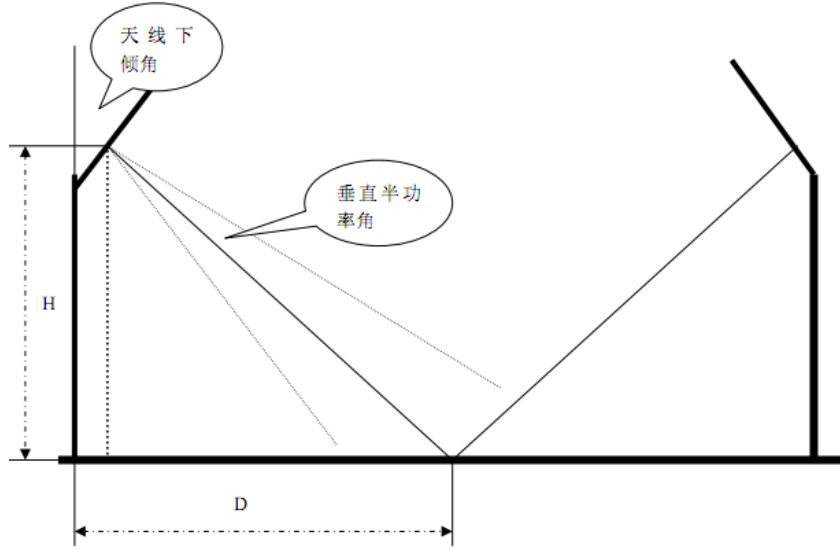


图 2.5 天线下倾角计算模型

其中，各个参数定义如下：

1. H ：天线高度，可以直接测量得到
2. D ：覆盖半径，一般 D 值通过路测来确定，为了保证覆盖，在实际设计中一般 D 取得要大一些，以保证相邻小区之间的覆盖重叠。
3. β ：垂直半功率角，为天线的垂直半功率角，一般为 10 度。
4. α ：天线下倾角。

可以得到计算下倾角的公式为^[5]：

$$\alpha = \arctan\left(\frac{H}{D}\right) + \left(\frac{\beta}{2}\right) \quad \text{公式(2.1)}$$

在实际中只要已知了基站的高度、覆盖半径和半功率角就可以计算出天线的下倾角。

基于上面的分析，传统的计算方向角和下倾角的方法基于接触式的物理测量方式。这些方法存在这测量复杂，测量不方便，测量受限制于测量环境等特点。并且由于是基于人工测量的方式，测量误差较大且不稳定，对最后的数据结果会产生较大的影响。

2.4 非接触式测量天线姿态问题描述

由于物理测量天线方位角和下倾角的传统方法存在诸多的问题，所以本文提出了一种利用非接触式设备估算天线姿态的方案。该方案所要解决的主要问题可以被描述为：

非接触式测量天线姿态问题就是利用非接触式设备来估算天线姿态，并最终得到表示在世界坐标系下天线的方位角下倾角的问题。

该问题的输入输出模型可以被描述为：

输入：

1) 离线输入数据：

- a) 采集手机相机坐标系和传感器坐标系相对旋转矩阵离线标定结果。
- b) 天线标准模型（三维扫描获得）

2) 在线输入数据：

- a) 配置有惯性传感器（三轴加速度传感器，三轴磁通传感器，三轴陀螺仪传感器）和高精度照相机的智能手机所采集得到的具有天线和定标板的照片数据
- b) 采集照片时刻的传感器数据。

输出：

- 1) 计算得到表示在世界坐标系下天线的方位角和下倾角。

2.5 本章小结

本章主要对天线姿态测量问题进行了问题描述。首先为了更好的说明问题，定义了该问题中所涉及到的相关坐标系统，并对天线的方位角下倾角进行了定义。之后通过对现有基于接触式测量天线姿态方法的讨论引出了非接触式测量天线的想法，并给出了非接触式计算姿态的问题描述。下一章节将重点介绍一下本文提出的解决该问题的总体解决方案。

3 非接触式测量天线姿态总体解决方案

3.1 方案概述

目前，传统的测量天线姿态的方法需要工作人员爬山天线杆，使用指南针和倾角仪的方式测量方位角和下倾角。这些基于物理测量方法，存在这测量复杂，测量不方便，测量受限制于测量环境的特点。且因为是基于人工测量的方式，测量误差较大且不稳定，对最后的数据结果会产生较大的影响。

另外一方面，随着社会的不断进步，越来越多的人开始使用智能手机。同时也使得智能手机的功能不断的提高和改进。比如目前大多数的智能手机都配置了惯性传感器（包括加速度传感器，磁通传感器，和陀螺仪传感器等）和高精度照相机等内置设备。同时，计算机视觉处理，图像处理技术已经是一个研究比较成熟的领域，尤其是在相机定标，三维重建，模型配准等领域都取得了一定的研究成果。如果可以将这些现有技术进行改进组合，将之与智能手机的特性相结合，将会产生很多有实际价值的研究和应用。相对而言，非接触式天线姿态测量问题还是一个比较新颖的研究课题，如何有效地将这些现有技术应用到对该问题的求解上，如何有效的选择和应用这些技术，使其可构建为一套有效的技术解决方案，将是一个主要的难点。本文的工作目的就在于此：通过对关键技术的研究与整合，为天线方位角下倾角计算提供一套基于使用计算机视觉和图像处理技术的有效解决方案。

3.2 总体架构

该方案主要概括两个两个主要部分。一个是离线处理部分，该部分主要是标定出手机传感器坐标系和相机坐标系之间相对旋转矩阵，以及计算得到手机的内参数。另一个部分是在线计算部分，该部分通过在线拍照天线照片的方式计算出天线的下倾角方位角。

方案的总体架构如图 3.1 所示：

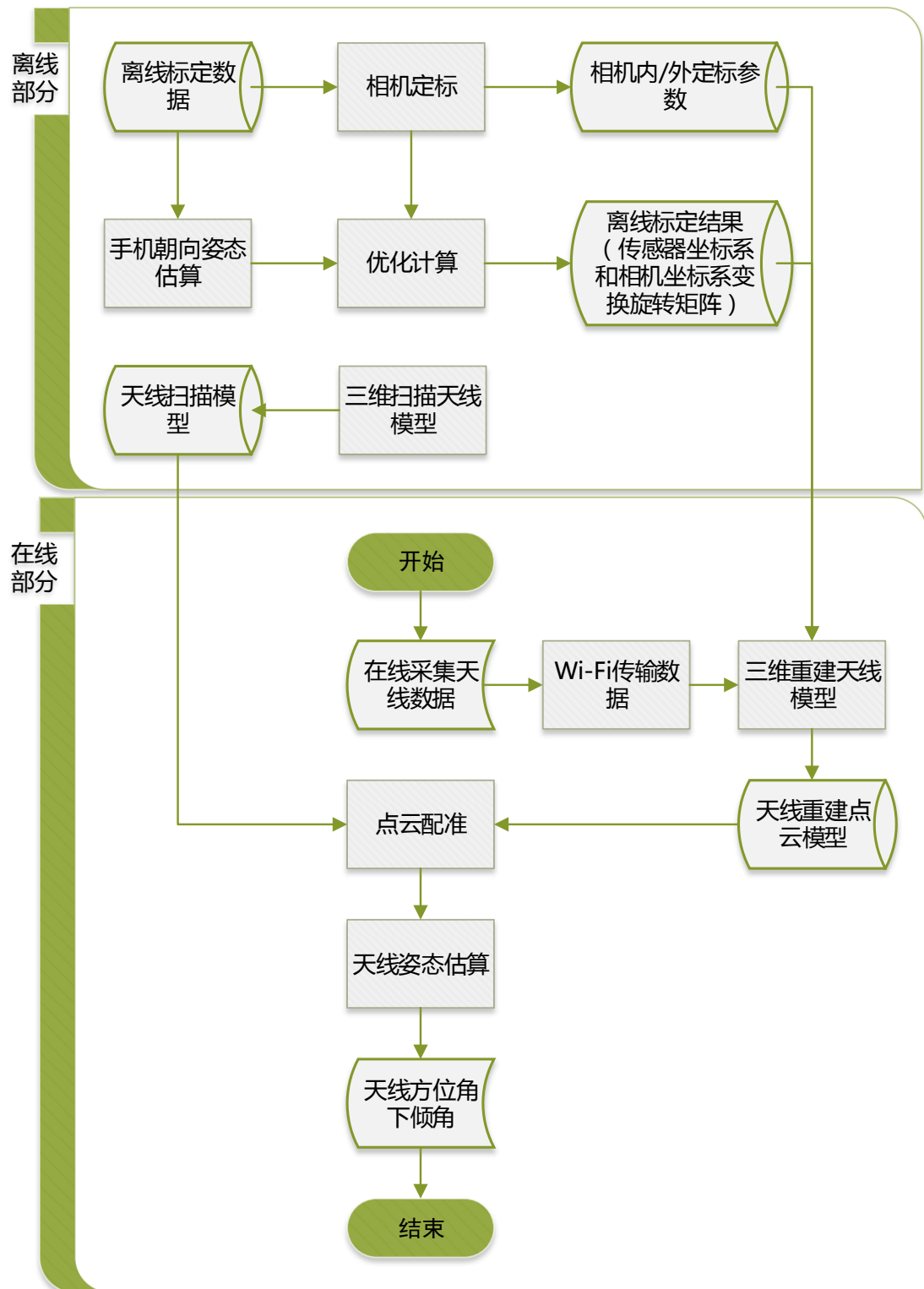


图 3.1 非接触式天线姿态测量方案总体架构

下面将对上图架构中涉及到的相关子模块进行概述说明。

3.3 离线处理模块

3.3.1 模块概述

通过拍照方式估算天线的方位角和下倾角，首先需要解决的问题是：如何可以知道当前拍照时刻照相机在世界坐标下的朝向。可以知道的是，通过手机采集得到的传感器数据可以推算出手机传感器坐标系和世界坐标系的旋转关系。如果同时也知道相机坐标系和传感器坐标系之间的旋转关系，就可以通过对传感器数据的计算直接推导出当前手机相机在世界坐标下的朝向。

离线处理模块就是解决该问题。由于该模块计算得到的标定结果（即为相机坐标系和传感器坐标系之间的相对旋转关系）只和当前手机的物理状态有关。所以一旦对某一个采集手机进行了离线标定校准，之后不再需用重复操作。所以联合标定模块的计算过程是离线的：

根据上文描述，离线标定问题可以被描述为：

在已知离线标定数据的情况下（这个包括拍摄得到具有定标板的照片和对应的传感器数据），计算得到当前采集手机的传感器坐标系和世界坐标系的旋转关系，同时计算得到当前手机的内定标参数。

3.3.2 模块内容

模块主要有下面几个部分构成：

- 1) 数据采集：使用智能手机采集计算所需数据照片和传感器数据。
- 2) 手机朝向估算算法：估算手机传感器坐标系和世界坐标系之间旋转矩阵。
- 3) 相机标定：相机的内外参数标定计算。
- 4) 定标板姿态测量：测量定标板在世界坐标系下的姿态。
- 5) 优化计算：联立关系，建立优化方程，计算得到当前采集手机的传感器坐标系和世界坐标系的旋转关系。
- 6) 标准天线模型：使用三维扫描设备得到标准天线模型。

7) 保存数据：将离线计算得到的数据保存到数据库中。

对于离线计算标定参数部分展开说明，可得图 3.2 的计算流程图：

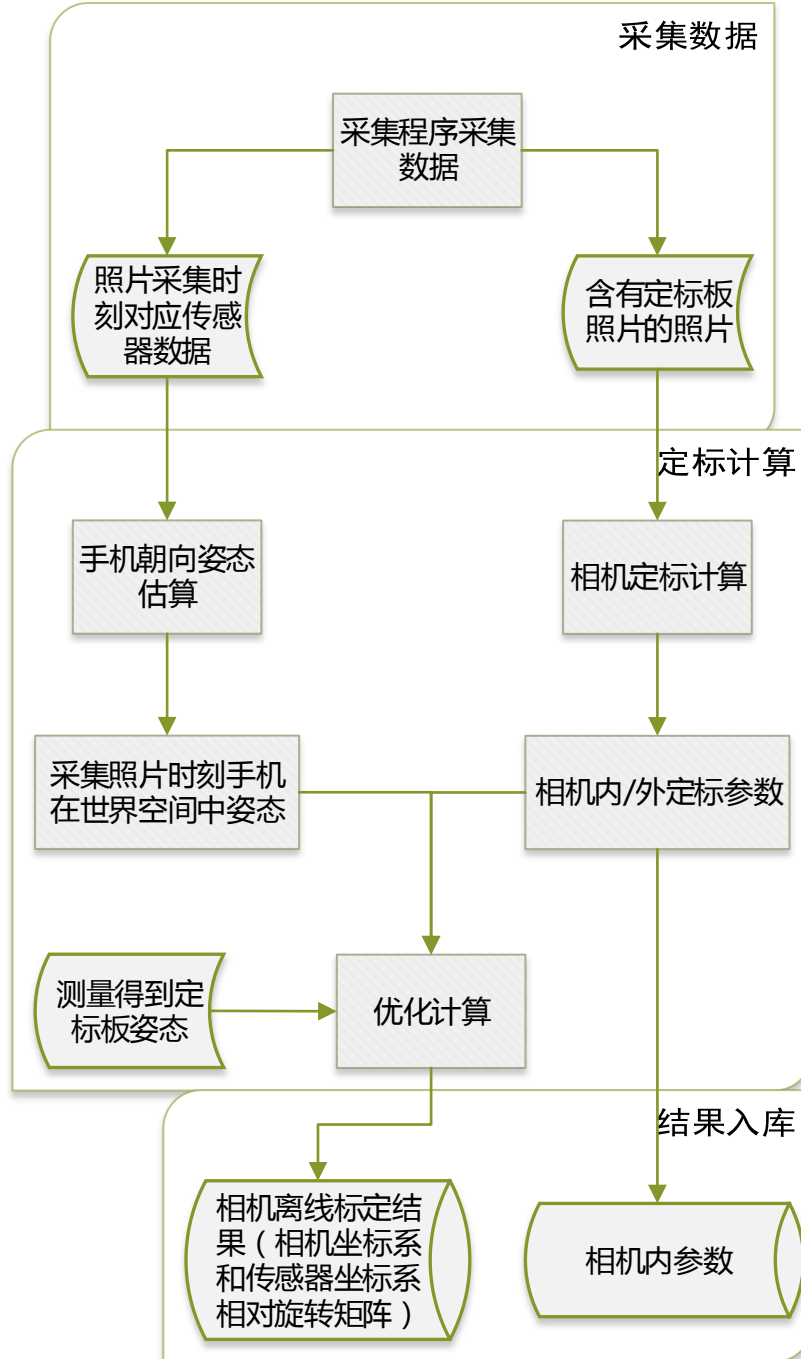


图 3.2 离线标定模块计算流程图

3.4 在线计算模块

3.4.1 模块概述

通过离线数据的标定，我们可以得到拍照设备传感器和相机之间的姿态关系，进一步考虑，通过手机朝向估算算法可建立起来手机传感器在世界坐标系下的朝向，进而得到拍照时刻相机在世界空间中的朝向。

利用具有此特性的手机对天线设备进行拍照，并进行三维重建，可以得到表示在世界坐标系下的三维天线点云。从另外一个角度考虑，我们使用高精度三维扫描设备对天线模型进行三维扫描，将得到的扫描结果放置在世界坐标系下。再利用 ICP 点云匹配算法对重建点云和三维扫描设备得到的真实天线模型进行配准可估算出当前天线的方位角和下倾角。

因此在线计算模块的任务可以被描述为：

在已知离线处理结果（传感器和相机坐标系旋转矩阵，相机内标定参数，标准天线模型）和在线拍照得到的天线数据基础上，计算得到当前天线在世界坐标系下描述的方位角下倾角。

3.4.2 模块内容

具体而言，该模块有下面几个主要部分构成：

- 1) 三维重建：将拍摄有天线和定标板的照片进行三维重建，重建得到表示在定标板坐标系下的天线点云。
- 2) 坐标转换：将表示在定标板坐标系下的天线点云转换到世界坐标系下。
- 3) 点云配准：将重建点云和标准天线模型点云进行配准操作。
- 4) 姿态估算：根据配置结果计算天线倾角方位角

在线计算模块流程图见图 3.3 说明：

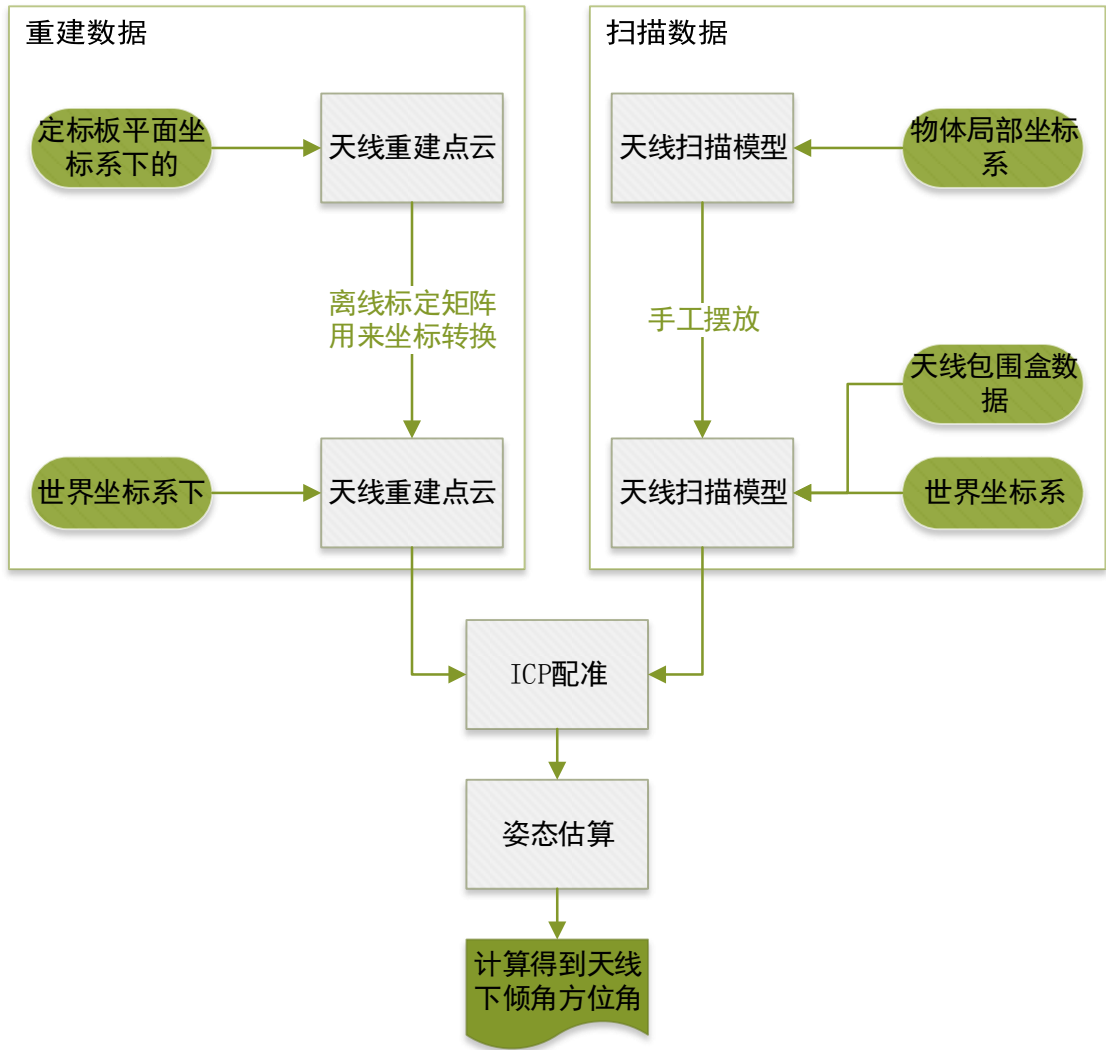


图 3.3 在线计算模块流程图

3.5 本章小结

本章提出了一种非接触式天线姿态测量的计算方案。该方案中主要包含两块内容：一块是离线计算相机传感器坐标系和相机坐标系之间的旋转矩阵。另外一块是在线计算天线姿态。在该方案中，本人主要参与了采集程序，手机朝向估算，相机标定，优化计算传感器坐标系和相机坐标系之间旋转矩阵，姿态估算等模块的研究与实现。另外，三维重建模块将直接参考^[6]提出的方法，点云配准将直接参考^[7]提出的方法。

4 手机朝向估算

4.1 问题描述

目前,智能手机的功能可谓是多种多样,基本上满足了不同人群的各种需求。手机传感器应用技术也正是在这样的背景下得以发展的。目前应用于智能手机上的传感器技术是非常多的,比如加速度传感器在智能手机上的应用则更为广泛常见,如我们屏幕方向的切换、手机翻页、赛车等竞技游戏中的加速转弯刹车等常见功能。姿态传感器主要是用于检测手机方向的变化,而做出相关的应用,最典型的应用如水平仪、指南针等。但这些传感器数据本质上只是一些原始数据,并没有实际的含义,必须要对原始数据进行有效的解析才可以得到更加有用的信息。

比如本文需要考虑的问题:如何使用现有的手机传感器采集到的数据(包括三轴加速度传感器数据,三轴磁通传感器数据,三轴陀螺仪传感器数据)计算得到当前手机在世界坐标下的姿态。该姿态可以描述当前手机传感器坐标系转换到世界坐标系的旋转矩阵(坐标系定义可以参考 2.1 一节)。当然形式上也可以使用 yaw-pitch-roll 三个旋转量来表示,或者是四元数的形式来表示。

从计算的输入输出上而言,手机姿态估算就是需要解决下面一个处理函数:

$$R = f(A_t^x, A_t^y, A_t^z, M_t^x, M_t^y, M_t^z, G_t^x, G_t^y, G_t^z) \quad \text{公式(4.1)}$$

其中输入的 A 开头数据表示加速三个分量数据。 M 开头表示磁通三个分量数据, G 表示陀螺仪三个分量数据。 R 表示当前计算得到的手机传感器坐标系和世界坐标系的朝向矩阵。

4.2 现有方法概述

目前的研究中已经提出了很多测量朝向的不同技术,其中一种基于惯性传感器的测量方式,由于其具有不受地理空间限制,便携,测量方便等优点而被广泛使用。一个 IMU (惯性测量系统)是具有一个三轴加速度传感器和三轴陀螺仪传感器的测量系统,可以对物体的旋转和平移运动进行跟踪。每一个 $MARG$ (三轴磁通,三轴加速度,三轴陀螺仪)是在 IMU 的基础上加上了三轴磁通测量仪。单

独使用 *IMU* 仅仅可以测量物体相对重力方向的朝向^{[8][9]}，但使用 *MARG* 系统（也叫做 *AHRS* 系统，位置和朝向测量系统）可以提供在重力方向和磁力方向上完整的朝向信息。所以目前而言，一般的朝向估计算法是在 *IMU / MARG* 测量系统中根据现有的多个传感器读数作为原始输入，对原始数值进行融合，综合计算，并同时考虑一定的误差的基础上，给出当前测量物体最终朝向的估计值的算法。

估算朝向算法按照计算方法可分为两种不同的类别：一种是基于静止状态下传感器数据进行计算，得到传感器姿态的解析解。另一种方法是基于卡尔曼滤波的方式计算姿态的近似解，该方法对于传感器是否处于运动状态不敏感，但是计算模型相对复杂。

