

分类号 P232.....

U D C .....

密 级.....

编 号 10486.....

武 汉 大 学  
博 士 学 位 论 文

车载移动测量系统集成关键技术研究

研 究 生 姓 名： 陈 长 军

指导教师姓名、职称： 张祖勋 院士

龚健雅 院士

学 科 专 业 名 称： 摄影测量与遥感

研 究 方 向： 车载移动测量技术

二零一三年四月

# **Ph.D. Dissertation**

## **The Research on Key Technique of Mobile Mapping System Intergration**

By

Chen Changjun

Supervised by

Professor Zhang Zuxun

Professor Gong Jianya

Speciality: Photogrammetry & Remote Sensing

Research Direction: Mobile Mapping Technology

April, 2013

School of Remote Sensing and Information Engineering

Wuhan University, Wuhan 4300079, China

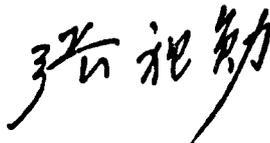
## 学位论文使用授权书

(一式两份, 一份论文作者保存, 一份交《中国博士学位论文全文数据库》期刊社存档)

本论文作者完全了解学校关于保存、使用学位论文的管理办法及规定, 即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版, 允许论文被查阅和借阅, 接收社会监督。本人授权武汉大学可以将本学位论文的全部或部分内  
容编入学校有关数据库和收录到《中国博士学位论文全文数据库》进行信息服务, 也可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存或汇编本学位论文。

本论文提交  当年 /  一年 /  两年 /  三年以后, 同意发布。

**注: 保密学位论文, 在解密后适用于本授权书。**

作者签名:  2013 年 6 月 1 日  
 导师签名:  