基于静止状态计算朝向的算法中，Talat Ozyagcilar^[10]提出的计算传感器 yaw-pitch-roll 角度的姿态算法被用于 Freescale 半导体公司的产品中，具有很高的实用价值。Mark Pedley^[11]基于此提出了一种对加速度数据进行校正的算法，该算法可以考虑到多种不同的外界因素对加速度数据的影响，并对加速度传感器数据进行有效的校正。

另外一个方面，当传感器处于运动状态的情况下，基于卡尔曼滤波对朝向估算的方法是一个通用的计算模型^{[8][12]}，并且目前已经被广泛应用在很多商用系统中，比如 xsens^[13]，Intersense^[14]中都提供了基于卡尔曼滤波对朝向估算的算法实现。基于卡尔曼滤波的算法在提供较高的估算精度和准确度的同时也存在一定的缺点。首先该算法非常复杂，比较难以被实现^{[9][12][15][16]}。其中最基本的模型，线性卡尔曼模型在实现的要求上就需要较大的数据采样率，一般需要采样频率为 512HZ 到 30kHz^[17]。就采样频率这一点，在一般移动平台上就较难满足，即使满足了采样频率，其算法本身较高的计算复杂度在移动平台上进行运行也将导致较大的电力消耗从而降低了算法的实用度。更不用说另外一些基于扩展卡尔曼滤波的实现方法。由于传统的基于卡尔曼滤波的方法需要面对较大的计算量这个问题，所以在近些年一些基于卡尔曼滤波算法的改进方法被很多研究学者提出。其中一个用来降低计算复杂度的方法是使用 fuzzy processing 的方法^{[18][19]}。另外有一些方法改用在频率域进行滤波，可以理解为算法在较低角速度的情况下使用加

速度数值，较高角速度情况下使用陀螺仪数值来进行朝向计算。这些方法虽然降低了计算量，但同时也降低了算法的精度。在文章^{[16][20][21]}提到的计算朝向算法使用了一种基于卡尔曼滤波改进的补偿滤波算法来做朝向估算，该算法可以在使用较低采样频率数据的同时提供较高的计算精度。该算法使用四元数作为朝向表示方式，通过加速度和磁通得到的静态朝向数值来对陀螺仪积分得到朝向数值进行卡尔曼滤波计算，并给出滤波后得到的最终朝向。

本文主要实现了两种朝向算法，一种是在手机静止状态下使用加速度，磁通传感器数据计算朝向的算法^[10]，另一种是基于 kalman filter 融合加速度，磁通，陀螺仪传感器数据计算朝向的算法^{[20][21]}。

下面将对两个算法进行展开说明，不过在此之前先讨论了一个共性话题：如何对传感器进行预处理。

4.3 传感器预处理

在实际测量中由于温度等因素对器件的影响，加速计测量得到的加速度和陀螺仪得到的角速度数据是存在偏差的，所以需要对他们进行校正。校正要解决的问题就是怎样在得到测量的加速度、角速度后，通过一系列的运算输出更为接近真实值的加速度、角速度。一般的方法是用精度更高的仪器得到一组数据，称为校正后的数据，然后用需要标定的设备得到相应的数据，称为测量数据，用拟合的方式计算出用测量数据得到校正后数据的模型，那么以后测量得到的数据都可以用这个模型进行校正。

对加速度数据的归一化处理，顾名思义就是将数据化为一种标准的形式，并将该数据中的缩放误差和偏移误差校正掉。针对当前问题而言，就是将校正之后的原始数据化为标准形式数据。因为我们知道在真实世界里面，加速度的数值是有标准大小的，即为重力 G 的数值 $9.8N/s^2$ 。而由于误差的存在，加速度的数值即使在静止状态下的数值也不等于重力加速度的标准数值。

因此，这里参考了文章的内容^[22]，使用了如下的标准化模型来计算：

假设 $\bar{a} = (a_x \ a_y \ a_z)$ 表示原始加速度数值， $\bar{g} = (g_x \ g_y \ g_z)$ 表示在重力作

用下的加速度传感器三轴上的加速度数值。这两个数值之间存在一定的线性关系，我们假设主要有两个参数，一个是缩放因子，一个是偏差值，可以表示为：

$$g_{axis} = K_{axis} \cdot a_{axis} + b_{axis} \quad \text{公式(4.2)}$$

其中，下标 $axis$ 表示三轴的数据，参数 K 表示缩放因子， b 参数表示偏差值，这两个参数就用来补偿计算由于硬件自身和环境影响导致的与真实值之间的偏离数值，从而可以将传感器数据通过标准化计算得到更加统一正确的数值。

简单的计算模型参数的方式是将测量体的每一个轴都放置在标准重力方向上，从而计算出当前测量轴上数值和标准值之间的对应关系。但是该方法对于没有专业设备的用户而言，操作起来将非常的困难，进而导致结果不准确。所以这里提出了一种不是基于测量直接得到结果，而是基于数据拟合计算的方式计算模型参数的方法。

首先我们设置如下的计算幅值方程：

$$\begin{aligned} f(K_x, K_y, K_z, b_x, b_y, b_z, a_x, a_y, a_z) \\ = \|g\| = \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2} \end{aligned} \quad \text{公式(4.3)}$$

在传感器静止的时刻下，理论上应该有 $f(\cdot) = 1$ 。所以如果可以采集到足够多不同情况下的传感器静止数值，就可以转换为计算如下的优化问题：

$$\min \frac{\sum_i^n \|f_i(\cdot) - 1\|}{n} \quad \text{公式(4.4)}$$

其中， $f_i(\cdot)$ 表示第 i 静止数据帧的幅值。使用梯度下降法进行优化计算，以初始值 $(K, K, K, 0, 0, 0)$ 作为迭代初值，可以得到较好的收敛效果。一种有效的降低模型计算复杂度的方式是在初始值附近进行 Taylor 展开，可以得到下面的线性方程^[22]：

$$\begin{aligned} f_i(\cdot) \approx & \frac{a_x^2}{\|\vec{a}\|} \cdot K_x + \frac{a_y^2}{\|\vec{a}\|} \cdot K_y + \frac{a_z^2}{\|\vec{a}\|} \cdot K_z \\ & + \frac{a_x}{\|\vec{a}\|} \cdot b_x + \frac{a_y}{\|\vec{a}\|} \cdot b_y + \frac{a_z}{\|\vec{a}\|} \cdot b_z \end{aligned} \quad \text{公式(4.5)}$$

注意到该公式虽然是由初值 $(K, K, K, 0, 0, 0)$ 展开得到，但是其表达结果与 K 无关。一旦我们可以得到许多的静止数据（至少要有 6 组），就可以使用最小二乘求解最优解的方式计算参数，可以表示为下面的计算公式：

$$\begin{aligned} & [K_x, K_y, K_z, b_x, b_y, b_z] \\ & = [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1] \cdot A \cdot (A^T A)^{-1} \end{aligned} \quad \text{公式(4.6)}$$

其中公式左边为带求解参数向量，右边第一项为值全为 1 的向量，长度为 N （表示了当前静止数据的数目）。 A 矩阵为由静止数据构造得到的矩阵，其中 A 的第 i 行元素可以表示为第 i 个静止数据构成的向量，形式如下：

$$\left[\frac{a_x^2}{\|\vec{a}\|} \quad \frac{a_y^2}{\|\vec{a}\|} \quad \frac{a_z^2}{\|\vec{a}\|} \quad \frac{a_x}{\|\vec{a}\|} \quad \frac{a_y}{\|\vec{a}\|} \quad \frac{a_z}{\|\vec{a}\|} \right] \quad \text{公式(4.7)}$$

一旦得到足够的静止数据就可以计算得到当前 **normalization** 需要的参数。

为了更好的得到静止状态的数据，我们这里设计了两种采集方案。一种是手动采集方案。用户需要将采集设备保持一段时间的静止，然后通知采集程序进行数据采集，采集到的数据就认为是静止的数据。当然为了提高计算模型的准确度，需要在不同的位置进行采集，比如放置桌面上静止，放置背包中静止一段时间等不同应用场景。但是该采集方式对于用户要求较高，可能存在一定的误采集。所以我们也提供了另外一种采集方式，自动采集方式。后台程序会自动采集数据，并且将认为静止状态的数据保存下来。操作用户完全不需要在意当前采集物体是否静止，只需要佩戴采集物体进行正常活动，程序会自动判断当前数据是否符合静止要求。但该采集方法相对比较耗时，一般需要采集两到三天才可以采集到合适数目的静止数据，当然通过调整判定静止状态程序的阈值可以加快计算时间，但也一定程度上降低了系统的准确度。

一种自动计算幅值的方法可以描述为：采集 K 个时间段的数据作为一个处理单元，对该单元内所有数值在三个轴度上分别计算均值和标准差，如果三轴数据上的标准差和均值的比值小于一定的幅值 σ ，我们就认为该段时间内传感器静止，并使用当前三轴上的均值打包成一个静止帧作为后续模型计算的输入。

对加速度校正处理的计算过程可以归纳为图 4.1 所示的计算流程图：

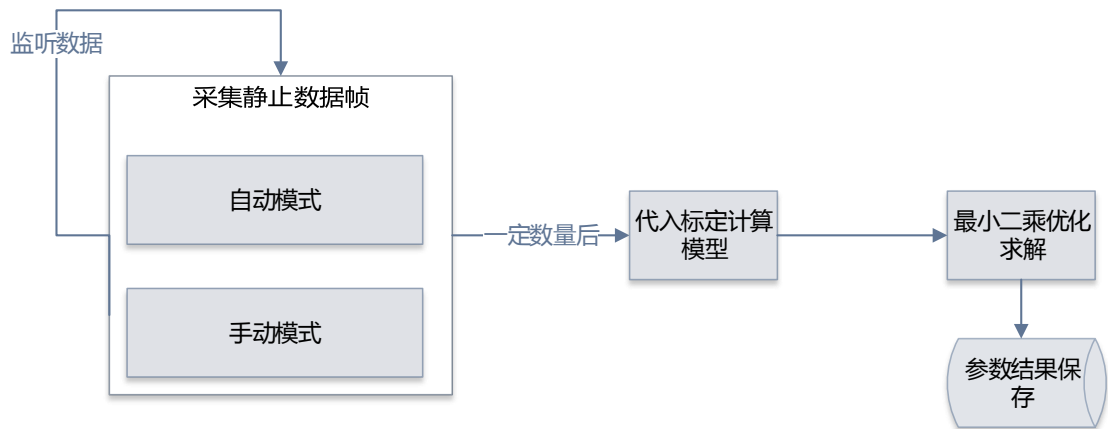


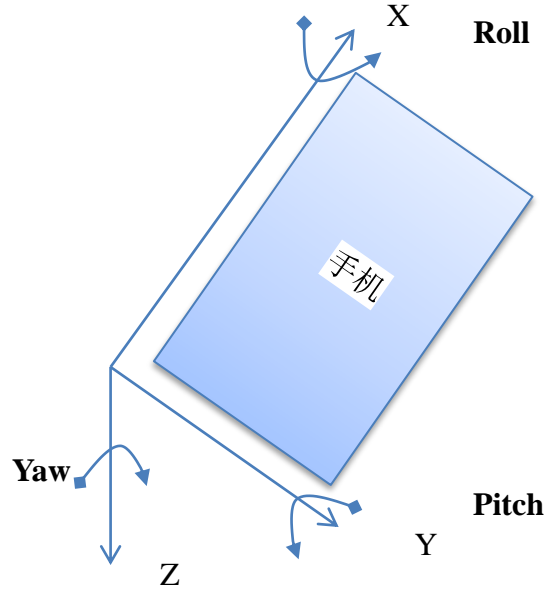
图 4.1 normalization 计算流程图

4.4 加速度，磁通传感器数据计算朝向

4.4.1 yaw, pitch, roll 姿态角度定义

当手机相对静止的时候，加速度传感器的数值反映了重力加速度（静止状态下认为只有重力加速度对传感器产生影响）在当前手机姿态下对手机各个轴向的加速度影响数值。同理，磁通传感器的数值反映了地球磁场在当前手机姿态下对各个轴向的磁通数值影响。利用这两个传感器的数值可以推导出当前手机在世界坐标下的绝对姿态。

为了更好的说明问题，首先说明一下使用 yaw, pitch, roll 角度对手机姿态进行描述的方式，这三个角度描述了手机按照三个旋转轴旋转的角度，具体旋转方式参考图 4.2：

图 4.2 手机姿态描述图（参考文档^[10]）

x 轴旋转对应 roll 角度 ϕ ，y 轴旋转对应 pitch 角度 θ ，z 轴旋转对应 yaw 角度 ψ 。

不同的旋转对应不同的旋转矩阵：

$$\begin{aligned}
 R_x(\phi) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \\
 R_y(\theta) &= \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \\
 R_z(\psi) &= \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

一共有六种不同的旋转顺序，比如按照 yaw-pitch-roll 对应的旋转矩阵表示为 $R_x(\phi) R_y(\theta) R_z(\psi)$ ，按照 yaw-roll-pitch 对应的旋转矩阵表示为 $R_y(\theta) R_x(\phi) R_z(\psi)$ 。不同的旋转关系对应不同的旋转矩阵^[23]，对于最后计算结果上也存在一定的影响。

4.4.2 计算朝向算法推导

首先，我们讨论一下在 yaw-pitch-roll 旋转体系下，如何计算手机的姿态。将重力的分解数值从世界坐标系转换到局部坐标系可以得到下面公式：

$$R_{xyz} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = R_x(\phi) R_y(\theta) R_z(\psi) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \sin \phi \\ \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \quad \text{公式(4.9)}$$

其中，重力使用单位向量来表示。该公式表示了重力分解到手机局部坐标系下的数值大小，由此可以计算得到当前的 pitch 角度和 roll 角度：

$$\begin{aligned} \tan \phi_{xyz} &= \left(\frac{A_y}{A_z} \right) \\ \tan \theta_{xyz} &= \frac{-A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \end{aligned} \quad \text{公式(4.10)}$$

其中， A_x ， A_y ， A_z ，分别表示加速度传感器三轴的测量数据。注意到计算 roll 角度 ϕ 的公式，当 A_y 和 A_z 都是零的时候，计算 \tan 角度会出现异常结果。其实也可以理解，当手机竖直放置在空间中时候，不论当前如何旋转 roll 角度，对应的 A_y 和 A_z 都是零，也就无从计算得到当前的 roll 旋转角度，该种情况对应了一种无法求解情况。

但是计算 θ 的公式就比较好的运行，因为其中不可能出现分子分母同为零的情况。考虑关系 $A_x^2 + A_y^2 + A_z^2 \approx 1$ （约等于 1 是因为存在各种噪声，所以不可能完全等于 1）。所以如果 A_x 为零，分母就不为零，同理，如果分母非常靠近零值，那么分子就不为零。所以按照 yaw-pitch-roll 旋转体系计算手机的 pitch 角度方法是稳定的。

同样，根据参考文献中的定义^[23]，如果使用 yaw-roll-pitch 方式进行旋转，可以得到的计算公式为：

$$\begin{aligned}\tan \phi_{yxz} &= \frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \\ \tan \theta_{yxz} &= \left(\frac{-A_x}{A_z} \right)\end{aligned}\quad \text{公式(4.11)}$$

根据上文分析, 该旋转体系计算角度 ϕ 是稳定的, 但是计算 θ 角度同样不稳定。既然没有最好的方式, 这里使用 yaw-pitch-roll 这种比较通用的旋转计算方式。需要注意的是, 当将手机垂直放置的时候, 会存在计算 roll 角度不稳定的情况, 该办法目前没有办法克服, 所以在实际操作过程中, 应该避免出现手机完全垂直放置的情况。

下面考虑如何计算当前旋转的 yaw 角度 ψ 。单独考虑加速度传感器是不可能得到该结果的^[23], 必须使用磁通传感器数据来进行计算。

这里参考^[10]中的公式推导, 在 yaw-roll-pitch 旋转体系下, 将磁通数据从世界坐标系转换到局部坐标系的公式为:

$$B_p = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi)B \begin{pmatrix} \cos \sigma \\ 0 \\ \sin \sigma \end{pmatrix} + V = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi)B \begin{pmatrix} \cos \sigma \\ 0 \\ \sin \sigma \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} \quad \text{公式(4.12)}$$

其中, 向量 V 表示磁铁硬磁效应对磁通结果的补偿向量。 σ 表示地磁偏角。对上面公式进行化简得到:

$$\begin{aligned}R_z(\psi)B \begin{pmatrix} \cos \sigma \\ 0 \\ \sin \sigma \end{pmatrix} &= R_y(-\theta)R_x(-\psi)(B_p - V) \\ &= \begin{pmatrix} \cos \psi B \cos \sigma \\ -\sin \psi B \cos \sigma \\ B \sin \sigma \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} (B_{px} - V_x) \cos \theta + (B_{py} - V_y) \sin \theta \sin \phi + (B_{pz} - V_z) \sin \theta \cos \phi \\ (B_{py} - V_y) \cos \phi - (B_{pz} - V_z) \sin \phi \\ -(B_{px} - V_x) \sin \theta + (B_{py} - V_y) \cos \theta \sin \phi + (B_{pz} - V_z) \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix}\end{aligned}\quad \text{公式(4.13)}$$

进一步化简, 可以得到当前的 yaw 角度 ψ 的计算公式为:

$$\tan(\psi) = \frac{-(B_{py} - V_y) \cos \phi - (B_{pz} - V_z) \sin \phi}{(B_{px} - V_x) \cos \theta + (B_{py} - V_y) \sin \theta \sin \phi + (B_{pz} - V_z) \sin \theta \cos \phi} \quad \text{公式(4.14)}$$

其中, B_{px} B_{py} B_{pz} 分别表示磁通数据的三轴测量数据。同时, 通过上文分析, 使用加速度数据可以直接计算出当前的 roll 角度 ϕ 和 pitch 角度 θ , 只需要求解当前的向量 \mathbf{V} 即可。

参考计算方法^[10], 计算硬磁效应导致的偏离误差数值可以使用下面的公式:

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = \left(\frac{1}{2} \right) \begin{pmatrix} \text{Max}\{B_{px}\} + \text{Min}\{B_{px}\} \\ \text{Max}\{B_{py}\} + \text{Min}\{B_{py}\} \\ \text{Max}\{B_{pz}\} + \text{Min}\{B_{pz}\} \end{pmatrix} \quad \text{公式(4.15)}$$

公式的含义表示, 计算当前磁通各个轴上数据的最大值和最小值, 两者的均值就表示了硬磁效应导致的偏移误差数值。操作上可以在 calibration 阶段进行计算, 将手机在不同朝向上进行任意的旋转, 采集一段时间的数据之后计算当前所有数据的最值并进行离线计算即可。

4.5 加速度, 磁通, 陀螺仪传感器数据融合计算朝向

当手机不处于静止状态的时候, 就不可以使用上文提供的方法进行计算, 因为道理很简答: 加速度数值不仅仅只有重力加速度。为此, 必须同时考虑另外一个传感器的数据: 陀螺仪传感器。陀螺仪传感器用来衡量手机在不同轴向上旋转角速度, 通过积分角速度的方式可以直接得到旋转的偏移角度, 但是该角度是一个相对角度, 不是绝对角度。绝对角度的计算还必须依靠加速度传感器和磁通传感器的静态数值进行计算。为此, 必须使用一种有效的算法将加速度传感器, 磁通传感器, 陀螺仪传感器的数据进行融合计算得到手机在世界坐标系下的绝对朝向。

本方案参考了下面几份文章中提到的计算朝向算法^{[16][20][21]}, 他们使用了一种基于补偿滤波算法来做朝向估算。该算法可以在使用较低采样频率数据的同时提供较高的计算精度。

算法中使用四元数作为朝向的表示方式, 通过加速度和磁通得到的静态朝向

数值来对陀螺仪积分得到朝向数值进行 kalman 滤波计算。下面将重点说明一下该算法的几个核心部分：包括基本的四元数运算，使用角速度如何积分得到四元数，通过加速度，磁通传感器如何计算静态朝向，以及同时考虑陀螺仪传感器数据进行传感器数据融合计算。

4.5.1 四元数表示形式

四元数是一种方便的表示空间朝向的表示方法，可以直观的将其理解为绕空间某一轴旋转指定的角度(旋转方向符合右手定律)。矩阵也是一种表示空间旋转关系的方式，四元数相比于矩阵而言，具有一定的优势。比如具有更小的数据量，不容易出现病态数据(相比于病态矩阵)等优点，当然也存在一定的缺点，比如不容易理解和实现。

四元数可以表示为如下形式^[21]：

$$q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4] \quad \text{公式(4.16)}$$

四元数和其表示的轴-角对对应关系为：

$$\vec{q} = \left[\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \vec{n} \right] \quad \text{公式(4.17)}$$

其中 \vec{n} 表示四元数的旋转轴， θ 表示旋转角度。

四元数的乘法表示了将两个旋转操作进行叠加之后的旋转操作，比如对一个向量施加 a 旋转和 b 旋转，等价于对向量实施 $a \otimes b$ 的旋转，其计算公式表示为：

$$\begin{aligned} a \otimes b &= [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4] \otimes [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4] \\ &= \begin{bmatrix} a_1 b_1 - a_2 b_2 - a_3 b_3 - a_4 b_4 \\ a_1 b_2 + a_2 b_1 + a_3 b_4 - a_4 b_3 \\ a_1 b_3 - a_2 b_4 + a_3 b_1 + a_4 b_2 \\ a_1 b_4 + a_2 b_3 - a_3 b_2 + a_4 b_1 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad \text{公式(4.18)}$$

另外，四元数也可以非常方便的转换为旋转向量：

$$R = \begin{bmatrix} 2q_1^2 - 1 + 2q_2^2 & 2(q_2 q_3 + q_1 q_4) & 2(q_2 q_4 - q_1 q_3) \\ 2(q_2 q_3 - q_1 q_4) & 2q_1^2 - 1 + 2q_3^2 & 2(q_3 q_4 + q_1 q_2) \\ 2(q_2 q_4 + q_1 q_3) & 2(q_3 q_4 - q_1 q_2) & 2q_1^2 - 1 + 2q_4^2 \end{bmatrix} \quad \text{公式(4.19)}$$

这样子，如果计算一个向量经过四元数旋转之后的结果，可以表示为简单的矩阵相乘的形式：

$$\vec{q} \otimes \vec{v} = R \otimes \vec{v} = \begin{bmatrix} 2q_1^2 - 1 + 2q_2^2 & 2(q_2q_3 + q_1q_4) & 2(q_2q_4 - q_1q_3) \\ 2(q_2q_3 - q_1q_4) & 2q_1^2 - 1 + 2q_3^2 & 2(q_3q_4 + q_1q_2) \\ 2(q_2q_4 + q_1q_3) & 2(q_3q_4 - q_1q_2) & 2q_1^2 - 1 + 2q_4^2 \end{bmatrix} \otimes \vec{v} \quad \text{公式(4.20)}$$

为了便于下文的描述，我们这里参考^[20]中所使用四元数表示相对旋转关系的数学描述形式。即使用 ${}^A_B q$ 表示在 B 坐标系下，将 B 坐标系变化到 A 坐标系的相对旋转量，或者理解为将 A 坐标的点变换到 B 坐标下对应点的计算方法为^[24]：

$$\vec{p}_B = {}^A_B q \otimes \vec{p}_A \quad \text{公式(4.21)}$$

4.5.2 角速度积分计算朝向四元数

一个三轴的角速度传感器可以度量物体在三个轴度上的角速度数值，分别记为 ω_x ， ω_y 和 ω_z 。将世界坐标系变换到传感器局部坐标下的旋转量四元数变化率 ${}^S_E \dot{q}$ 可以被表示为^[25]：

$$\begin{aligned} {}^S \omega &= \begin{bmatrix} 0 & \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix} \\ {}^S_E \dot{q} &= \frac{1}{2} {}^S_E \hat{q} \otimes {}^S \omega \end{aligned} \quad \text{公式(4.22)}$$

其中， ${}^S_E \hat{q}$ 表示上一时刻估算四元数（对应将世界坐标系变换到传感器局部坐标下的相对四元数差值，以后统一说为估算四元数，不再重复描述）数值， ${}^S \omega$ 表示在局部坐标系下加速度测量四元数， \otimes 操作表示两个四元数的乘法，具体可以参考 4.5.1 一节。

在 t 时刻世界坐标系相对局部坐标的四元数差值 ${}^S_E q_{\omega,t}$ 可以通过不断积分四元数变化率 ${}^S_E \dot{q}_{\omega,t}$ 得到，使用下标 ω,t 用来表示该数值通过角速度信息得到的旋转量。在 kalman filter 的模型中，一个数据被分为测量值和估算值。测量值就是通过实际测量得到的数值，比如这里对应角速度得到的测量数值 ${}^S_E q_{\omega,t}$ ，以及下文要提到的根据加速度，磁通得到的四元数测量数值。而估算值是在测量值的基础上通过分析误差模型进行滤波计算得到的数值，该数值作为模型最后计算的结果被用到

下一轮的迭代计算中^[26]。

通过下面公式^[25]可以得到 ${}^S_E q_{\omega,t}$ ：

$$\begin{aligned} {}^S_E \dot{q}_{\omega,t} &= \frac{1}{2} {}^S_E \hat{q}_{est,t-1} \otimes {}^S \omega, t \\ {}^S_E q_{\omega,t} &= {}^S_E \hat{q}_{est,t-1} + {}^S_E \dot{q}_{\omega,t} \Delta t \end{aligned} \quad \text{公式(4.23)}$$

其中， ${}^S_E \hat{q}_{est,t-1}$ 表示上一个时刻对应的四元数估算结果，使用下标 est, t 表示 t 时刻朝向估算数值， Δt 表示采样时间间隔。

4.5.3 加速度，磁通传感器计算朝向四元数

我们知道在相对比较静止的情况下，加速度传感器的测量数值表示了重力在传感器局部坐标下的数值分解信息，同样，磁通传感器的测量数值表示了地磁力（指向地磁北极）在传感器局部坐标下数值分解信息。而单独的使用加速度传感器或者磁通传感器只可以计算得到当前传感器在重力方向和磁力方向上的相对旋转角度，为了得到世界坐标下变化到局部坐标下的相对朝向四元数 ${}^S_E q$ 就必须联合考虑两个传感器的数值。

这里我们假设重力在世界坐标下的数值为在 Z 轴上单位向量，表示为四元数的形式为：

$${}^E \hat{g} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad -1] \quad \text{公式(4.24)}$$

其中 -1 表示重力的方向和定义的世界坐标 Z 轴的正方向相反，具体可以参考 2.1.1。另外，地球磁场可以考虑为在垂直轴上和水平轴上各有一个分量，水平轴上分量表示指向磁北方向的分量，垂直轴上的分量表示地磁偏角现象导致的地磁偏角分量^[27]。那么可得到在世界坐标下磁力的标准数值 ${}^S \hat{b}$ 为：

$${}^E \hat{b} = [0 \quad 0 \quad b_y \quad b_z] \quad \text{公式(4.25)}$$

通过这样子的数学描述，我们就可以将计算朝向四元数的问题转化为一个优化问题：该优化问题的未知数就是当前朝向四元数的四个数值，以及当前磁力方向的 b_y 分量（ b_z 不需求解，有关系 $b_z = \sqrt{1 - b_y^2}$ ），优化的目标方程就是使得当

前传感器在局部坐标系下加速度测量数值 ${}^S\hat{a}$ 转换到世界坐标下和 ${}^E\hat{g}$ 的差值，以及当前传感器在局部坐标系下磁通数值 ${}^S\hat{m}$ 转换到世界坐标下和 ${}^E\hat{b}$ 差值和值最小，可以被描述为：

$$\min_{\substack{{}^S\hat{q} \in \mathbb{R}^4 \\ {}^E\hat{q} \in \mathbb{R}^4}} f_{g,b}({}^S\hat{q}, {}^S\hat{a}, {}^E\hat{g}, {}^S\hat{m}, {}^E\hat{b})$$

$$f_{g,b}({}^S\hat{q}, {}^S\hat{a}, {}^E\hat{g}, {}^S\hat{m}, {}^E\hat{b}) = \begin{bmatrix} {}^S\hat{q} \otimes {}^S\hat{a} - {}^E\hat{g} \\ {}^S\hat{q} \otimes {}^S\hat{m} - {}^E\hat{b} \end{bmatrix} \quad \text{公式(4.26)}$$

其中下标 g,b 表示联合使用加速度和磁通数据得到的方程组。

求解优化问题的算法有很多种，其中一种比较简单有效的算法是梯度下降算法，下面的方程描述了使用梯度下降算法计算朝向的过程：

$${}^S_E q_{\nabla,t} = {}^S_E \hat{q}_{est,t-1} - \mu_t \frac{\nabla f_{g,b}}{\|\nabla f_{g,b}\|} \quad \text{公式(4.27)}$$

$$\nabla f_{g,b} = J_{g,b}^T f_{g,b}$$

其中 $f_{g,b}$ 表示要被优化的目标方程， ${}^S_E \hat{q}_{est,t-1}$ 表示上一时刻的朝向四元数估算数值， ${}^S_E q_{\nabla,t}$ 表示根据梯度下降计算得到的朝向估算值，或者理解为使用加速度和磁通传感器得到的朝向估算数值，而 μ_t 参数表示 t 时刻算法收敛的参数。

传统的计算方式是进行多次的迭代计算最终得到一个数值，在这里的一个优化或者说创新的地方在于，每次只进行一次迭代计算。原理在于：结合使用加速度和磁通数据计算朝向的前提要求传感器是相对静止的（这样子只有重力加速度没有额外其余外力对传感器的加速度造成影响），如果没有该条件，计算将不再准确（所以才会有下文将要提到的结合考虑陀螺仪数值的多传感器融合计算方式）。在该计算模式下，我们并不需要知道迭代计算的最终数值（不能保证静止的情况下，计算得到的结果也无价值），而只需要知道当前根据加速度和磁通数据对朝向估算结果进行校正的数值即可。故这里采用陀螺仪的计算结果对 μ_t 进行改进，改进的原则是：当前 μ_t 的收敛速率大于等于当前陀螺仪计算得到的四元数变换速率^[20]，即表示为：

$$\mu_t = \alpha \left\| {}^S_E \dot{q}_{\omega,t} \right\| \Delta t \quad \text{公式(4.28)}$$

其中, Δt 为采用时间间隔, 考虑到加速度和磁通传感器存在的测量噪声, 加入一个增益参数 α 。

4.5.4 传感器融合计算朝向

根据上文的描述, 使用加速度传感器和磁通传感器计算得到的朝向数值 ${}^S_E q_{\nabla,t}$ 在传感器剧烈运动的情况下将不再准确, 而通过积分角速度形式得到的四元数 ${}^S_E q_{\omega,t}$ 会随着时间的累计而导致一定的漂移误差。所以对多个传感器融合计算方法的本质目标就是如何提供对当前朝向 ${}^S_E q$ 的更好估算。使得一方面利用估算数值 ${}^S_E q_{\text{est},t}$ 滤波掉 ${}^S_E q_{\nabla,t}$ 中的高频误差, 一方面而可以使用 ${}^S_E q_{\nabla,t}$ 来补偿计算 ${}^S_E q_{\omega,t}$ 由于积分漂移所导致的累积误差。

所以, 在世界坐标系转换到传感器局部坐标下的朝向四元数估算值 ${}^S_E q_{\text{est},t}$ 可以被表示为 ${}^S_E q_{\nabla,t}$ 和 ${}^S_E q_{\omega,t}$ 的融合计算数值:

$${}^S_E q_{\text{est},t} = \gamma_t {}^S_E q_{\nabla,t} + (1 - \gamma_t) {}^S_E q_{\omega,t} \quad 0 < \gamma_t < 1 \quad \text{公式(4.29)}$$

其中, γ_t 表示在 t 时刻两个不同估算数值的融合系数。 γ_t 参数的最优数值可以通过下面的一个原则进行计算: 由梯度下降计算得到的加权收敛速率 $\gamma_t \frac{\mu_t}{\Delta t}$ 和由于积分运算导致的加权漂移误差速率 $(1 - \gamma_t)\beta$ 刚好相同, 该情况下两种不同测量体系的收敛和漂移误差刚好可以进行互相补充, 起到了滤波的效果, 即可表示为等式:

$$\begin{aligned} \gamma_t \frac{\mu_t}{\Delta t} &= (1 - \gamma_t)\beta \\ \gamma_t &= \frac{\beta}{\frac{\mu_t}{\Delta t} + \beta} \end{aligned} \quad \text{公式(4.30)}$$

其中, β 参数表示了当前陀螺仪测量误差对于 ${}^S_E \dot{q}_{\omega,t}$ 的影响, 可由下面的计算公式得到:

$$\beta = \left\| \frac{1}{2} \hat{q} \otimes [0 \quad \tilde{\omega}_{\max} \quad \tilde{\omega}_{\max} \quad \tilde{\omega}_{\max}] \right\| = \sqrt{\frac{3}{4}} \tilde{\omega}_{\max} \quad \text{公式(4.31)}$$

上式中, $\tilde{\omega}_{\max}$ 表示了当前陀螺仪测量误差的最大值, 单位为 rad/s , 在计算中一般设置为 $5^\circ/s$, 也就是 $0.0872 rad/s$ 。根据定义, β 表示了当前测量误差最大值乘上任意一个单位四元数 \hat{q} 所得结果的幅值, 也就表示了测量误差对朝向变化 ${}^S_E \dot{q}_{\omega,t}$ 的最大幅值偏差影响。

考虑到上文中提到的 μ_t 参数 (表示了根据加速度, 磁通数据计算的收敛速率), 为了表示有效的收敛, 将 μ_t 定义为大于等于当前陀螺仪计算得到的四元数变换速率, 也就是说增益参数 α 数值范围是 $[1 \quad +\infty]$, 为了得到更好的收敛速率和校正效果, 一般将 α 取较大的数值, 当 $\alpha \gg \beta$ 时, 可以将公式简化为:

$$\begin{aligned} \gamma_t &= \frac{\beta \Delta t}{\mu_t} \\ {}^S_E q_{\text{est},t} &= \frac{\beta \Delta t}{\mu_t} \left(-\mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \right) + (1-0)({}^S_E \hat{q}_{\text{est},t-1} + {}^S_E \dot{q}_{\omega,t} \Delta t) \end{aligned} \quad \text{公式(4.32)}$$

注意, 带入公式的过程中, 一个 γ_t 按照其定义表达式被带入, 一个被认为数值零带入, 这是为了消除掉相同的 μ_t 参数, 进一步化简可以得到最后的 kalman 滤波计算方程:

$$\begin{aligned} {}^S_E q_{\text{est},t} &= {}^S_E \hat{q}_{\text{est},t-1} + {}^S_E \dot{q}_{\text{est},t} \Delta t \\ {}^S_E \dot{q}_{\text{est},t} &= {}^S_E \dot{q}_{w,t} - \beta \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \end{aligned} \quad \text{公式(4.33)}$$

方程可以被解释为当前 t 时刻朝向的预算值等于上一个时刻的朝向加上当前朝向变化测量值 ${}^S_E \dot{q}_{\text{est},t}$ 和时间间隔 Δt 的乘积。另外一方面, 朝向变化测量值 ${}^S_E \dot{q}_{\text{est},t}$ 被表示为 t 时刻积分计算陀螺仪数据得到的朝向变化值 ${}^S_E \dot{q}_{w,t}$ 减去 β 参数乘上根据加速度和磁通计算得到的朝向梯度数值。总体上使用陀螺仪的计算数值, 当在计算的同时, 使用加速度和磁通得到的朝向梯度数值来对陀螺仪得到朝向进行滤波计算。

根据上文的描述，总体上传感器融合算朝向的过程可以被描述图 4.3 所示的计算框图：

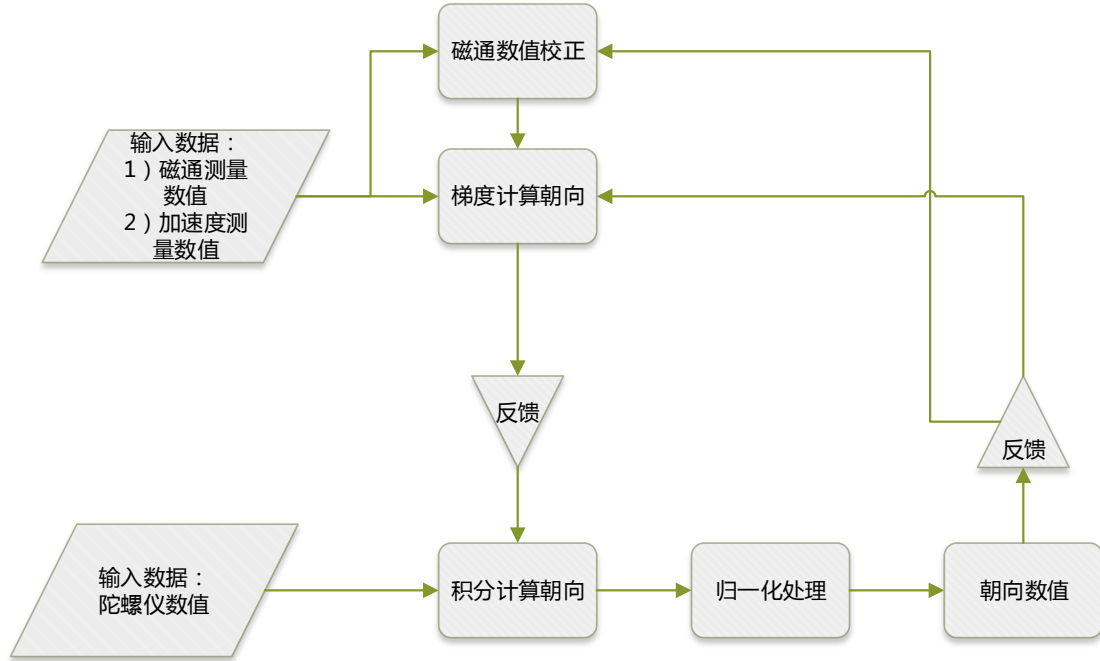


图 4.3 传感器融合计算流程

4.6 测试

本小节主要对上文提交到的两种朝向估算算法进行测试，并对比测试结果。

4.6.1 测试用例

高精度的测算物体空间中的朝向需要特定的测量设备，比如论文^[21]中使用高精度光学跟踪设备，通过将传感器绑定在安装有光学标记点的物体上的方式来动态测量传感器当前的朝向。由于实验室缺乏相关的高精度测量设备，所以这里采用一种替换方法进行真实数据采集，方案设计如下：

将拍照手机固定（使用三脚架固定手机）在特定的几个位置下（比如指向正北，垂直放置等姿态），使用型号为 EYESKEY EK-1001 的指南针和型号为 Tajima SLT-100 的水平仪对手机的 yaw-pitch-roll 进行测量，记录为标准数值。同时采集下当前静止状态下 10s 的传感器数据用作朝向姿态估算的原始计算数据。当然该

方法存在一些问题,比如无法动态测量朝向标准值。同时因为使用物理测量方式,标准值的结果也存在一定误差。尤其是 yaw 角度偏差会较大,因为 yaw 角度是通过指南针测量得到,一般而言,指南针测量角度会受到磁场影响,本身就会存在 2 到 3 度的误差。相对而言,使用水平仪测量的 pitch 和 roll 角度的可信度会更高一些。当然以后有了高精度的测量设备之后,会得到更好的标准值测量数据,这也是以后需要改进的地方。

根据上面描述的测量方法,得到一共 16 组测试用例,具体采集说明如下:

- 1) 将手机平放在桌面上,调整手机的 yaw 角度,使得与磁北方向夹角分别为 0,90, 180, 270 度
- 2) 手机沿着长边旋转(即调整 roll 角度),分别旋转到 roll 为 90 度和-90 度,测量数据
- 3) 手机沿着短边旋转(即调整 pitch 角度),设置为 30 度和-30 度(根据设计文档中描述, pitch 为 90 度似乎, roll 角度计算不稳定,所以这里设计为使用 30 度来测量
- 4) 调整手机 yaw=90 度, pitch=-30 度,进行测量。
- 5) 调整手机 yaw=90 度, roll=-90 度,进行测量。

4.6.2 测试方法

测试用的每组数据都有多帧处在静止状态下,我们在计算的时候使用序号为区间[10,40)共 30 帧的数据进行计算(处在数据中间,传感器数据相对稳定),每一帧数据都可以推算得到一个朝向,并将得到朝向结果统一表示为 yaw-pitch-roll 形式。

评价误差的标准是:所有 480 帧数据(一共 16 组数据,每组使用 30 帧)计算得到 yaw-pitch-roll 角度和标准数值的平均绝对值误差:

$$mae = \sum_i^n \frac{|D_m - D_g|}{n} \quad \text{公式(4.34)}$$

其中, mae 表示平均绝对值误差, n 表示计算总帧数, D_m 表示测量得到角度

数值, D_g 表示标准数值 (对 yaw, pitch, roll 分别进行统计)。另外也统计了最小和最大绝对值差值。

4.6.3 测试结果

4.6.3.1 加速度, 磁通传感器数据计算朝向

测试使用了两种不同的计算归一化方式。

- 1) 离线计算归一化系数。计算离线归一化系数是指离线采集好处于不同静止姿态下手机传感器数据, 并利用该数据计算归一化系数。
- 2) 在线实时归一化系数。在线是指使用当前测试集所采集到的传感器数据作为归一化计算原始数据, 实时的计算归一化系数, 并代入该数据进行归一化计算。

两种不同情况下得到结果见表 4.1 和表 4.2:

表 4.1 离线归一化系数估算手机姿态结果

	误差均值(度)	误差最小值 (度)	误差最大值 (度)
Yaw	7.09375	0.00951997	29.8797
Pitch	4.91304	0.217048	15.1743
Roll	1.83232	0.0795925	4.5192

表 4.2 在线归一化系数估算手机姿态结果

	误差均值(度)	误差最小值 (度)	误差最大值 (度)
Yaw	5.11763	0.0198454	13.7978
Pitch	1.09867	0.0154519	2.29301
Roll	2.47149	0.0397963	7.17106

测试结果表明, yaw 角度的误差相对大一些。这主要和外界磁场环境有关, 因为 yaw 角度是通过磁通数据计算得到。当然通过指南针得到 yaw 基准值本身就存在 2 到 3 度的误差。相对而言, pitch, roll 计算结果更具有参考价值。从当前测试集合得到的结果来看, 使用在线计算归一化系数得到的结果比代入离线归一

化系数得到结果更好一些。

4.6.3.2 加速度，磁通，陀螺仪传感器数据融合计算朝向

传感器融合计算朝向算法需要设置两个不同的参数，一个为 β ，该定义和上文 4.5 中定义一致，另外还有一个参数 ζ ，该值与陀螺仪的偏移量变化率有关 (rad / s^2)。

下面的测试将枚举当前两个配置参数进行计算，其中 β 的取值范围为 $[0.0, 1.0]$ ，步进长度为 0.1。 ζ 取值范围为 $[0.0, 0.1]$ ，步进长度为 0.01。得到测试结果见图 4.4，图 4.5，和图 4.6：

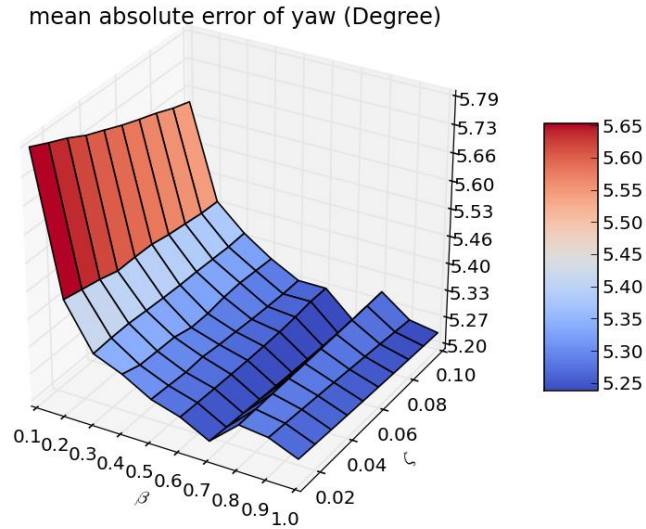


图 4.4 传感器融合计算，不同配置下 yaw 角度平均绝对值误差

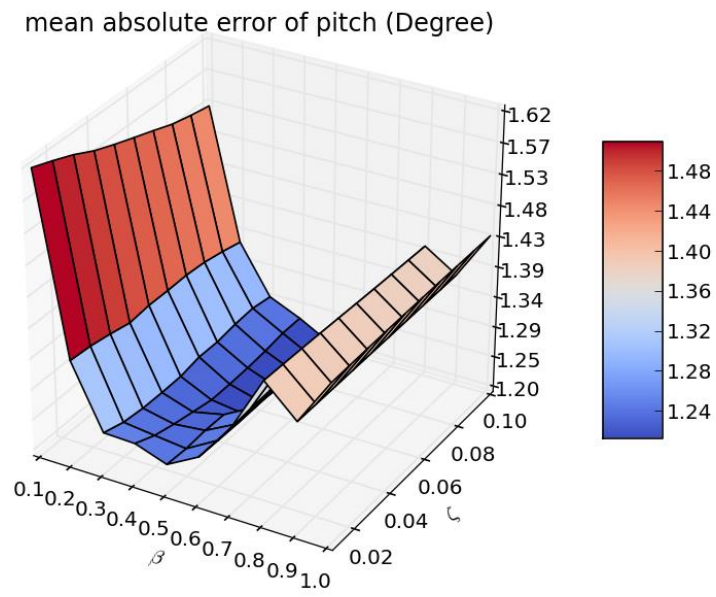


图 4.5 传感器融合计算，不同配置下 pitch 角度平均绝对值误差

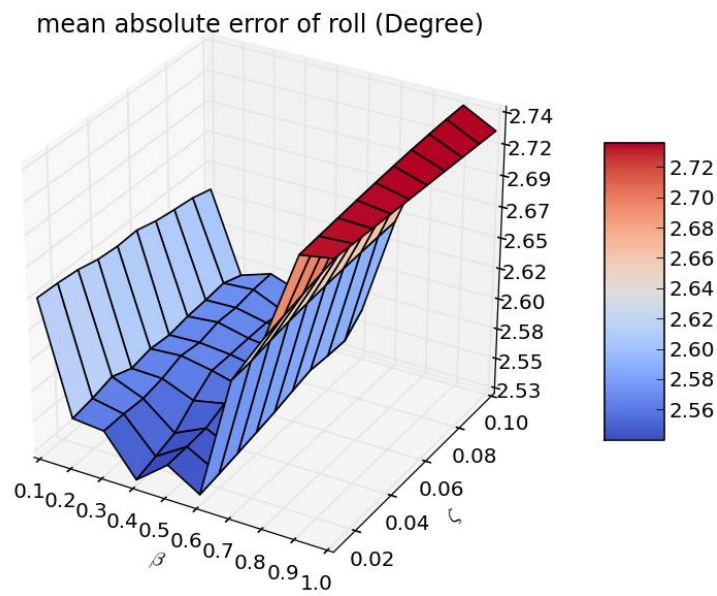


图 4.6 传感器融合计算，不同配置下 roll 角度平均绝对值误差

由于 yaw 角度的标准值通过指南针获得，相对没有 pitch 和 roll 角度的可信度高。为此，这里将 pitch 和 roll 角度综合起来考虑计算平均误差，结果见图 4.7：

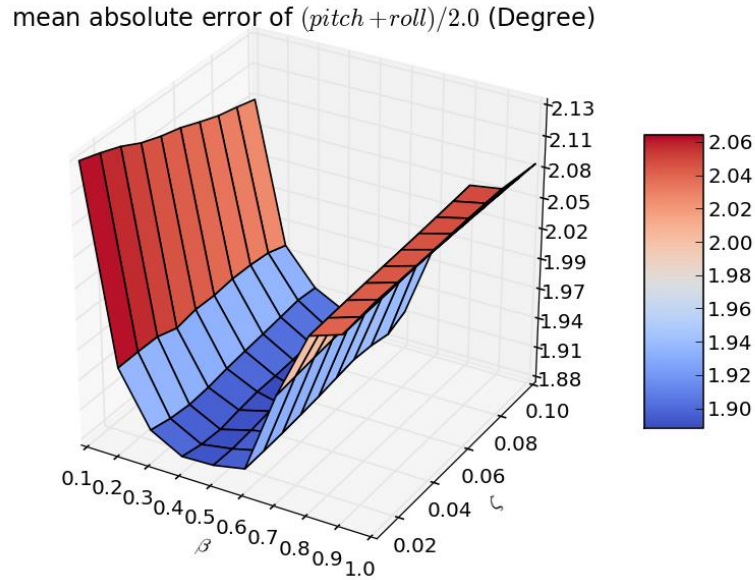


图 4.7 传感器融合计算，不同配置下 pitch 和 roll 平均绝对值误差

根据图 4.7 所得结果，在 β 取 0.5 和 γ 取 0.07 的时候得到误差最小，代入该参数配置计算得到结果如下表 4.3 所示：

表 4.3 在融合传感器计算手机姿态结果

	误差均值(度)	误差最小值（度）	误差最大值（度）
Yaw	5.26979	0.00533724	13.7277
Pitch	1.20245	0.00308809	9.45
Roll	2.56306	0.00330615	8.81923

该结果和表 4.1 相比，从误差均值上考虑，结果略差一些，约差了 0.1 度。但从最小值角度考虑，融合计算得到结果相比表 4.1 得到结果略好一些。

4.7 本章小节

本章重点讨论了两种不同传感器配置情况下计算手机朝向的算法。一种算法使用加速度，磁通传感器计算相对静止状态下的朝向数据。另一种算法使用加速度，磁通，陀螺仪传感器进行传感器融合计算，得到运动状态下的朝向数据。4.4 和 4.5 两小节分别对两种算法的进行了描述。并在本章的最后对两种算法进行了测试。

5 传感器，相机坐标系旋转矩阵标定

5.1 问题定义

正如上文 2.1.4 所言，手机中传感器是一个黑盒系统，我们无从确切知道传感器在手机中所在的具体位置和朝向。所以，我们从已知的条件出发进行分析。首先我们可以通过传感器测量得到的参数计算出当前手机在世界坐标系下的朝向（参考第 4 章内容）。另外一方面，通过相机标定的方式（参考 5.3 小节内容）可得到当前相机坐标系和定标板坐标系之间的相对旋转矩阵。进一步而言，我们在假设当前传感器坐标系和相机坐标系相对旋转矩阵为未知量的情况下，联立之前计算得到的结果，便可计算出定标板平面的方位角和下倾角估算数值。仅仅知道估算数值还没有用，为了求解未知量，还必须知道定标板所在平面方位角和下倾角的真实数值，这样才能建立优化方程进行求解。由于定标板在测量过程中是固定的，可认为真实的方位角和下倾角是一个固定数值。基于此考虑，我们在固定了定标板之后，使用物理测量的方式（水平仪测量倾斜角，高精度指南针测量方位角）得到当前定标板平面方位角和下倾角的基准数值。由此可建立一个联合标定优化方程^[28]，以最小化方位角和下倾角的估算值与基准值的差值作为优化目标，迭代计算出未知的参数。综上所述，该标定问题可描述为：

1) 输入：

- a) 采集拍照时刻传感器三轴加速度数据值 $(A_x \ A_y \ A_z)$ ，三轴磁通数据值 $(M_x \ M_y \ M_z)$ 和三轴陀螺仪数据值 $(G_x \ G_y \ G_z)$ 。
- b) 通过物理方式测量得到当前定标板平面在世界坐标系下的方位角和下倾角基准数值 O_s 和 D_s 。为了得到更好的结果，定标板在世界坐标系下有多种摆放位置，对每种摆放位置下的数值都需要进行测量。
- c) 在固定定标板的情况下，拍摄的不同视角下的定标板照片。
- d) 拍摄照片时刻的时间戳。（用来对齐传感器数据，得到拍照时刻的传感器数值）

2) 输出:

- a) 相机坐标系和传感器坐标系之间的相对旋转关系 ${}_{sensor}^{camera}R$ 。
- b) 照相机内参。

我们在下文统一将该标定问题简称为联合标定。后文不在重复说明。

5.2 计算步骤

具体而言，计算过程可以分为如下的几个步骤:

(一) 第一步:

根据当前读取的传感器数据，计算当前采集手机的空间姿态。(其中， N 表示照片拍摄数据， M 表示定标板放置次数。具体可以参考下文采集方案一节)，计算手机姿态问题的输入输出定义如下表 5.1 所示:

表 5.1 联合标定 – 计算手机姿态输入输出数据格式

输入数据		
名称	数目	数据类型
三轴加速度数据 (A_x A_y A_z)	采集静止状态下手机 2-5s 数据	三轴向量，数据值类型为 double。
三轴磁通数据 (M_x M_y M_z)	采集静止状态下手机 2-5s 数据	三轴向量，数据值类型为 double。
三轴陀螺仪数据 (G_x G_y G_z)	采集静止状态下手机 2-5s 数据	三轴向量，数据值类型为 double。
输出数据		
名称	数目	数据类型
手机 yaw 姿态角度 ψ	N	单值，数值类型 double
手机的 pitch 姿态角度 θ	N	单值，数值类型 double
手机的 roll 姿态角度 ϕ	N	单值，数值类型 double

(二) 第二步:

利用相机外定标的方式得到当前照相机坐标系和定标板坐标下的相对变换关系 $\text{camera calibration } R$ 。同时，结合第一步得到的下倾角和方位角估算数值可推导出当前定标板在空间中的方位角和下倾角估算数值，分别记为 O_g 和 D_g 。具体的问题描述如表 5.2 所示:

表 5.2 联合标定 – 相机标定输入输出数据格式定义

输入数据		
名称	数目	数据类型
手机 yaw 姿态角度 ψ	N	单值，数值类型 double
手机的 pitch 姿态角度 θ	N	单值，数值类型 double
手机的 roll 姿态角度 ϕ	N	单值，数值类型 double
不同定标板摆放方式下 采集得到不同视角的照片	N	照片数据，jpg 格式
输出数据		
名称	数目	数据类型
定标板平面在空间中的 方位角估算数值 O_g	M	单值，数值类型 double
定标板平面在空间中的 下倾角估算数值 D_g	M	单值，数值类型 double

(三) 第三步:

为了得到定标板平面在空间中方位角和下倾角的基准数值。这里使用物理测量方式对固定位置的定标板进行测量（使用水平仪测量下倾角，指南针测量方位角）。测量基准数值问题输入输出格式定义见下表 5.3:

表 5.3 联合标定 – 测量天线平面基准数值输入输出数据格式

输入数据：无		
输出数据		
名称	数目	数据类型
定标板平面在空间中的方位角 标准值 O_g	M	单值，数值类型 double
定标板平面在空间中的下倾角 标准值 D_g	M	单值，数值类型 double

(四)第四步：

到目前为止，已经计算得到当前定标板平面在空间中方位角和下倾角的估算数值和真实基准数值。（其中估算数值是由未知参数所表示的，即当前定标需要求解的传感器坐标系和相机坐标系的相对旋转关系 ${}_{sensor}^{camera}R$ ）。由此我们可建立一个联合标定优化方程，以最小化方位角和下倾角的估算值与基准值的差值作为优化目标，迭代计算出未知的参数。优化计算问题输入输出定义见表 5.4 所示：

表 5.4 联合标定 – 优化计算模块输入输出数据格式

输入数据		
名称	数目	数据类型
定标板平面在空间中的方位角估算数值 O_g	M	单值，数值类型 double
定标板平面在空间中的下倾角估算数值 D_g	M	单值，数值类型 double
定标板平面在空间中的方位角标准值 O_g	M	单值，数值类型 double

续表 5.4

定标板平面在空间中的下 倾角标准值 D_g	M	单值，数值类型 double
输出数据		
名称	数目	数据类型
传感器坐标系和相机坐标 系的相对变换关系 ${}_{sensor}^{camera}R$	1	3*3 矩阵，数值类型 double

根据上文描述的计算步骤，总体计算流程图可被描述为图 5.1 所示：

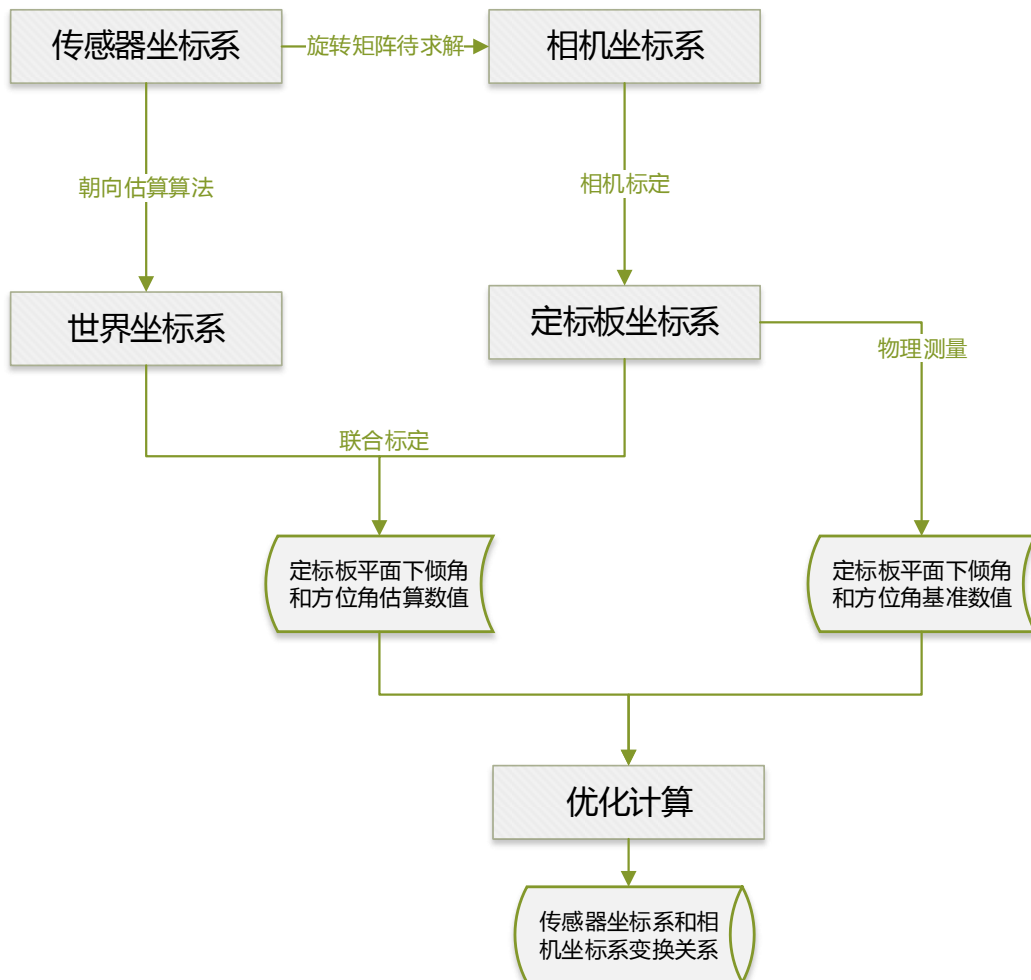


图 5.1 联合标定计算流程图

5.3 相机标定

5.3.1 问题描述

在图像测量过程以及机器视觉应用中，为确定空间物体表面某点的三维几何位置与其在图像中对应点之间的相互关系，必须建立相机成像的几何模型，这些几何模型参数就是相机参数。在大多数条件下这些参数必须通过实验与计算才能得到，这个求解参数的过程就称之为相机标定（或摄像机标定）。无论是在图像测量或者机器视觉应用中，相机参数的标定都是非常关键的环节，其标定结果的精度及算法的稳定性直接影响相机工作产生结果的准确性。因此，做好相机标定是做好后续工作的前提，提高标定精度是科研工作的重点所在。下面就将介绍一下相机标定的原理，以及进行标定的方法。

5.3.2 成像模型

为了更好的说明定标的原理和内容，这里首先说明一下相机的呈现原理。在理想情况下，相机的成像模型是一个小孔成像模型（图 5.2 来自于摄相机标定 - 模式识别国家重点实验室 - 中国科学院自动化研究所课程课件中）：

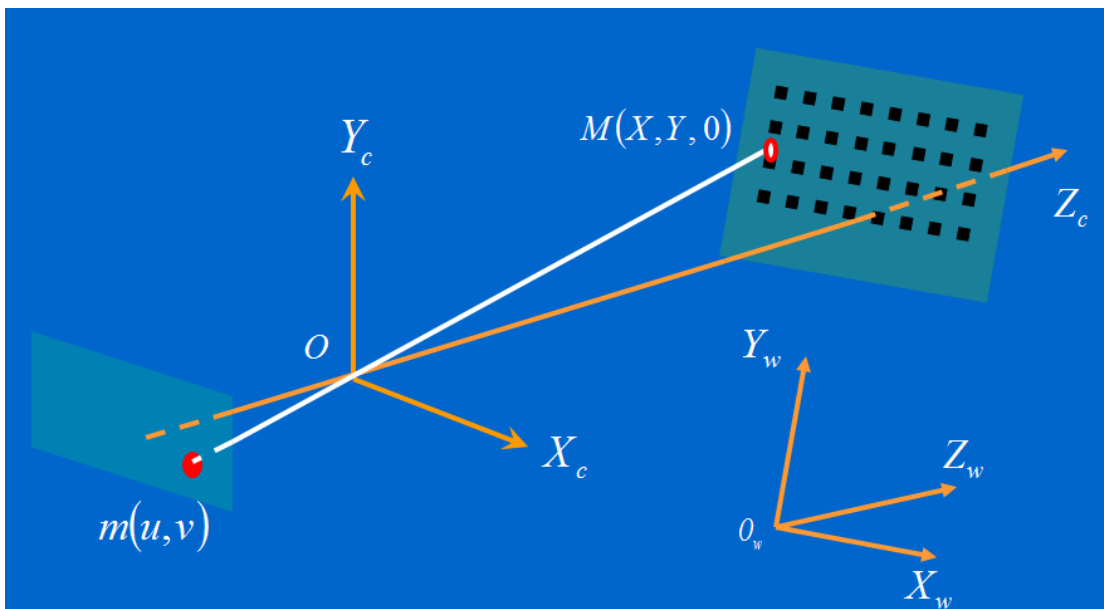


图 5.2 小孔成像原理

形式上，现有成像平面上点 $P_d(u, v)$ 以及对应的三维空间相机坐标系下对应点 $X_c(x_c, y_c, z_c)$ ，定义相机内参数矩阵 K 来描述 X_p 与 X_c 的关系^[29]：

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{公式(5.1)}$$

使得

$$X_p = KX_n \quad \text{公式(5.2)}$$

其中 $X_p = (u, v, 1)^T$ ， $X_n = (\frac{x_c}{z_c}, \frac{y_c}{z_c}, 1)^T$ ， f_x 和 f_y 为相机在 x 和 y 方向上的焦距， (c_x, c_y) 为投影中心。

从小孔方向看成像平面的对称面与物体平面的投影关系，如下图 5.3 所示：

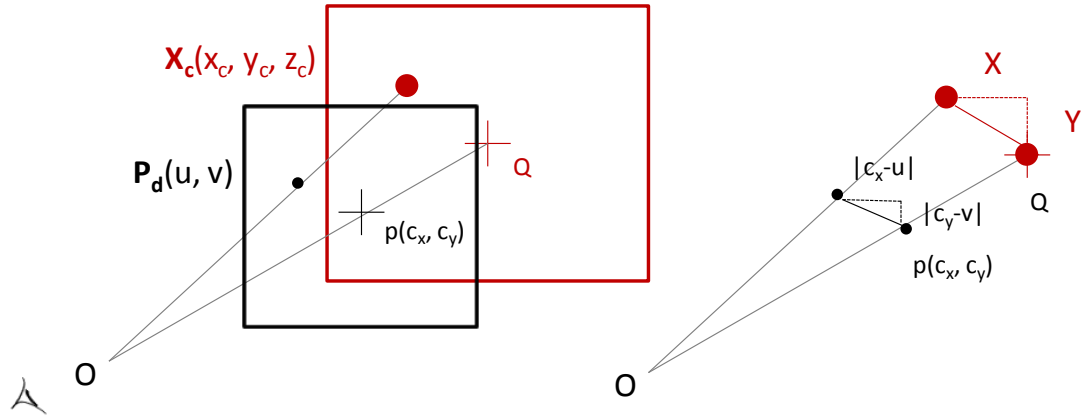


图 5.3 成像平面点与空间物体平面的投射投影关系

从小孔点 O 到投影中心 p 的距离 Op 即为相机焦距 f ，到物体平面中心 Q 的距离 OQ 为物距，即该平面的深度距离 Z ，根据相似三角形原理，可以得到：

$$\frac{x_c}{z_c} = \frac{(u - c_x)}{f_x}, \frac{y_c}{z_c} = \frac{(v - c_y)}{f_y} \quad \text{公式(5.3)}$$

将上式化解为矩阵的形式可以得到：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c / z_c \\ y_c / z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{公式(5.4)}$$

这可以说明相机内参矩阵 K 正确反映了三维空间至二维成像平面的投影关系。因而相机标定的问题集中在如何准确稳定的求取内参矩阵 K 。

上述投影模型为理想的小孔模型，然而实际相机镜头在成像时并不完全符合这样的理想模型。由于相机镜头在制造和组装上的精度限制，一般的相机在成像时受到镜头畸变的影响，其中影响最大的畸变包括径向畸变和切向畸变两部分。在实际成像模型中，为了模拟这样的畸变情况存在，需要加入相机畸变模型。

下图 5.4 说明了相机的两种畸变形态^[30]：

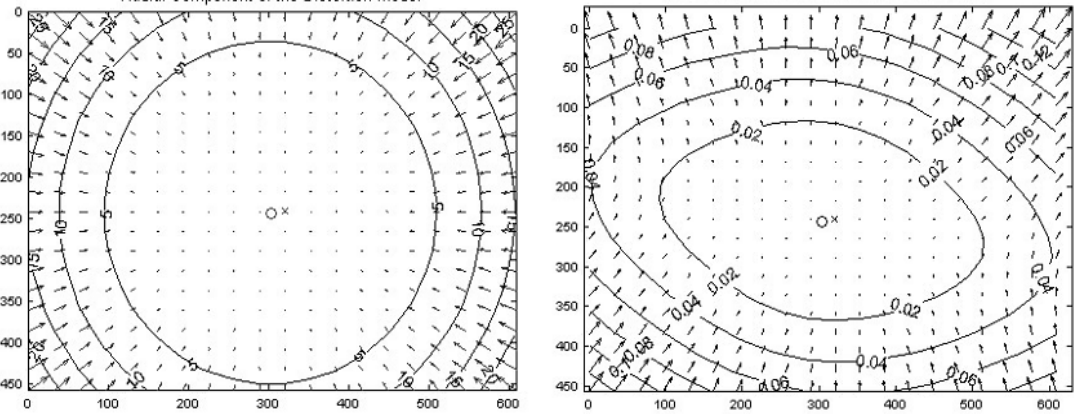


图 5.4 径向畸变模型成像效果（左）和切向畸变模型成像效果（右）

径向畸变的产生主要是由于镜头加工时，其表面多为工艺上更容易加工的球面，而非理想中的抛物面，这导致光线在穿过镜头时，离镜头中心越远的光线被折射的更厉害；切向畸变的产生主要是由于相机镜头在组装过程中，镜头和成像感光元件并没有完全平行所致^[29]，在相机的畸变模型中，一般使用镜像畸变参数 k_1, k_2, k_3 ，以及切向畸变参数 p_1, p_2 来模拟这两种情况下的畸变效果。

设相机局部空间坐标系下的三维点为 $X_c = [x_c, y_c, z_c]^T$ ，将其归一化后得到 $X_n = [x_n, y_n]^T = [x_c / z_c, y_c / z_c]^T$ ，此时引入畸变模型来模拟实际成像过程中的非理想情况，设 $X_k = [x_k, y_k]^T$ 为畸变后成像点在以成像中心为原点的成像平面上位置，

则有：

$$X_k = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) X_n + X_g \quad \text{公式(5.5)}$$

其中

$$\begin{aligned} X_g &= [2p_1 x_n y_n + p_2(r^2 + 2x_n^2), p_1(r^2 + 2y_n^2) + 2k_4 x_n y_n]^T \\ r^2 &= x_n^2 + y_n^2 \end{aligned} \quad \text{公式(5.6)}$$

可以看到 X_k 主要由前半部分的径向畸变和后半部分的切向畸变组成。在引入畸变模型后，再进行透视投影，可得到相机局部坐标系下三维点 X_c 对应的投影平面上成像点 $[u, v]^T$ 。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{公式(5.7)}$$

将上次计算 X_k, Y_k 公式带入，可以得到从相机局部坐标三维空间点 $X_c = [x_c, y_c, z_c]^T$ 到成像二维平面点 $P_d = [u, v]^T$ 的投影公式（在考虑镜头畸变的情况下），关系如下^[31]：

$$\begin{aligned} X_c &= [x_c, y_c, z_c]^T \\ X_n &= [x_n, y_n]^T = \left[\frac{x_c}{z_c}, \frac{y_c}{z_c} \right]^T \\ X_k &= (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) X_n + X_g \\ X_g &= [2p_1 x_n y_n + p_2(r^2 + 2x_n^2), p_1(r^2 + 2y_n^2) + 2k_4 x_n y_n]^T \\ r^2 &= x_n^2 + y_n^2 \\ u &= f_x x_k + c_x \\ v &= f_y y_k + c_y \end{aligned} \quad \text{公式(5.8)}$$

5.3.3 定标计算

综合上面的分析，在天线测量问题中由于需要在外场景进行相机标定，所以不能对相机的运动做过多的约束，同时也无法搭设一定的相机运动平台以方便相机做固定轨道的拍摄。所以在天线测量问题中，使用基于拍摄平面型标定物的传

统相机标定法来为摄像机进行标定。

定标计算的方法一般有下面几个步骤^[29]:

- 1) 打印一张模板并贴在一个平面上
- 2) 从不同角度拍摄若干张模板图象
- 3) 检测出图象中的特征点
- 4) 求出摄像机的内参数和外参数
- 5) 求出畸变系数
- 6) 优化求精

定标的模板一般使用具有明显特征的棋盘格作为标定物，为了获得更加好的效果，一般需要将图像在不同位置上进行拍摄以便覆盖摄像机可见的整个空间中，这样子拍摄可以为下面的计算相机内外参数提供更多的信息^[32]，相机定标方式参考图 5.5:

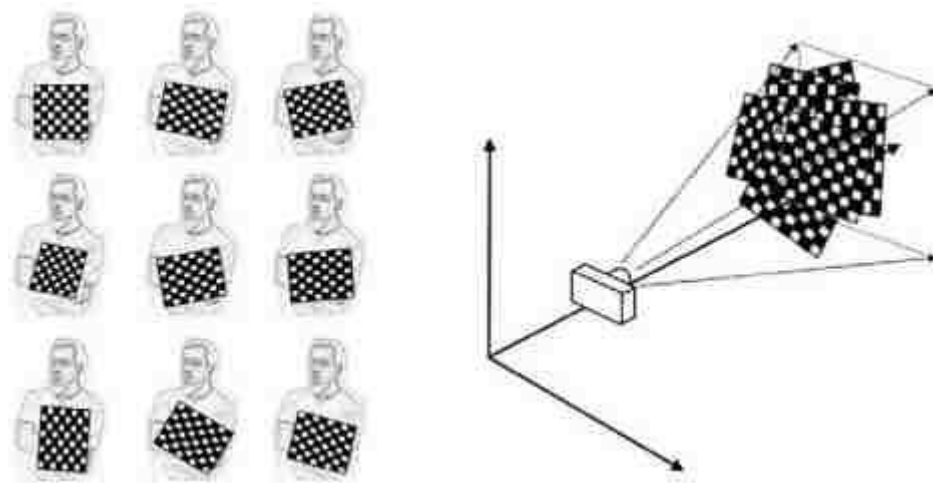


图 5.5 相机定标操作方式

为了计算得到标定参数（内定标参数和外定标参数），这里选用 OpenCV 中已实现的基于拍摄平面型标定物的传统相机标定法进行标定的 API，该实现算法效果较好，鲁棒性高。最主要使用了如下两个计算 API^[30]:

- 1) `cvFindChessboardCorners`

输入：包含棋盘格的图像，棋盘格大小。

输出：棋盘格角点位置。

2) cvCalibrateCamera2

输入：棋盘格角点位置，包含棋盘格的图像，点的数目等。

输出：相机内参数，畸变参数，以及相机的外参数。

相机镜头姿态离线校准章节中涉及到的内外定标，以及相机拍摄天线过程中涉及到的相机相对棋盘格姿态（外定标）都可以使用上面 API 进行计算。下文将不再重复说明。

5.4 优化计算

照相机的标定计算内容已在 5.3 节进行了描述，计算手机朝向算法的内容已在 4 章中进行了描述。这里主要介绍一下该标定过程中最终重要的优化计算模块，具体而言包括下面接内容：

- 1) 数据采集采集。
- 2) 定标板平面方位角和下倾角基准数值测量方式。
- 3) 定标板平面方位角和下倾角估算数值计算。
- 4) 建立优化方程
- 5) 优化方程求解。

5.4.1 数据采集

为了得到更加准确和精确的效果，定标板的采集位置需要尽可能的覆盖整个三维空间。所以这里设定了下面的多层次采集方案：

将定标板放置在空间中下面几个位置上：

- 1) 定标板水平放置在水平面上
- 2) 定标板垂直水平面放置
- 3) 定标板下倾角 60 度放置

在每一个放置位置上，又按照不同的方位角将定标板进行旋转。具体而言，每隔 180 度旋转一次定标板。即需要旋转 2 个不同位置，便可以覆盖 360 度范围。总计需要在 6 个位置上放置定标板。同样，在定标板固定之后，相机也需要对在

不同位置对定标板进行拍摄。将相机对准定标板，每隔 30 角度拍摄一张照片，共计采集 12 张照片。最后一共需采集约 72 张照片左右的数据。

5.4.2 定标板平面方位角和下倾角基准值测量方式

如上文 2.2 中描述，定标板平面的方位角就是平面的法向量在水平面上的分量与正北方向向量的夹角。而下倾角表示为九十度减去定标板平面的法向量与重力方向的夹角。所以这里使用了一种物理测量的方式，使用水平仪放置在定标板平面上，读取当前水平仪的倾斜角作为下倾角。将具有测量斜坡方向角能力的指南针放置在定标板平面上，并将指南针的长边和定标板的长边对齐，静止后，可以测得当前平面的方位角。

基于上述要求，本方案中使用了 EYESKEY EK-1001 型号的指南针和 Tajima SLT-100 型号的水平仪进行测量：

5.4.3 计算定标板下倾角和方位角

在得到了手机的姿态角度 yaw-pitch-roll 之后，就可以推导出当前手机在世界坐标下的旋转矩阵。假设旋转矩阵设为 ${}_{\text{sensor}}^{\text{world}}R^{ij}$ ，计算公式如下：

$${}_{\text{sensor}}^{\text{world}}R^{ij} = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi) \quad \text{公式(5.9)}$$

其中， ψ, θ, ϕ 分别表示 yaw, pitch, roll 角度。 ij 上标表示了在第 i 个定标板拍摄位置下，第 j 个照片的计算结果。下面都用此表示方法，以后不再重复介绍。

在已知当前传感器读数的情况下可以得到手机当前的姿态，并进而可计算出当前手机在世界坐标系下的旋转矩阵，记为 ${}_{\text{sensor}}^{\text{world}}R^{ij}$ 。另外一方面，通过相机拍照的方式可计算得到相机坐标系和定标板坐标系之间的旋转关系，记为 ${}_{\text{calibration}}^{\text{camera}}R^{ij}$ 。

根据已经计算出来的数据，可联合计算得到世界坐标系转换到定标板坐标系的旋转矩阵 ${}_{\text{world}}^{\text{calibration}}R^{ij}$ （即为定标板平面的姿态），计算方法可以用矩阵连乘的形式表示^[20]：

$${}_{\text{world}}^{\text{calibration}}R^{ij} = {}_{\text{camera}}^{\text{calibration}}R^{ij} \cdot {}_{\text{sensor}}^{\text{camera}}R^{ij} \cdot {}_{\text{world}}^{\text{sensor}}R^{ij} \quad \text{公式(5.10)}$$

坐标系的旋转对应于点旋转的反操作，所以这里，通过下面的计算可以计算

得到定标板坐标系的 X 轴在世界坐标下的三维向量表示（世界坐标系原点和定标板坐标系原点对齐）

$$X_{world} = {}^{calibration}_{world}R \cdot X_{calibration} \quad \text{公式(5.11)}$$

根据 ${}^{calibration}_{world}R^{ij}$ 关系，计算定标板坐标系在世界空间中的下倾角和方位角可使用下面的计算方式来描述：

- 1) 下倾角（Z 轴与重力的夹角）
- 2) X 轴与磁北的夹角（X 轴水平放置时刻有效）
- 3) Y 轴与磁北的夹角（Y 轴水平放置时刻有效）

其中下倾角的计算方式比较明显，即计算 Z 轴与重力的夹角。但是方位角的测量和上文定义 2.2 的有些不太一样。因为如果使用 Z 轴在水平面的夹角作为方位角，一方面不太好实际的测量该数值，另外一方面，已经使用 Z 轴计算下倾角了，再使用 Z 轴数据计算方位角会造成一定程度的计算重合。故这里的方位角使用在水平面上的 X 轴和 Y 轴与磁北的夹角来代替。之所以水平放置时才有效是因为使用指南针测量磁北方向的时候，物体必须水平放置，否则测量角度不准确。

另一方面，计算形式上也会随着当前定标板的摆放位置不同而有所变化。如果定标板垂直放置在空间中，那么 Y 轴变为了垂直方向，计算下倾角就是用 Y 轴，而不是上面提到的 Z 轴。所以我们在设定标板下倾角和方位角标准值的时候，使用了下面配置格式的配置信息来对计算方式进行描述：

- 1) X N 90 // X 轴与北方向夹角 90 度
- 2) Y G 0 // Y 轴与重力方向夹角 0 度
- 3) Z N 180 // Z 轴与北方法夹角 180 度

其中，X，Y，Z 表示计算使用的是哪一个轴计算夹角，N 表示磁北，G 表示重力方向，第三列数值表示夹角数值（物理测量得到）。这样就可根据不同的定标板位置，给出不同的计算标准值方式，并由此列出不同的计算方程。

优化计算的目的是要最小化估算值和真实值的距离。据此，根据上文的描述，首先推导了计算估算值的公式：

$$\begin{aligned}
{}_{world}^{calibration} R^{ij} &= {}_{camera}^{calibration} R^{ij} \cdot {}_{sensor}^{camera} R^{ij} \cdot {}_{world}^{sensor} R^{ij} \\
X_{world}^{ij} &= {}_{world}^{calibration} R \cdot X_{calibration}^{ij} \\
Y_{world}^{ij} &= {}_{world}^{calibration} R \cdot Y_{calibration}^{ij} \\
Z_{world}^{ij} &= {}_{world}^{calibration} R \cdot Z_{calibration}^{ij} \\
\hat{D}_g^{ij} &= 90 - \text{gra}(Z_{world}^{ij}) \\
\hat{X}_n^{ij} &= \text{nor}(X_{world}^{ij}) \\
\hat{Y}_n^{ij} &= \text{nor}(Y_{world}^{ij})
\end{aligned} \tag{5.12}$$

其中， X_{world}^{ij} ， Y_{world}^{ij} ， Z_{world}^{ij} 分别表示在第 i 次定标板拍摄位置下，第 j 次采集照片时刻计算得到定标板 X, Y, Z 轴在世界坐标下的 3D 向量表示。 \hat{D}_g^{ij} 表示当前定标板下倾角估算值， \hat{X}_n^{ij} 表示 X 轴与磁北的夹角估算值， \hat{Y}_n^{ij} 表示了 Y 轴与磁北的夹角估算值，即为方位角数值。公式(5.12)涉及到了两个计算夹角函数： gra 和 nor 分别用来计算向量和重力方向的夹角，以及计算将向量投影到水平面上和磁北方向夹角的函数，具体可以参考下文计算函数定义一节 5.4.6 的描述。

5.4.4 建立优化方程

由此，可建立如下的优化方程：目标是使得在不同定标板拍摄位置 and 不同拍摄角度情况下，计算得到的三个夹角数值和真实测量数值的加权均方误差最小：

$$\min \left(\frac{\sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n w_1 (\hat{D}_g^{ij} - D_g^i)^2 + w_2 (\hat{X}_n^{ij} - X_n^i)^2 + w_3 (\hat{Y}_n^{ij} - Y_n^i)^2 \right)}{nm} \right) \tag{5.13}$$

其中， D_g^i 表示第 i 次拍摄位置定标板的下倾角测量数值， X_n^i 表示第 i 次拍摄位置定标板 X 轴与磁北夹角测量数值， Y_n^i 表示第 i 次拍摄位置 Y 轴与磁北夹角测量数值。 w 表示了三个衡量标准的权值系数。 n 表示定标板放置位置的数目， m 表示相机拍照照片的次数。

另外一点需要说明的是，在优化计算的过程中，上述方程和实际计算的公式有略微差异。因为在定标板水平放置的时候，可以使用公式(5.13)进行计算。但当定标板垂直放置时候，定标板 Y 轴变为了垂直方向，而 X, Z 轴变为了水平方向，所以此时计算公式变为了：

$$\min(\frac{\sum_j^m (\sum_i^n w_1 (\hat{D}_g^{ij} - D_g^i)^2 + w_2 (\hat{X}_n^{ij} - X_n^i)^2 + w_3 (\hat{Z}_n^{ij} - Z_n^i)^2))}{nm}) \quad \text{公式(5.14)}$$

不同地方在于：计算重力方向夹角使用 Y 轴，而计算磁北方向夹角时候使用 X 和 Z 轴。计算公式会根据采集时刻定标板的位置而有所变化。

5.4.5 优化方程求解

上文提及的优化问题是一个非线性优化，这里使用 Levenberg-Marquardt 算法对问题进行求解。Levenberg-Marquardt 算法（简称 LM）是使用最广泛的非线性最小二乘算法，中文为列文伯格-马夸尔特法。它是利用梯度求最大（小）值的算法，形象的说，属于“爬山”法的一种。它同时具有梯度法和牛顿法的优点。当 λ 很小时，步长等于牛顿法步长，当 λ 很大时，步长约等于梯度下降法的步长。根据求导数的方法，可分为两大类。第一类，若 ${}_{\text{sensor}}^{\text{camera}}\hat{R}$ 具有解析函数形式，知道 x 后求导数速度快。第二类，使用数值差分来求导数。根据使用模型不同，分为非约束最优化、约束最优化、最小二乘最优化^[33]。

LM 算法的实现并不算难，它的关键是用模型函数对待估参数向量在其领域内做线性近似，忽略掉二阶以上的导数项，从而转化为线性最小二乘问题，其具有收敛速度快等优点。LM 算法属于一种“信赖域法”，所谓的信赖域法，即是在最优化算法中，都要求一个函数的极小值，每一步迭代中，都要求目标函数值是下降的，而信赖域法，顾名思义，就是从初始点开始，先假设一个可以信赖的最大位移 s ，然后在以当前点为中心，以 s 为半径的区域内，通过寻找目标函数的一个近似函数（二次的）的最优点，来求解得到真正的位移。在得到了位移之后，再计算目标函数值，如果其使目标函数值的下降满足了一定条件，那么就说明这个位移是可靠的，则继续按此规则迭代计算下去；如果其不能使目标函数值的下降满足一定的条件，则应减小信赖域的范围，再重新求解。

代码实现上，我们使用了 levmar 计算库，该计算库使用 C/C++ 高效地实现了 LM 算法，且 levmar 也具有比较好的特性：比如其支持单精度和双精度数据的计算，支持分析和有限差分的雅可比矩阵计算，也支持一些约束非线性最小二乘，

比如使用线性约束和 box 约束，可以说功能上非常的强大^[34]。

具体而言，计算过程中涉及到如下几个参数：

- 1) 待求解参数：这里我们的求解参数是一个旋转矩阵 R ，使用 Rodrigues 变换将矩阵变换为一个三元组^[35]，故这里的未知参数就是一组三元变量。
- 2) 带求解参数的初值是一个单位矩阵，对应于 Rodrigues 表现形式是三个变量都为 0。
- 3) 求解的是：在 $n*m$ 个拍照结果中计算得到的定标板的方位角和下倾角估算值和测量值的均方误差最小。

5.4.6 计算函数定义

这里定义一下优化方程中设计到的计算方位角下倾角的两个函数：

- 1) 向量与重力方向夹角。

向量 A 和向量 B 的夹角，可以表示为：

$$\begin{aligned} \text{angle}(\vec{A}, \vec{B}) &= \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{\|\vec{A}\| \|\vec{B}\|} \\ \text{gra}(\vec{A}) &= \text{angle}(\vec{A}, [0 \ 0 \ 1]^T) \end{aligned} \quad \text{公式(5.15)}$$

其中 gra 函数计算了向量与重力的夹角，重力使用向量 $[0 \ 0 \ 1]$ 表示（参考 2.1.1 世界坐标系的定义）。

- 2) 向量与磁北的夹角。

在世界坐标系下，磁北被定义为 $[0 \ 1 \ 0]$ （参考 2.1.1 世界坐标系的定义）。

所以为了计算一个向量与磁北夹角，先将向量的 Z 轴数值设为零，即投影到了 X-Y 平面上，然后再计算向量的夹角：

$$\begin{aligned} \text{angle}(\vec{A}, \vec{B}) &= \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{\|\vec{A}\| \|\vec{B}\|} \\ \vec{A}_z &= 0 \\ \text{nor}(\vec{A}) &= \text{angle}(\vec{A}, [0 \ 1 \ 0]^T) \end{aligned} \quad \text{公式(5.16)}$$

其中， nor 方法计算了向量与磁北的夹角。

5.5 测试

本小节主要对上文提及的标定算法进行测试。

5.5.1 测试用例

参考 5.4.1 和 5.4.2 描述的内容，我们将定标板放置在将定标板摆放在六个不同的空间位置下，每个位置下拍摄不同角度的 12 张照片，共计 72 张照片。

测试用例具体设计如下表 5.5：

表 5.5 联合标定优化计算测试用例

测试集名称	定标板位置	拍照照片方式	需要测量数值
down_20	定标板平面与地面夹角 20 度，即下倾角为 20 度	在定标板的左，中，右侧三个位置对着定标板的正面进行拍摄。每个位置拍摄三张照片。共计 12 张。	使用倾角仪器测量定标板平面下倾角
down_40	定标板平面与地面夹角 40 度，即下倾角为 40 度	在定标板的左，中，右侧三个位置对着定标板的正面进行拍摄。每个位置拍摄三张照片。共计 12 张。	使用倾角仪器测量定标板平面下倾角
down_60	定标板平面与地面夹角 60 度，即下倾角为 60 度	在定标板的左，中，右侧三个位置对着定标板的正面进行拍摄。每个位置拍摄三张照片。共计 12 张。	使用倾角仪器测量定标板平面下倾角

续表 5.5

hor_0_90	定标板平面水平放置, X 轴与磁北夹角 0 度, Y 轴与磁北夹角 90 度	正对着定标板平面拍照。在水平面上, 每隔 30 度拍摄一张照片, 共计 12 张。	使用倾角仪器测量定标板平面下倾角。使用指南针测量定标板 X 轴, Y 轴与磁北的夹角。
hor_60_150	定标板平面水平放置, X 轴与磁北夹角 60 度, Y 轴与磁北夹角 150 度	正对着定标板平面拍照。在水平面上, 每隔 30 度拍摄一张照片, 共计 12 张。	使用倾角仪器测量定标板平面下倾角。使用指南针测量定标板 X 轴, Y 轴与磁北的夹角。
hor_90_0	定标板平面水平放置, X 轴与磁北夹角 90 度, Y 轴与磁北夹角 0 度	正对着定标板平面拍照, 在水平面上, 每隔 30 度拍摄一张照片。共计 12 张。	使用倾角仪器测量定标板平面下倾角。使用指南针测量定标板 X 轴, Y 轴与磁北的夹角。

其中, 需要说明的是:

- 1) down_20, down_40, down_60 三个测试集合只测量下倾角, 因为定标板倾斜放置无法测量定标板轴向与磁北夹角。
- 2) hor_0_90, hor_60_150, hor_90_0 三个测试集合, 即测量下倾角, 也测量其 X, Y 轴向与磁北夹角, 因为该测试集合是将定标板固定在水平面上。

5.5.2 测试方法

将测试数据集合加入标定计算程序进行处理, 得到的定标板下倾角方位角估算角度和测量得到的真实角度进行比较。评价计算结果的好坏的方式是度量优化

后的角度结果和真实角度结果的平均绝对值误差，定义如下：

$$\text{error} = \left(\frac{\sum_j^m \left(\sum_i^n \left| \hat{D}_g^{ij} - D_g^i \right| + \left| \hat{X}_n^{ij} - X_n^i \right| + \left| \hat{Y}_n^{ij} - Y_n^i \right| \right) \right)}{nm} \quad \text{公式(5.17)}$$

其中， D_g^i 表示第 i 次拍摄位置定标板的下倾角测量数值， X_n^i 表示第 i 次拍摄位置定标板 X 轴与磁北夹角测量数值， Y_n^i 表示第 i 次拍摄位置 Y 轴与磁北夹角测量数值。 w 表示了三个衡量标准的权值系数。 n 表示定标板放置位置的数目， m 表示相机拍照的次数。

5.5.3 测试结果

使用基于加速度磁通数据计算朝向的算法作为朝向估算算法代入计算，结果见表 5.6：

表 5.6 联合标定优化结果 – 使用基于加速度，磁通数据估算朝向

朝向计算方法	平均均值误差（角度）		标定结果
使用离线归一化参数， 加速度，磁通传感器数据估算 朝向算法	下倾角	0.7906	[0.0086, -0.9975, 0.0693]
	方位角	4.5470	[-0.9998, -0.0077, 0.0121] [-0.0116, -0.0694, -0.997]
在线计算归一化参数， 加速度，磁通传感器数据估算 朝向算法	下倾角	0.7088	[-0.0017, -0.9993, 0.0360] [-0.9999, 0.0020, 0.0074]
	方位角	4.4082	[-0.0075, -0.0360, -0.9993]

从测试结果上看，使用在线计算归一化参数所得结果更好一些。两者角度上差距约为 0.1 度。

如果代入传感器融合计算朝向算法进行计算，需要枚举算法所需的两个配置参数 β 和 ζ 。其中 β 的取值范围为 $[0.0, 1.0]$ ，步进长度为 0.1。 ζ 取值范围为 $[0.0, 0.1]$ ，步进长度为 0.01。得到测试结果如下图 5.6 和图 5.7 所示：

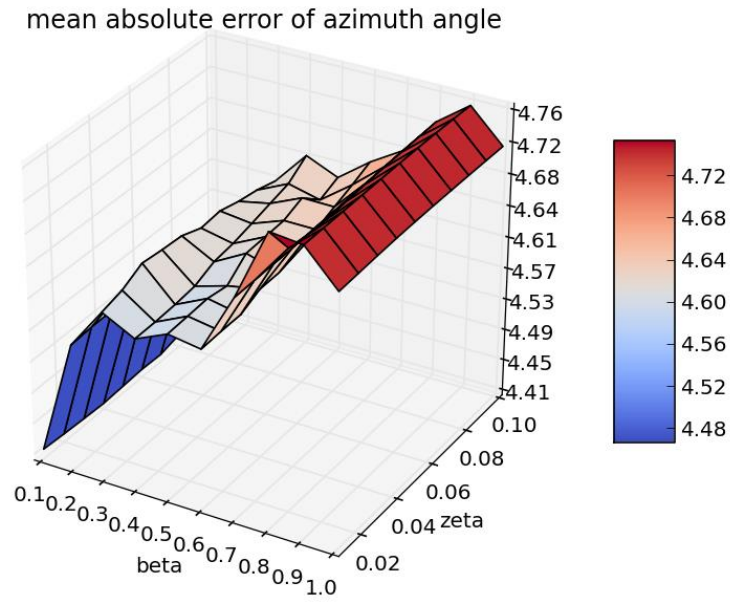


图 5.6 联合标定优化方位角结果 – 使用传感器融合算法估算朝向

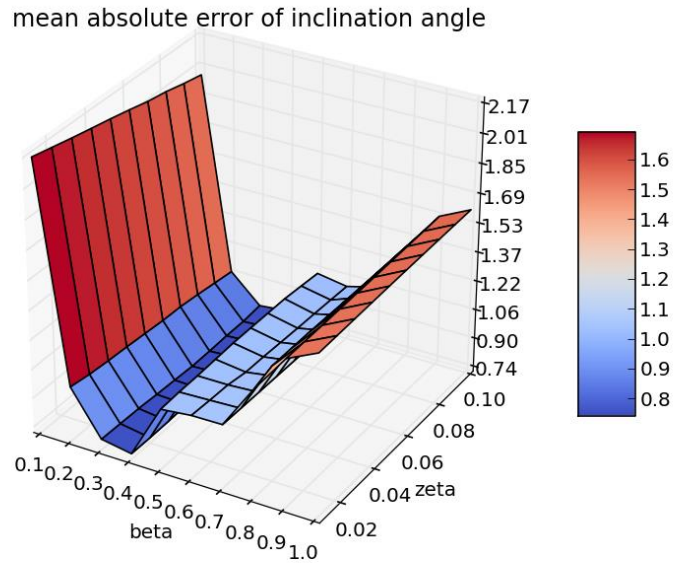


图 5.7 联合标定优化下倾角结果 – 使用传感器融合算法估算朝向

对比图 5.6 和图 5.7 结果可看到,不同参数配置对方位角计算结果影响不大,而对下倾角计算结果影响较大。同时考虑到下倾角测量得到的数据更加准确这一特性,我们使用最优化下倾角结果的配置参数作为最终计算参数,对应为 β 取0.4和 ζ 取0.02。此时可得结果如下表 5.7 所示:

表 5.7 联合标定优化结果 – 使用传感器融合算法估算朝向

朝向计算方法	平均均值误差（角度）		标定结果
	下倾角	方位角	
传感器融合算法	0.7397		[-0.0067, -0.9993, 0.0354]
		4.5897	[-0.9999, 0.0070, 0.0073]
			[-0.0076, -0.0354, -0.9993]

该结果和表 5.6 进行对比可看到：就目前测试数据集合而言，几种算法所得到的标定结果都很接近。相对而言，使用在线计算归一化参数方法进行传感器预处理，使用基于加速度和磁通传感器数据计算朝向算法的配置所得结果最好。

最后，我们从得的结果来看，相机和传感器坐标系之间存在一定的旋转

$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$ (和计算得到矩阵每个元素绝对值差值在 0.05 以内)，具体表示为：

- 1) 相机的 X 轴对应了传感器的 -Y 轴
- 2) 相机的 Y 轴对应了传感器的 -X 轴
- 3) 相机的 Z 轴对应了传感器的 -Z 轴

如果不进行优化计算而是直接代入该标准矩阵进行运算，所得结果如下表 5.8 所示：

表 5.8 联合标定优化结果 – 代入标准形态矩阵进行计算

朝向计算方法	平均均值误差（角度）	
在线计算归一化参数， 加速度，磁通传感器数据估算朝向算法	下倾角	3.17118
	方位角	4.49757
使用离线归一化参数， 加速度，磁通传感器数据估算朝向算法	下倾角	1.62501
	方位角	4.51373
使用传感器融合算法	下倾角	1.59755
	方位角	4.68932

对比表 5.6 和表 5.7 所得结果：针对当前测试集合而言，我们可以发现优化计算过程降低了计算误差，尤其下倾角的计算误差降低了一度左右。

5.6 本章小结

本章首先对离线标定传感器坐标系和相机坐标系旋转矩阵问题进行了定义，并在问题描述的基础上，详细的说明了具体的计算步骤和具体计算过程。然后重点就相机标定，优化计算数据采集，定标板平面姿态测量，优化计算，优化计算求解等模块内容进行了展开说明。在本章的最后，给出了标定计算的测试结果。

6 天线姿态计算

6.1 问题描述

通过联合标定，我们可得到拍照设备传感器和相机之间的姿态关系，进一步考虑，通过手机姿态算法可建立起来手机传感器在世界坐标系下的姿态位置，从而可得到拍照时刻照相机在世界空间中的姿态位置。

利用具有此特性的手机对天线设备进行拍照，并进行三维重建，可得到表示在世界坐标系下的三维天线点云。从另外一个角度考虑，我们使用高精度三维扫描设备对天线模型进行三维扫描，将得到的扫描结果放置在世界坐标系下。再利用点云匹配算法对重建点云和三维扫描设备得到的真实天线模型进行配准便可估算出当前天线的方位角和下倾角。在线计算天线姿态的流程参考图 3.3 的内容。

根据上面讨论，天线姿态计算问题可被描述为：

输入：

- 1) 在线实时采集得到的具有定标板和天线的照片数据。
- 2) 表示在局部坐标系下的天线三维扫描模型以及三维模型包围盒（用来找到天线平面板所在位置）。

输出：

- 1) 天线的方位角，下倾角。

下面将对图 3.3 中涉及到的主要模块进行展开说明。其中三维重建内容将参考^[6]提出的方法，点云配准将参考^[7]提出的方法，这里不做过多的讨论，而只是描述一下计算流程。本章主要介绍的内容是如何将两块点云模型进行配准操作，并根据配准操作结果推算出天线方位角和下倾角。

6.2 三维重建

6.2.1 概述

基于视觉的三维重建技术，即采用计算机视觉方法进行物体的三维模型重建，是指利用摄像机获取物体二维图像，综合运用图像处理、计算机视觉等技术获取物体的位置，形状等几何信息。其优势在于对硬件设备的依赖较少，具有非接触、无破坏等特性，以及高分辨率、高精度、数据获取速度快等优点。随着计算机视觉技术的不断发展，已被广泛应用于环境感知与视觉导航、目标识别与跟踪、三维测量与建模、虚拟现实与数字娱乐、医学图像重建与可视化等等诸多方面。

实验室在三维重建这个问题上已经有了一定的技术积累，尤其是张志鹏，董磊等师兄研制开发的脚型测量系统，已经可以将重建精度达到 mm 级别。本文所提及的方案中关于三维重建相关部分将参考张志鹏师兄硕士毕业论文中提出的重建算法^[6]。

6.2.2 算法流程

本方案中使用的一种基于光度计算的三维重建算法。算法采用非接触式双目立体视觉技术快速获得足部稠密点云，经过点云处理、表面重建等步骤自动重建出高质量的三维模型。其主要思想是对已定标的照相机拍摄图像，进行双目立体匹配；考虑光滑性约束、唯一性约束、有序性约束等条件提取视差，完成模型点云信息的重建。

该方法采用鲁棒的双目立体重建方法进行三维重建，从而获得含少量噪点的稠密点云。通过使用一种高效、高质量的点云处理流程，能够有效剔除离群点和剔除高频噪声。先用简单的立体匹配算法产生大量的匹配结果，然后用成熟的点云处理方法对匹配结果做后期处理，可以高效地重建出高质量结果。实验表明，通过精心设计，这个简单的方法可以产生高质量的重建，同时具有高度的扩展性和优越的运行性能。该方法基于鲁棒的双目立体匹配算法，加上自适应的点云处理和高效的、高质量的表面重建算法。整个流程分为图像采集，相机定标，极线校正，双目匹配，点云生成，点云处理和表面重建几个过程^[6]，详见图 6.1 所示。

图像采集：采集重建图像

相机定标：计算相机内外参数。

极线校正，为了加速图像对之间的像素匹配，先对图像进行极线校正变换，使得匹配的搜索范围从二维降到一维。

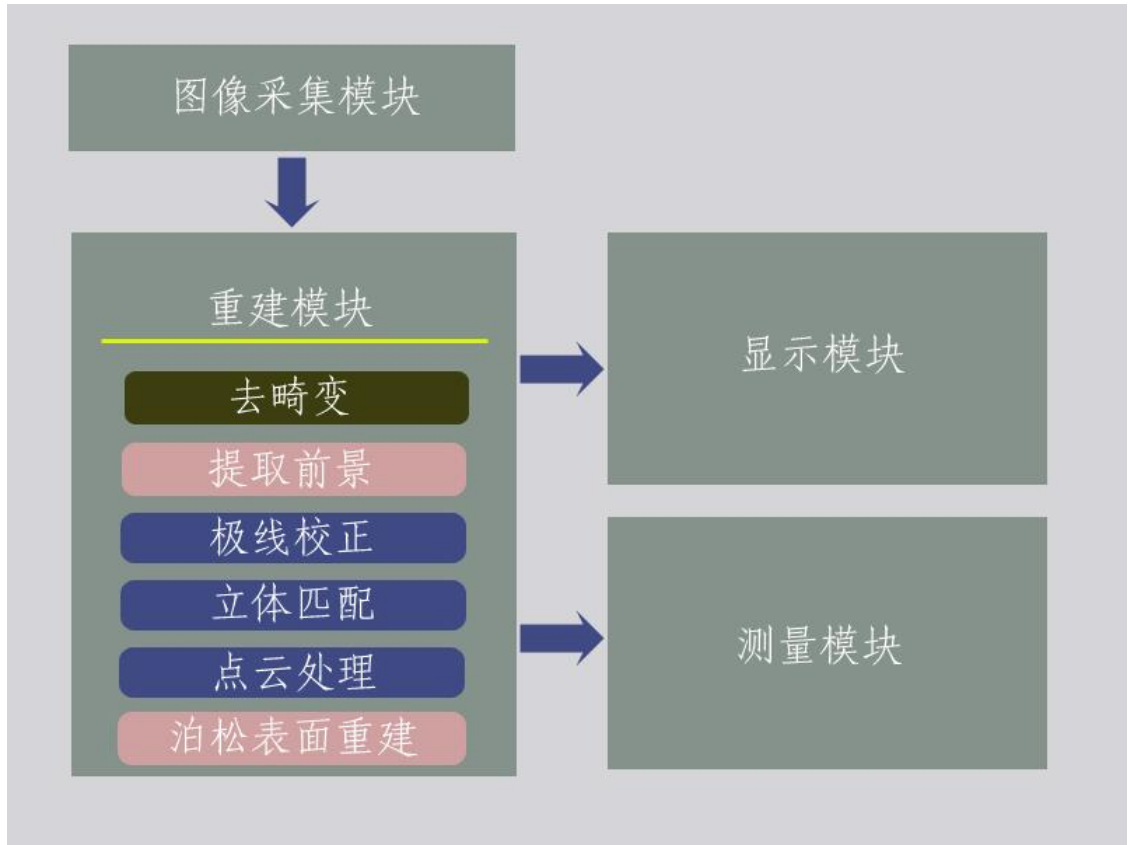
双目匹配，采用相对简单但有效的 WTA（winner-take-all）方法，而不是过多的关注立体匹配的可信度。通过保留置信度在[0.7,1]之间的匹配结果，并对匹配结果进行约束性检查和再匹配，确保了匹配的准确度。通过构建金字塔，用低分辨率的匹配结果指导高分辨率图像的匹配，加速匹配过程。考虑到 WTA（winner-take-all）算法的匹配过程的独立性，利用 GPU 的高速并行计算能力，对匹配过程加速。

点云生成，将双目立体匹配得到的视图差转换为空间的三维点云。

点云处理，将多视角重建算法的带有噪点的 3D 点云，经过对每个点与 k 个最近邻近点平均距离分析，点云精简，噪点剔除，补洞，平滑，法向估计和法向规整几个步骤，作为表面重建的输入。

表面重建，从处理过的点云数据中，采用泊松重建方法进行表面重建。

系统的总体处理流程如图 6.1：

图 6.1 三维重建算法流程^[6]

6.3 配准算法

6.3.1 刚性配准算法概述

上世纪 80 年代以来,许多学者对点集数据之间的配准问题进行了大量的研究,其中具有代表性的是 Horn^[36]和 Arun^[37]于 1987 年提出的四元数法,该方法后来通过实践证明是一个解决复杂配准问题的关键方法。1992 年,计算机视觉研究者 Besl 和 McKay 提出了刚性 ICP 算法^[38],是一种高层次的基于自由形态曲面的配准方法。Chen 和 Medioni^[39]也发布了一个相似的算法,只是其采用了考虑曲面法向向量的配对策略,这种形式仅适用于曲面上三维点集的配准问题。

ICP 点云配准算法是一个比较成熟的研究领域,实验室之前在该领域已有一定的技术积累,所以本文不对此做过多的推导和计算,而是概要说明一下 ICP 计

算的原理，同时参考孙荣西师兄毕业论文中的相关实现^[7]，给出 ICP 计算的流程说明。

6.3.2 算法流程

配准算法是基于四元数的点集到点集配准方法，主要用于解决基于自由形态曲面的配准问题，而且一般情况下此算法收敛速度很快，并对初值条件要求不高。

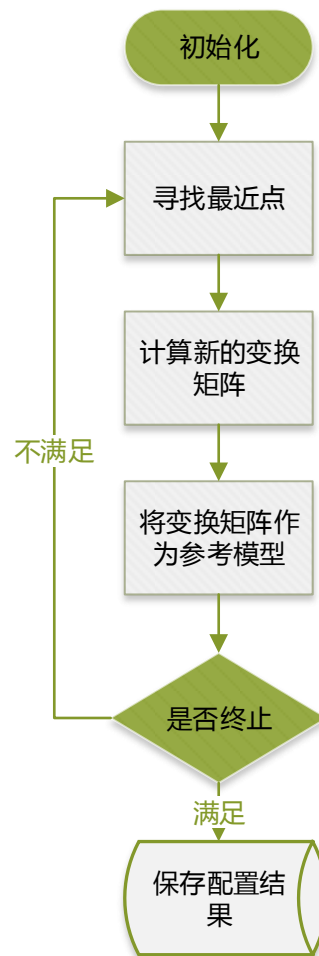
配准算法解决问题可以被描述为下面的模型：

假设，空间中有两个三维点集 P 和 X ，其中 P 有 N_p 个点， X 有 N_x 个点（ N_p 有可能不等于 N_x ），但他们可能处在不同坐标系下，本算法实现的就是将他们对齐到同一个坐标系下，即寻找两个点集的坐标变换矩阵。在此可以采用 SVD 法或单位四元数法，单位四元数法要优于 SVD 法，因此采用四元数法^[7]。

算法计算上是一个迭代优化的过程，计算步骤分为以下五步：

- 1) 初始化 $P^0 = P, R^0 = I, U^0 = 0, k = 0$
- 2) 对于 P^k 中的每一个点，计算 X 中对应的最近点，得到一个新的点集，记为 $Y^k = C(P^k, X)$ 。
- 3) 利用四元数法计算一个旋转矩阵 R^k 与平移向量 U^k ，使得 $R^k P^0 + U^k$ 与 Y^k 之间的均方差最小，具体过程在下文描述
- 4) 将 R^k 与 U^k 作用于 P^0 ，得到 $P^{k+1} = R^k P^0 + U^k$ ，并计算 P^{k+1} 与 X 的均方差 d^{k+1}
- 5) 当 $d^k - d^{k+1} < \tau$ 时（其中 τ 为所容许的误差），停止迭代，否则重复 2-5 的过程。

根据上文描述，ICP 算法计算流程如下图 6.2 所示：

图 6.2 ICP 配置算法计算流程图^[7]

6.4 扫描三维天线模型

扫描天线模型的结果主要参考了 CAPG 技术报告^[40]中的内容。这里将其中关于扫描操作方式，扫描结果的内容进行一定的说明。

扫描模型使用的是 Minolta Vivid 9i 三维激光扫描仪器^[41]，扫描操作过程如下：

- 1) 使用 Minolta Vivid 9i 三维扫描设备扫描天线平面板。
- 2) 对天线平面板的长宽高进行测量，使用游标卡尺（精度为 0.02mm）测量天线长和宽，使用卷尺（精度为 1mm）测量天线的高。其中对长度方向的测量一共测量了 6 次。

- 3) 使用 Polygon Editing Tool (Minolta Vivid 9i 扫描仪配套处理软件) 对扫描结果进行处理, 得到扫描之后的模型 OBJ 文件。
- 4) 对模型的长宽高数据进行测量, 与物理测量数值进行比较。

扫描得到天线模型如下图 6.3 所示 (在 Autodesk Maya 2013 x64 软件中的显示模型的效果):

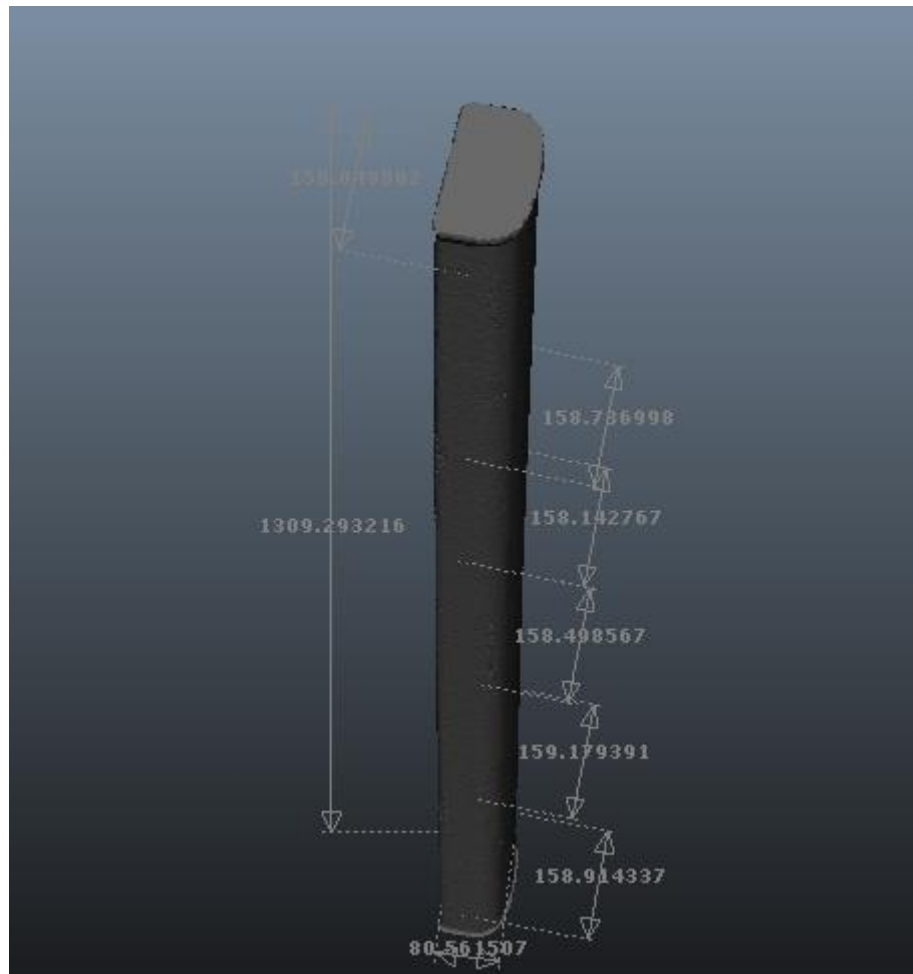


图 6.3 天线扫描模型结果

将模型测量得到的数据, 与真实数据进行比较, 结果如下表 6.1 所示:

表 6.1 天线扫描模型测量值与物理测量值对比

		模型测量值	物理测量值	偏差
高		1309.29 mm	1310.0 mm	-0.71
长	①	159.05 mm	159.24 mm	-0.19
	②	158.74 mm	158.70 mm	0.04
	③	158.14 mm	158.96 mm	-0.82
	④	158.50 mm	159.14 mm	-0.64
	⑤	159.18 mm	159.82 mm	-0.64
	⑥	158.91 mm	159.84 mm	-0.93
宽		80.56 mm	80.22 mm	0.34

从结果中可以看出，重建模型精度较高，误差小于 1mm。

6.5 天线姿态估算

参考图 3.3 的描述，正向计算天线姿态最重要的是对两块点云进行配准，进而计算得到天线方位角下倾角。为此，这里主要介绍两块内容，如何将天线扫描模型摆放到世界坐标系下，以及如何根据点云配准矩阵推导天线姿态角度。

扫描得到天线是表示在天线局部坐标系下的，为了将得到的结果和扫描得到的结果进行点云配准操作，首先需要将天线放置在一个标准位置，该标准位置其实就是我们定义的“世界坐标系”，之所以加引号是因为该定义和我们在 2.1.1 定义的世界坐标系并不是完全实际意义上的等价，而是一种逻辑意义上的等价。

首先，定义一下扫描模型所在的天线局部坐标系：

- 1) 三维扫描仪镜头位置为模型局部坐标系原点。
- 2) 镜头朝向被扫描物体，镜头朝向物体与物体垂直的方向为 z 轴的负方向
- 3) 三维扫描仪镜头向右为 x 轴正方向，垂直三维扫描仪镜头向上为 y 轴正方向。

另外，为了有效的描述天线平板所在的位置，我们手工标识出了天线模型的包围盒，该包围盒的 $ABFE$ 平面和天线平板的后侧平面平行， $ABCD$ 平面和天线平板的上侧平面平行。可以参考图 6.4 的说明。

有了包围盒数据，我们就可以定义摆放所对应的操作：

- 1) 将天线局部坐标系原点移动到天线包围盒中心点 O 上。所以执行的操作是将所有点坐标加上向量 $[-O_x \ -O_y \ -O_z]^T$ 。
- 2) 执行旋转操作，使得旋转后的天线平板正向法向和磁北对齐，即设置为世界坐标系的 Y 轴。将天线竖直放置，且天线平板竖直方向和 Z 轴对齐，根据右手定则，可得到 X 轴方向。所以再执行的操作就是乘上一个旋转矩阵，该矩阵为： $[\overrightarrow{AB} \ \overrightarrow{AD} \ \overrightarrow{EA}]^T$ （该旋转矩阵由新的坐标轴的基向量构成）。

具体可以参考下图 6.4 中关于天线摆放在世界坐标系下的说明：

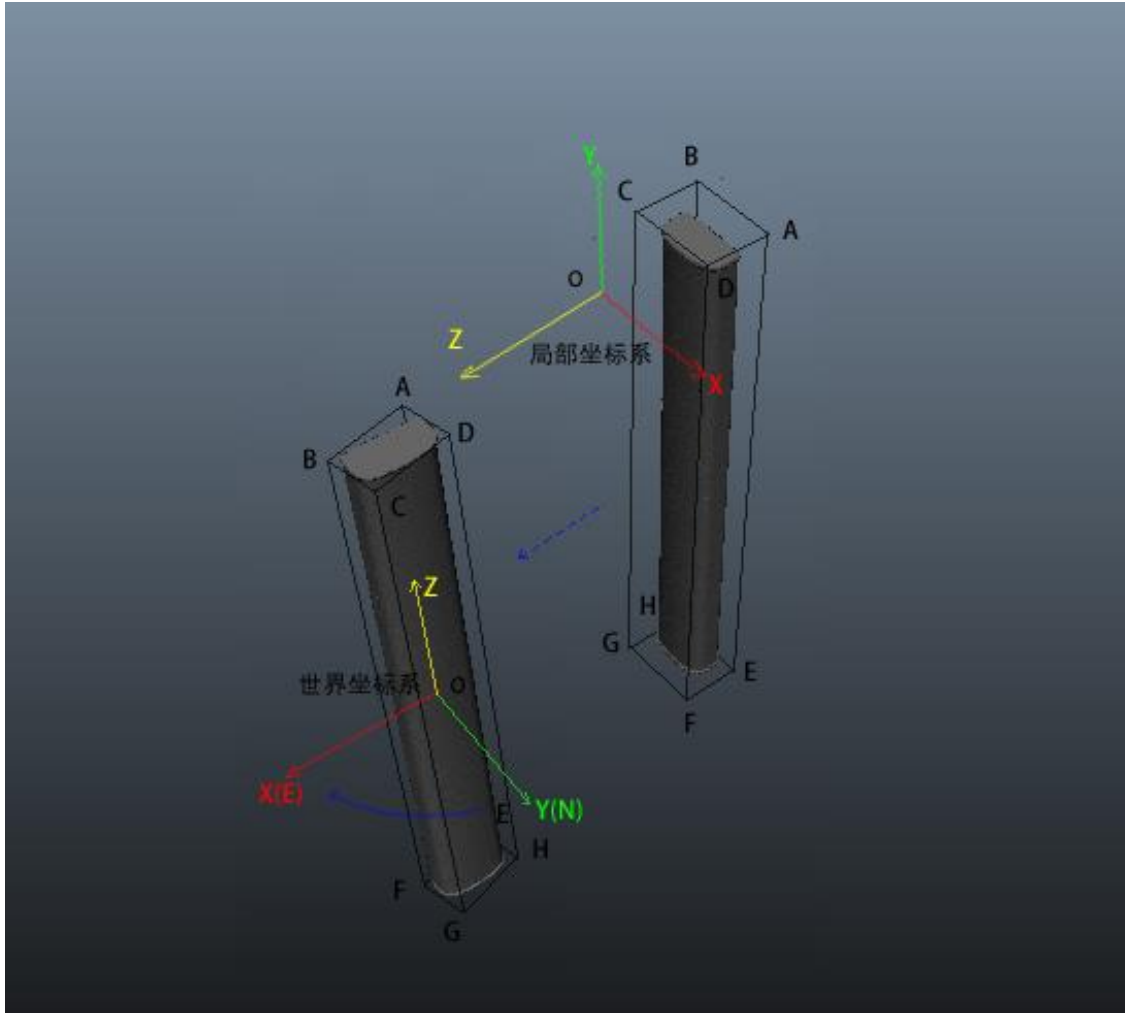


图 6.4 摆放天线模型说明

从另外一个角度考虑，重建得到的结果是表示定标板坐标系中的，所有首先要将其转换到世界坐标系中。这里假设表示在定标板坐标系下重建模型点记为 P_c ，表示在世界坐标系下重建模型点记为 P_w ，将定标板坐标系点转换到世界坐标系的旋转矩阵记为 ${}^c_w R$ （这种表示旋转量的方式参考了论文^[20]中的定义），则变换关系为：

$$P_w = {}^c_w R \cdot P_c \quad \text{公式(6.1)}$$

同时，假设天线扫描模型摆放在世界坐标系下的点表示 P_s ，那么点云配准的结果就是得到变换矩阵 ${}_s^w TR$ （表示先平移操作，将重建模型对应的包围盒中心点

对齐到世界坐标系原点后再执行旋转的操作), 且关系如下:

$$P_s = {}^w_s TR \cdot P_w \quad \text{公式(6.2)}$$

综合考虑公式(6.1)和公式(6.2), 可得公式:

$$P_s = {}^w_s TR \cdot {}^c_w R \cdot P_c \quad \text{公式(6.3)}$$

另一方面, 根据 ${}^w_s TR$ 可推导出当前天线平板的下倾角方位角。参考 2.2 中的定义, 只要知道重建天线模型的平板法向在世界坐标系中数值便可推出下倾角和方位角。同时, 根据上文关于天线标准摆放位置的定义, 标准位置下的天线扫描模型平板的法向, 即是世界坐标系的 Y 轴。据此, 下倾角方位角的计算可被表示为:

$$\begin{aligned} n_w &= ({}^w_s TR)^{-1} \cdot [0 \ 1 \ 0]^T \\ dire &= gra(n_w) \\ down &= nor(n_w) \end{aligned} \quad \text{公式(6.4)}$$

其中, n_w 表示在世界坐标系下表示的重建天线模型平板法向。 $dire$ 和 gra 函数用来计算方位角和下倾角 (参考上文 5.4.6 中的定义)。由此我们就可以正向计算得到当前天线平面的方位角和下倾角。

6.6 测试

本小节主要对上文提及的天线姿态估算算法进行测试。

6.6.1 测试用例

为了在实验室模拟真实的天线拍摄环境, 我们使用真实的天线数据进行测试, 具体拍摄要求如下:

- 1) 将天线固定在抱杆高处, 模拟真实拍摄环境。
- 2) 将定标板放置在固定平面上。
- 3) 使用采集程序在天线平板正面进行拍摄, 在不同的角度下拍摄 12 张照片数据和对应的 12 个传感器数据。

一共采集三组数据。每组数据对应不同的定标板位置, 但是天线的姿态是固

定的。这样子设计测试用例的目的是为了验证系统实现的正确性，如果三组得到结果比较相似，可以说明系统实现是正确的。

拍摄的场景照片可以参考下图 6.5 内容：

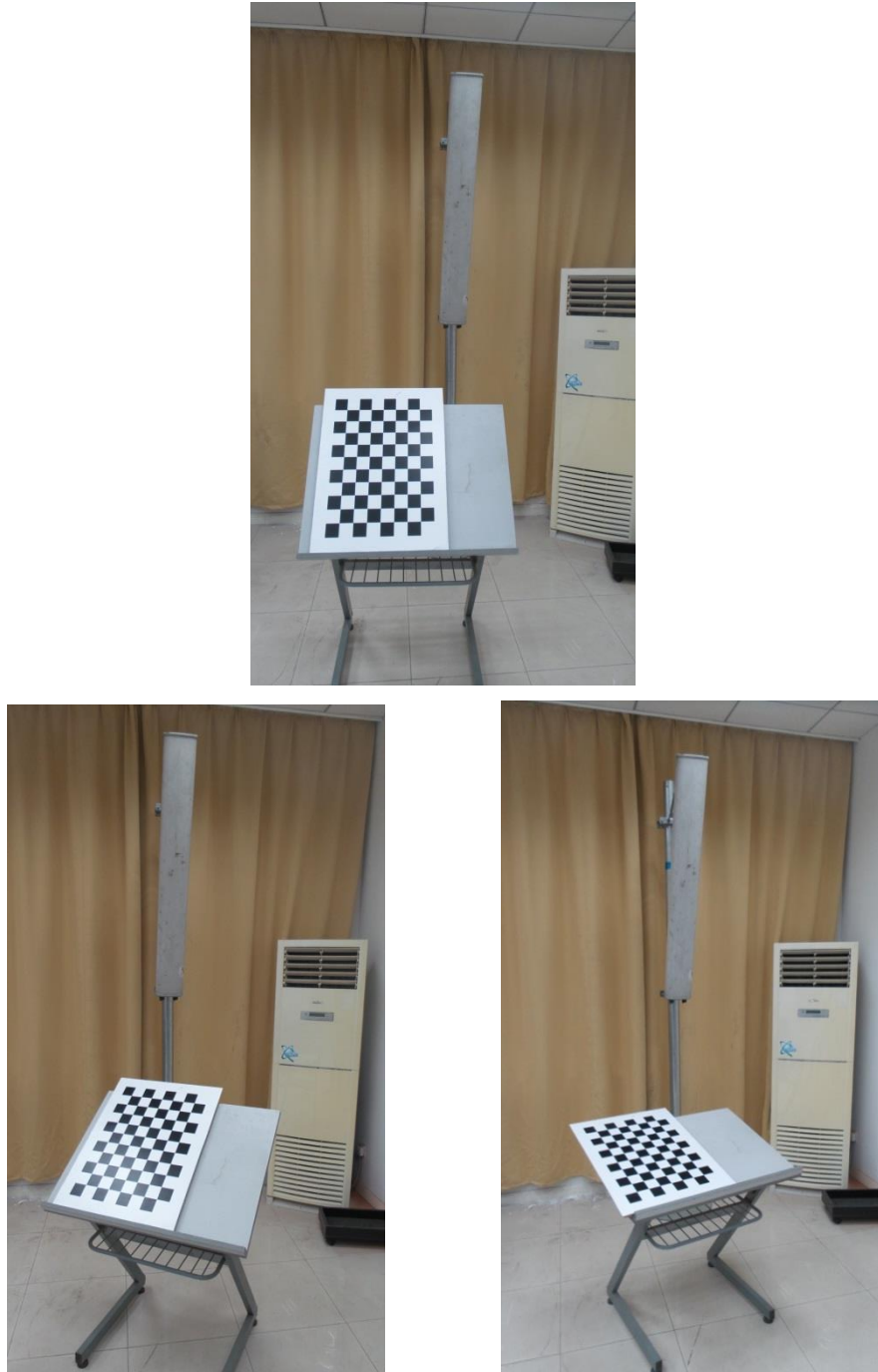


图 6.5 天线姿态算法测试采集场景

6.6.2 测试方法

天线姿态角度测试就是代入真实天线数据计算天线方位角下倾角，并和测量数值进行比较。具体操作可以参考下图 6.6 说明：

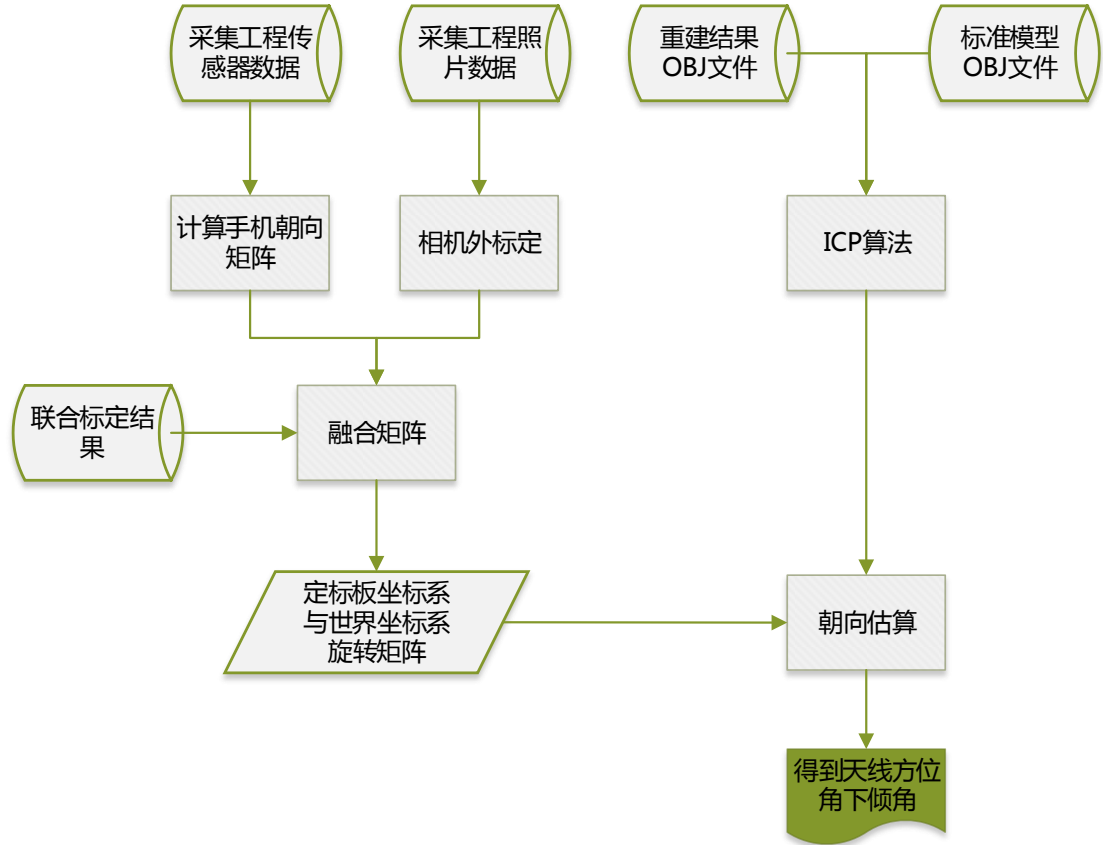


图 6.6 天线姿态估算测试步骤说明

测试计算步骤如下：

- 1) 读入采集工程数据，计算得到定标板坐标系和世界坐标系的旋转矩阵。
- 2) 读入重建好的 OBJ 文件和标准模型 OBJ 文件。
- 3) ICP 计算。
- 4) 根据 ICP 结果推算天线方位角下倾角。
- 5) 和真实值比较，统计两者误差。

6.6.3 测试结果

根据上文描述，将三组数据代入程序进行计算，将得到的下倾角和方位角计算数值与真实数值进行比较（使用物理测量方式计算得到）。所得结果见下表 6.2：

表 6.2 天线姿态估算测试结果

测试集名称	下倾角计算 值（度）	下倾角真实 值（度）	方位角计算 值（度）	方位角真实 值（度）
测试集合一	15.9715	16.5	32.5738	41
测试集合二	18.1581	16.5	43.1259	41
测试集合三	16.8375	16.5	40.0778	41

从结果上看，搭建的姿态计算系统可以有效的计算得到天线的姿态角，且计算结果相对比较稳定。从当前测试集合得到结果上看，下倾角的计算值和真实值比较接近，误差在 2 度以内。方位角误差较大一些，大概在 5 度左右。

从另外一方面考虑，将 ICP 结果代入原始数据，反向计算下面两个模型：

- 1) 表示在世界坐标系下的标准模型。需要说明的是，由于重建只计算得到天线的正面图像，所以标准模型为截取了天线正平面板的模型，而不是完整模型。
- 2) 表示在世界坐标系下的重建模型。

将三组数据得到的共 6 个模型代入 meshlab 中得到结果见下图 6.7（点云数据为重建结果，点云周围的网格为天线标准模型）：



图 6.7 姿态估算反向计算效果图

从图中可以看出，三组数据的下倾角数值比较接近，方位角数值略有偏差，这和表 6.2 所得结果相一致。

6.7 本章小结

本章首先介绍了天线姿态估算的总体流程，并对正向计算过程涉及到的现有技术包括三维重建技术，点云配准技术等进行了介绍。然后重点介绍了如何根据点云配准结果计算天线方位角下倾角的计算方法，并在本章最后对天线姿态估算系统进行了测试，给出了测试结果。

7 天线姿态估算系统设计与实现

7.1 系统需求分析

根据上文描述，提出了一套新颖的非接触式测量天线姿态的完整解决方案。该方案中三维重建和点云配准模块将使用实验室已有成熟系统^[7,6]进行计算。剩下的模块就是本文需要设计与实现的内容，从需求上而言有下面几块内容：

- 1) Android 平台上实现一个基于接触式的测量方位角下倾角的 Downtilt 软件，该软件主要用来快速估算天线方位角下倾角的大概数值。
- 2) Android 平台上实现一个数据采集程序。该采集程序可以在拍照的同时，记录当前 android 手机的传感器数据，同时可对采集得到数据提供工程化的管理方案。
- 3) PC 端实现一份完整的标定相机坐标系和传感器坐标系旋转矩阵的标定程序。该程序可以导入采集程序的工程，计算拍照时刻手机姿态，对照片进行标定计算，最后优化计算出标定的结果。

7.2 downtilt 辅助测量软件设计与实现

android 平台上已有的一款叫做 antenna downtilt 的应用，可用来测量天线信号覆盖范围的软件。打开软件，将手机背面对着天线的后面，等待数秒并直到读数停止变动，这样就可以得到有关方位角和下倾角的数据^[42]。

本文以这样一款已有的应用做为原型，设计并实现了一款类似功能的应用程序。该程序通过在 android 平台上实现朝向估算算法（4.4 小节），可估算出静止状态下手机接触到的天线平面方位角和下倾角。该程序的设计目的是通过一种快速的方式得到天线方位角下倾角的近似数值（在实验室环境下测量，外场的测量不使用，因为外场磁场干扰较强烈，直接接触方式计算得到的传感器数据会有很大误差），该数值可以用来对基于非接触式方法计算得到的数值进行验证。

根据上述描述，该软件的功能设计如下：

- 1) 接触式测量方位角下倾角数值。
- 2) 计算出手机在空间中静止状态下的 yaw-pitch-roll 角度。

7.2.1 开发环境

软件的开发环境如下：

- 1) 开发 IDE: Eclipse , ADT 版本号 v21.1.0-569685
- 2) 运行系统: Android 4.2 及以上版本
- 3) 测试用手机: Samsung C101

7.2.2 运行结果

程序运行结果如下图 7.1 所示：其中，左图是将手机贴在一块垂直放置，且正对着近似磁北方向的平板上得到的结果，右图是将手机靠在一块倾斜 45 度放置，且正对着东方向的平板上得到的结果。



图 7.1 downtilt 程序运行截图

7.3 采集程序设计与实现

7.3.1 需求分析

天线姿态估算计算方案中，需要使用安装有惯性传感器（必须具有加速度传感器和磁通传感器，可以配置有陀螺仪传感器）和照相机的智能手机做为采集载体。下面就重点说明了一种基于 android 平台开发的采集程序的设计思想方案。该采集程序可以在拍照的同时，记录当前 android 手机的传感器数据以便用来计算当前拍照时刻手机在空间中的旋转信息。

根据问题的描述，定义了该程序主要需要提供的几个主要功能：

- 1) 提供采集图像和同时采集传感器数据的功能。
- 2) 提供了工程化的管理方式。每一个采集任务对应的所有数据都保存在工程目录中，相应的任务信息由一个统一的工程配置文件进行管理。
- 3) 提供智能采集功能。为了得到手机相对稳定状态下的图像数据，提供智能拍照功能，自动推算手机稳定状态，并采集图像数据。
- 4) 提供数据与 PC 之间的交互传输功能。

7.3.2 模块定义

根据上面的功能定义，设计了下面几个主要的模块：

- 1) 工程模块：对工程文件格式进行定义，并提供对工程文件进行保存，读取等基本操作功能
- 2) 存储模块：定了存储图像的格式，存储传感器数据格式
- 3) 采集模块：定义两种不同采集模式的具体形式，即定时采集模式和智能采集模式。提供采集照片和传感器数据的功能。
- 4) 传输模块：提供将数据文件与 PC 进行传输的功能。
- 5) 预览模块：提供了对工程文件进行浏览，访问的模块。

几个模块之间数据流关系如下图 7.2 所示：

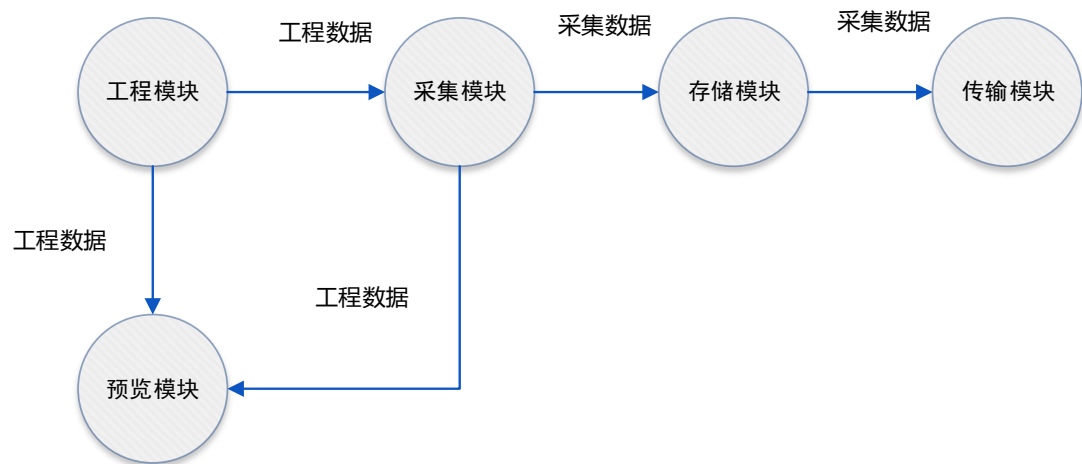


图 7.2 数据采集模块设计

采集程序以工程作为采集总体单元，每一次的采集都对应到一个具体工程中的子采集模块（使用文件夹的方式管理子采集）。同时，为了实现采集照片和采集数据同时运行的要求，使用两个采集线程对数据进行同时收集。

根据上文的需求分析，设计了下面的采集程序交互使用流程，见下图 7.3：

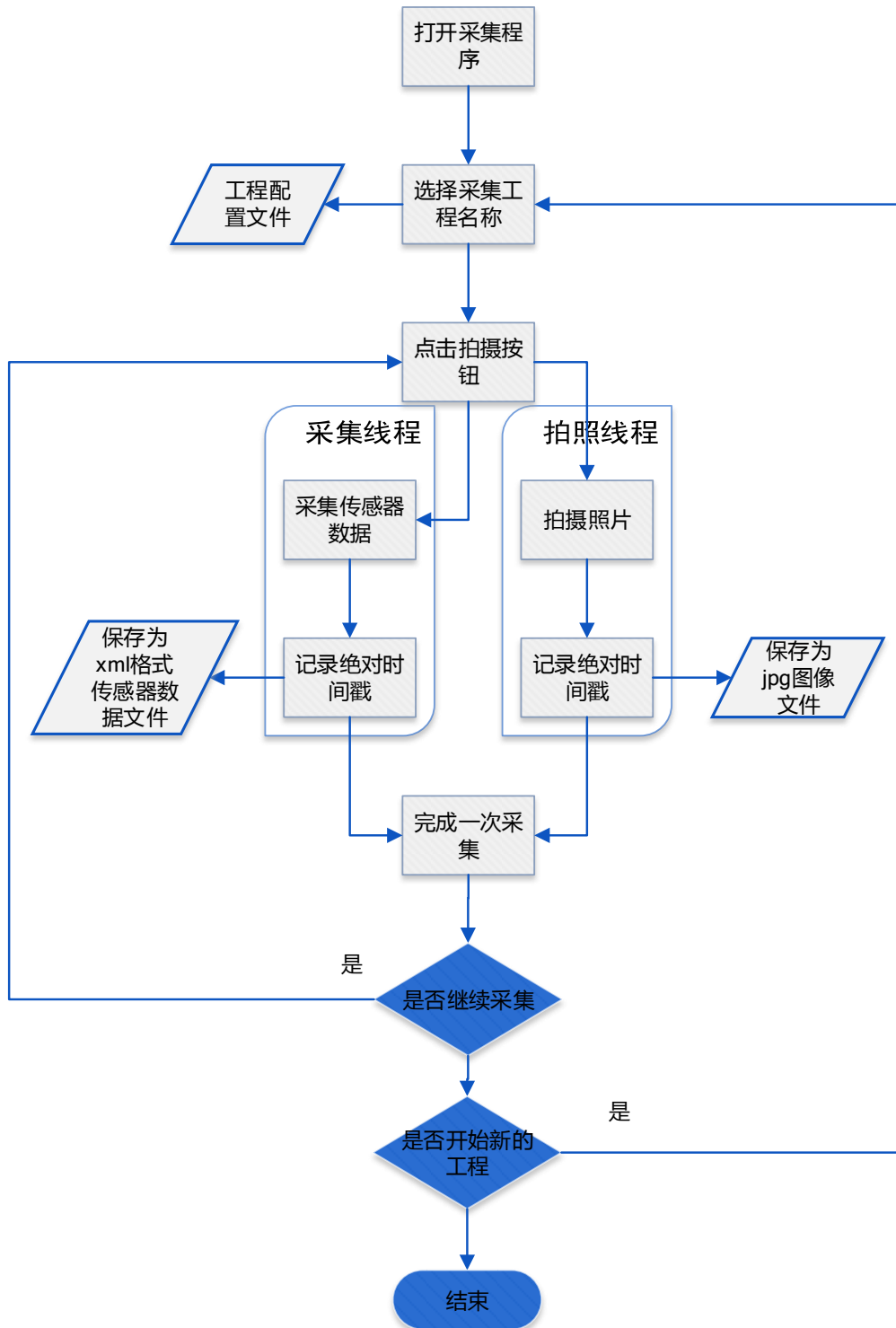


图 7.3 采集程序计算流程

7.3.3 开发环境

软件的开发环境如下：

- 1) 开发 IDE: Eclipse , ADT 版本号 v21.1.0-569685
- 2) 运行系统: Android 4.2 及以上版本
- 3) 测试用手机: Samsung C101

7.3.4 运行结果

图 7.4 显示了程序的操作界面：

- 1) 缩放：对摄像头执行缩放操作。
- 2) 工程文件名：工程文件名称，用来区别不同工程文件的名称。
- 3) 描述：对工程文件具体采集内容的描述。
- 4) 拍摄：点击拍摄按钮之后，可以采集当前的传感器数据和照片数据，并将对应时间写入到采集工程 xml 文件中。



图 7.4 采集程序运行截图

点击拍摄按钮之后，会拍摄一张照片，同时记录拍照时刻前后共 3s 时间内的传感器数据。拍摄好的数据会保存在当前设定的工程名为文件夹名的工程中。下图为拍摄了三张照片之后的目录截图，见图 7.5：

名称	大小	类型
collection-proj.xml	1.13K	XML File
pic_0.jpg	842.11K	JPEG image
pic_1.jpg	895.76K	JPEG image
pic_2.jpg	853.87K	JPEG image
sensor_0.xml	64.65K	XML File
sensor_1.xml	66.12K	XML File
sensor_2.xml	68.10K	XML File

图 7.5 采集程序采集结果截图

其中，collection-proj.xml 文件使用 xml 文件格式定义了工程的描述信息，包括重建时间，工程名称，工程描述，对应照片数据，采集时刻对应的时间戳信息等（采集时间表示了当前采集时刻点相对 epoch January 1, 1970 的 UTC 秒数^[43]。

工程文件的内容见下面图 7.6 示例（部分内容截图）：

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<collection-seq>
  <collection-proj-name>采集测试</collection-proj-name>
  <collections>
    <collection>
      <sensor-name>sensor_0.xml</sensor-name>
      <pics>
        <pic>
          <name>pic_0.jpg</name>
          <timestamp>1.3888352846061332E9</timestamp>
        </pic>
      </pics>
      <pic-count>1</pic-count>
    </collection>
  </collections>
</collection-seq>
```

图 7.6 采集程序工程文件示例

另外，在采集照片的同时，采集了当前传感器数据。该数据主要记录当前手机上三轴加速度，三轴磁通，三轴陀螺仪传感器的具体数值。为了有效的管理传感器数值，使用结构化的 xml 文件格式描述信息，主要在其中定义了下面三个类

别：

- 1) 使用 `session` 表示一个具体采集数据。
- 2) 使用 `channel` 表示具体采集通道：加速度，磁通，陀螺仪。
- 3) 使用 `frame` 表示具体的一帧采集，包括三轴的数据内容，以及对应时间戳

传感器数据保存内容见下图 7.7 示例（部分内容截图）：

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<session>
  <threads>
    <thread>
      <channels>
        <channel>
          <name>a</name>
          <frames>
            <frame>
              <value>
                <w>0.0</w>
                <x>-0.56802434</x>
                <y>8.020576</y>
                <z>5.843648</z>
              </value>
              <index>0</index>
              <time>1.3888352841142452E9</time>
            </frame>
            <frame>
              <value>
                <w>0.0</w>
                <x>-0.27114335</x>
                <y>8.06008</y>
                <z>5.9064956</z>
              </value>
              <index>1</index>
              <time>1.3888352841583843E9</time>
            </frame>
          </frames>
        </channel>
      </channels>
    </thread>
  </threads>
</session>
```

图 7.7 采集程序传感器数据文件示例

另外，采集好的工程文件将会被压缩成一个 `zip` 格式数据包。该数据包可以通过 `Wi-Fi` 网络传送到服务器上，在服务端将会对数据包进行解压缩处理，并使用相应的程序对工程数据进行解析，以便进行后期的标定计算工作。

7.4 传感器，相机坐标系旋转矩阵标定

7.4.1 需求分析

参考上文第 4 章节的描述，联合标定的任务就是通过估算手机姿态，相机标定，联合优化等计算模块估算出手机传感器坐标系和相机坐标系之间的旋转矩阵。

为此，该模块的总体输入输出可以描述为：

- 1) 输入：不同定标板拍摄位置下拍摄得到的采集工程数据，以及对应定标板方位角下倾角标准数值（参考测试一节 5.5.1 对采集数据方式的说明）。
- 2) 输出：计算出采集手机传感器坐标系和相机坐标系之间旋转矩阵 R

7.4.2 模块定义

联合标定主要涉及到下面几个模块：

- 1) 解析模块：解析采集程序得到的工程文件
- 2) 手机姿态估算模块：解析采集工程中的传感器数据文件，计算出采集时刻照相机在世界空间中的朝向。
- 3) 相机定标模块：利用采集得到的定标板照片进行相机内外参数标定
- 4) 优化计算：建立优化方程，计算出联合标定参数。

模块之间的相互关系参考图 3.2 中的说明。模块之间传递的数据使用标准的格式进行传输，比如上文 7.3.4 中提到的保存传感器数据的 xml 文件格式。相机内外参数标定结果参考 opencv 对矩阵存储所使用的 yaml 文件格式^[44]。据此，联合标定模块总体数据流图设计如下图 7.8 所示：

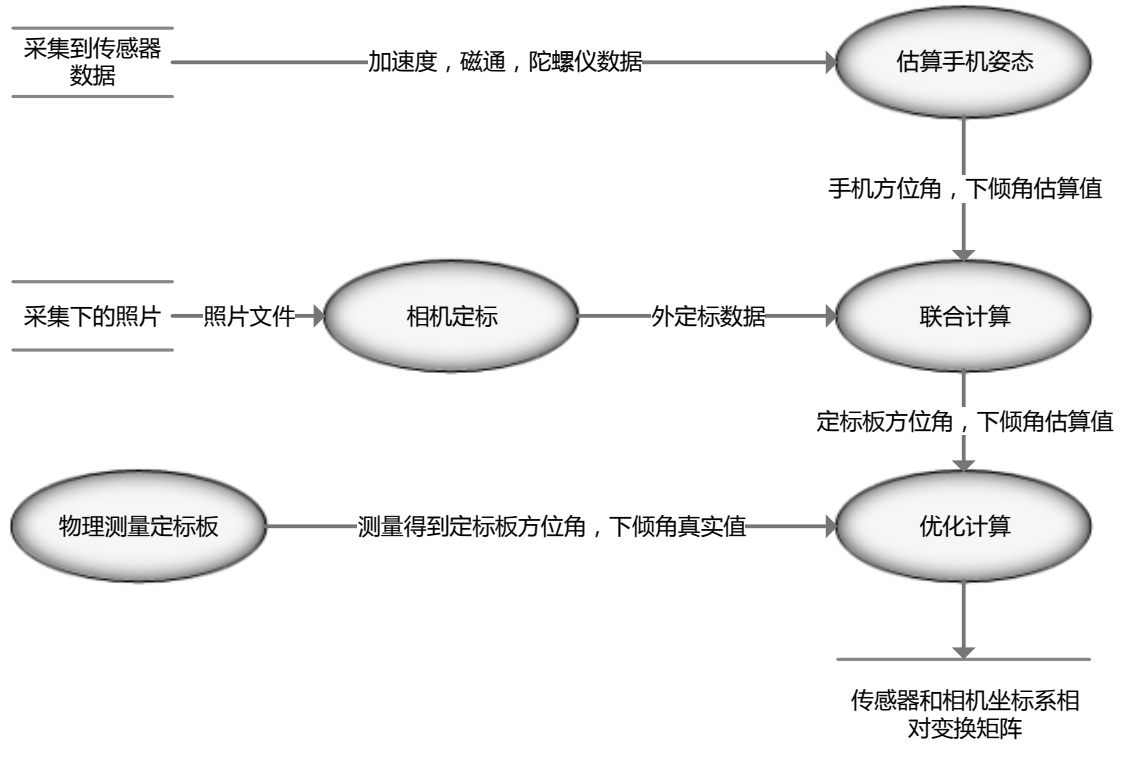


图 7.8 联合标定数据流程图

7.4.3 开发环境

程序实现的开发环境：

- 1) 拍照设备：Samsung C101（GALAXY S4 Zoom）
- 2) 采集程序：CameraVideo（Android 上运行）
- 3) 测试运行程序：unite_calibration（PC 上运行）
- 4) 运行平台：window8 64bit
- 5) 测量设备：型号为 EYESKEY EK-1001 的指南针和型号为 Tajima SLT-100 的水平仪。
- 6) 实现语言：C++

由于联合标定模块本身是做一些核心逻辑计算，所以实现上并没有使用 GUI 相关内容。运行上采用 xml 文件格式定义的配置数据作为运行参数，以便于使用不同的参数运行测试结果。主要依赖的第三方开发库有：

1) Boost 1.53.0

主要使用子库为: `property_tree`, `filesystem`, `unit_test_framework`。

2) OpenCV 2.4.6

主要使用子库为: `core`, `highgui`, `imgproc`, `calib3d`。

3) Armadillo 3.900.7

矩阵运算库

4) Ogre 1.8.1

没有直接使用 Ogre, 而是移植了 Ogre 中关于欧拉角, 四元数计算相关的代码到本系统中。

5) Levmar 2.6

Levenberg-Marquardt 算法 C++实现

7.4.4 运行结果

程序使用 xml 格式配置文件形式作为程序的运行参数, 一个配置程序样例如下图 7.9 所示:

```

<?xml version="1.0"?>
<opencv_storage>
<Settings>
  <!-- 工程所在目录列表 -->
  <ProjList>
    down_20 down_40 down_60 hor_0_90 hor_60_150 hor_90_0
  </ProjList>
  <!-- 联合标定结果输出文件名称 -->
  <Unit_Calibration_Output_File_Name>unit_params.yaml</Unit_Calibration_Output_File_Name>
  <!-- 该文件记录了定标板三轴与磁北，重力夹角的测量值 -->
  <DegreeFile>degree.txt</DegreeFile>
  <!-- 计算朝向算法 1) YAW_PITCH_ROLL 2) SENSOR_FUSION -->
  <CalRotationType>"SENSOR_FUSION"</CalRotationType>
  <!-- SENSOR_FUSION算法计算参数配置 -->
  <Beta>0.4</Beta>
  <Zeta>0.02</Zeta>
  <!-- 使用YAW_PITCH_ROLL方法计算朝向时候，是否使用离线normalization参数 -->
  <UsingNormalization>0</UsingNormalization>
  <!-- 是否已经存在计算好离线normalization参数文件 -->
  <Has_Normalization_Result>1</Has_Normalization_Result>
  <!-- 离线normalization参数所在文件 -->
  <Normalization_File_Name>normalization_result.txt</Normalization_File_Name>
  <!-- 是否将计算好角点之后的图像输出到output中 -->
  <Write_Calibrated_Image>1</Write_Calibrated_Image>
  <!-- 定标板的大小 -->
  <BoardSize_Width>7</BoardSize_Width>
  <BoardSize_Height>10</BoardSize_Height>
  <!-- 定标板单元格的长度，单位为mm -->
  <Square_Size>50</Square_Size>
  <!-- 定标板类型：CHESSBOARD：棋盘格 CIRCLES_GRID：圆盘格子 ASYMMETRIC_CIRCLES_GRID：不对称圆盘格子-->
  <Calibrate_Pattern>"CHESSBOARD"</Calibrate_Pattern>
  <!-- 是否使用现有的内参数数据 -->
  <HasIntrinsicParam>0</HasIntrinsicParam>
  <!-- 如果使用现有的内参数数据，内参数数据文件名称 -->
  <IntrinsicFileName>intrinsic.yaml</IntrinsicFileName>
  <!-- 是否反转图像数据 -->
  <Input_FlipAroundHorizontalAxis>0</Input_FlipAroundHorizontalAxis>
  <!-- 如果为1，fx/fy的比例是个常数 -->
  <Calibrate_FixAspectRatio>1</Calibrate_FixAspectRatio>
  <!-- 是否不考虑正切系数 -->
  <Calibrate_AssumeZeroTangentialDistortion>1</Calibrate_AssumeZeroTangentialDistortion>
  <!-- 计算过程中，主点是否不改变 -->
  <Calibrate_FixPrincipalPointAtTheCenter>1</Calibrate_FixPrincipalPointAtTheCenter>
</Settings>
</opencv_storage>

```

图 7.9 联合标定程序配置样例

上图的配置程序表示使用 down_20, down_40 等采集工程数据进行标定计算，使用 YAW_PITCH_ROLL 算法进行朝向算法计算（参考 4.4 描述），也可以使用 SENSOR_FUSION 算法（参考 4.5 描述）等等。另外的参数配置信息可以参考上图参数的描述内容。

上图配置参数总共使用了 6 个工程，共计 72 张照片数据进行标定计算，得到的结果如下图 7.10 的 yaml 格式所示：

```

%YAML:1.0
unit_calibration_result: !!opencv-matrix
  rows: 3
  cols: 3
  dt: d
  data: [ 3.5554499175740606e-002, -9.9909081882694439e-001,
          2.3524738554718809e-002, -9.9931420525500492e-001,
          -3.5299097046149086e-002, 1.1184494771078354e-002,
          -1.0343924009774047e-002, -2.3906264522759981e-002,
          -9.9966068931045193e-001 ]
rodrigues_result: !!opencv-matrix
  rows: 3
  cols: 1
  dt: d
  data: [ -2.2428840135769796e+000, 2.1647716765271796e+000,
          -1.4278113623918910e-002 ]

```

图 7.10 联合标定输出结果

上图结果中的 `unit_calibration_result` 表示了一个 3*3 大小的旋转矩阵，从数

值上可以看到，该矩阵近似等于矩阵 $\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$ （每个元素的绝对值差距小于

0.05），该结果表明采集手机传感器坐标系和相机坐标系之间确实存在这一定的旋转。

7.5 本章总结

本章展示了天线姿态估算系统设计与实现的相关内容。从系统需求分析角度出发分析了本文主要涉及到三个主要任务：基于物理接触方式快速得到方位角下倾角的 `downtilt` 软件；在 `andorid` 平台上实现的采集程序；以及联合标定优化计算程序。之后对每一个任务的模块设计，计算流程，开发环境，实现结果逐一进行了说明。

8 本文总结

8.1 总结

随着移动通信网络规模的扩大，无线网络优化工作的重要性不言而喻。无线覆盖是网络优化工作的基础，其中天线方位角下倾角的精确规划是影响覆盖最重要因素之一。传统的计算方向角和下倾角的方法是基于一定的物理测量方法，都存在测量复杂，测量不方便，测量受限于测量环境等特点。基于这样的背景需求，本文提出了一套非接触式测量天线姿态的完整解决方案。该方案使用配置有惯性传感器（三轴加速度传感器，三轴磁通传感器，三轴陀螺仪传感器）和高精度照相机的智能手机作为采集设备，使用其在不同角度上对天线进行拍照；结合三维重建算法对拍照好的照片进行重建，并将重建好的点云与真实天线模型进行配准；最后利用配准后的结果估算出当前的天线在重力与磁北方向的姿态。该姿态包括天线的方位角和下倾角两个主要参数。

本文的第 2 章给出了天线姿态测量的一个系统问题描述。之后，在第 3 章描述了非接触式测量天线姿态的技术解决方案，给出了方案的总体架构，并对本文主要做的相关模块进行了概述。具体而言，本文重点研究了两大块内容：手机传感器坐标系和相机坐标系旋转矩阵的标定计算，天线姿态角计算。

第 4 章介绍了本文实现的两种不同传感器配置下计算手机朝向的算法并进行了测试和结果比较。第 5 章介绍了手机传感器坐标系和相机坐标系旋转矩阵的标定计算算法，并给出了标定结算结果。第 6 章介绍了天线姿态估算算法，并给出了测试的结果。在本文的最后，第 7 章介绍了天线姿态估算系统的设计与实现：这包括一个快速测量天线方位角下倾角的 `downtilt` 测量软件，一个运行在 `android` 平台上的数据采集程序，以及联合标定完整计算程序。

8.2 本文工作展望

本文提出的解决方案中，还存在一些问题：比如联合标定数据测量精度不高，朝向计算算法受误差影响较大等。因此，本文后续的工作安排做了如下：

- 1) 设计并搭建更精确的测量设备来测量天线的方位角下倾角基准数值。
- 2) 使用高精度的测量设备动态测量手机在空间中的朝向姿态。
- 3) 进一步提高朝向估算算法的精度，除了物理测量设备上的改进之外，还包括使用更好的算法对原始数据进行去噪和校准处理，提高算法的性能。
- 4) 进一步提高采集程序的实用性，这包括加入使用 Wi-Fi 和 4G 网络对采集数据进行实时传输等功能。

参考文献

- [1] 陈明钰. 智能判断天线方位角的准确性提升优化效率[J]. 中国新通信, 2013(4): 51.
- [2] 赵伶俐. WCDMA 系统基站覆盖范围的分析与优化[J]. 通信技术, 2008, 41(7): 166–168.
- [3] 蔡阜平. CDMA 网络路测数据分析技巧[J]. 电信科学, 2004, 20(5): 75–79.
- [4] 钱晓凡, 胡涛, 张晔. 基于 MATLAB 的衍射场模拟计算[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2004, 29(3): 132–134, 151.
- [5] 宋书祥. 基站天线的下倾角研究及工具开发[J]. 山东通信技术, 2007(04): 39–41.
- [6] 张志鹏. 基于光度计算的三维脚型测量技术与系统[D]. 浙江大学, 2012.
- [7] 孙荣西. 多姿态脚型生成技术与系统[D]. 浙江大学, 2012.
- [8] H J Luinge, P H Veltink. Inclination measurement of human movement using a 3-D accelerometer with autocalibration[J]. Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on, IEEE, 2004, 12(1): 112–121.
- [9] B Barshan, H F Durrant-Whyte. Inertial navigation systems for mobile robots[J]. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, IEEE, 1995, 11(3): 328–342.
- [10] F Semiconductor. Implementing a Tilt-Compensated eCompass using Accelerometer and Magnetometer Sensors[J]. 2011.
- [11] T Accelerometer. High Precision Calibration of a Three-Axis Accelerometers[J]. 2013.
- [12] E Foxlin. Inertial head-tracker sensor fusion by a complementary separate-bias Kalman filter[A]. Virtual Reality Annual International Symposium, 1996., Proceedings of the IEEE 1996[C]. 1996: 185–194.
- [13] Q Fu, G Retscher. Using RFID and INS for indoor positioning[A]. 见: Location Based Services and TeleCartography II[M]. Springer, 2009: 421–438.

- [14] E R Bachmann, X Yun, C W Peterson. An investigation of the effects of magnetic variations on inertial/magnetic orientation sensors[A]. Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on[C]. 2004, 2: 1115–1122.
- [15] H J Luinge, P H Veltink. Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscopes and accelerometers[J]. Medical and Biological Engineering and computing, Springer, 2005, 43(2): 273–282.
- [16] A M Sabatini. Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing[J]. Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, 2006, 53(7): 1346–1356.
- [17] X Technologies. MTi and MTx User Manual and Technical Documentation[M]. 2009: Pantheon 6a, 7521 PR Enschede.
- [18] S K Hong. Fuzzy logic based closed-loop strapdown attitude system for unmanned aerial vehicle (UAV)[J]. Sensors and Actuators A: Physical, Elsevier, 2003, 107(2): 109–118.
- [19] L Ojeda, J Borenstein. FLEXnav: Fuzzy logic expert rule-based position estimation for mobile robots on rugged terrain[A]. Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on[C]. 2002, 1: 317–322.
- [20] S O H Madgwick, A J L Harrison, R Vaidyanathan. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm[A]. Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on[C]. 2011: 1–7.
- [21] S O H Madgwick. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays[J]. Report x-io and University of Bristol (UK), 2010.
- [22] H Lu, J Yang, Z Liu, et al. The Jigsaw continuous sensing engine for mobile phone applications[J]. Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems - SenSys '10, New York, New York, USA: ACM Press, 2010: 71.
- [23] F Semiconductor. Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer[J]. 2013: 2012–2013.
- [24] J J Craig. Introduction to Robotics[J]. 2005.
- [25] J M Cooke. NPSNET: Flight simulation dynamic modeling using quaternions[D]. Monterey, California. Naval Postgraduate School, 1992.

- [26] N Kothari. An Extended Kalman Filter for Cell Phone Orientation Tracking[J]. 2011.
- [27] J A Jacobs. The Earth's core[M]. Academic Press, 1987, 37.
- [28] Q V Le, A Y Ng. Joint calibration of multiple sensors[A]. Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on[C]. 2009: 3651–3658.
- [29] A K G. Bradski. Learning OpenCV Computer Vision with the OpenCV Library[M]. O'Reilly Media, 2008.
- [30] <http://docs.opencv.org/modules/calib3d/doc/calib3d.html>[EB/OL]. OpenCV. .
- [31] J Weng, P Cohen, M Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, IEEE, 1992, 14(10): 965–980.
- [32] R Laganière. OpenCV 2 computer vision application programming cookbook[M]. Packt Publishing, 2011.
- [33] J Nocedal, S J Wright. Numerical optimization[M]. Springer New York, 1999, 2.
- [34] M I A Lourakis. A brief description of the Levenberg-Marquardt algorithm implemented by levmar[J]. Institute of Computer Science, Foundation for Research and Technology, 2005, 11.
- [35] G Bradski, A Kaehler. Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library[M]. O'reilly, 2008.
- [36] B K P Horn, B G Schunck. Determining optical flow-a retrospective[J]. Artif. Intell. v59, 1994: 81–87.
- [37] K S Arun, T S Huang, S D Blostein. Least-squares fitting of two 3-D point sets[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, IEEE, 1987(5): 698–700.
- [38] P J Besl, N D McKay. Method for registration of 3-D shapes[A]. Robotics-DL tentative[C]. 1992: 586–606.
- [39] C Yang, G Medioni. Object modelling by registration of multiple range images[J]. Image and vision computing, Elsevier, 1992, 10(3): 145–155.
- [40] 韩菲琳 孙国飞. CAPG 实验室 三维扫描实验报告[R]. .

-
- [41] Minolta Vivid 9i non-contact 3D laser scanner[EB/OL]. .
<http://sensing.konicaminolta.asia/>.
 - [42] 方位倾角仪 antenna downtilt[EB/OL]. .
http://as.baidu.com/a/item?docid=719354683&pre=web_am_rel.
 - [43] Coordinated Universal Time[EB/OL]. .
http://en.wikipedia.org/wiki/Coordinated_Universal_Time.
 - [44] OpenCV XML/YAML Persistence[EB/OL]. .
http://docs.opencv.org/modules/core/doc/xml_yaml_persistence.html.

攻读硕士学位期间主要的研究成果

致谢

两年半的硕士生活转眼过去，虽然时光短暂，但回首望去收获颇丰。在硕士生活初期，我成功展开了实验室生活，以科研新人的姿态不断融入实验室中。不论是自主学习的第一年，还是不断参与实验室科研项目的后续时间，我都得到了很大的成长和锻炼。这不仅拓宽了我的科研视野，也练就了我的项目开发能力、独立科研能力和项目沟通交流能力。

感谢我的导师耿卫东教授，他严谨的科研作风影响了我。两年多的时间，他教会我很多做科研的方法，让我养成了良好的计划制定与总结习惯。同时，在我求学期间给了我很多科研锻炼机会，让我有幸参与实验室多个项目，并在我科研遇到困难的时候能孜孜不倦为我答疑解惑，给予具有建设性的意见和建议。

感谢教十一实验室的王镇博士、杜宇博士，与他们的科研问题探讨与交流过程中，带给我很多启发与帮助。此外也感谢 CAPG 实验室的其他同学们在日常学习工作中给予的帮助。

最后要感谢我的家人，有他们不断的鼓舞和支持，才有我今天的成就。你们的理解与鼓励是我不断前进的强大动力。

谨以此文献给所有在我科研、学习、生活中关心帮助过我的人。

姜锦正

2014 年 3 月 9 日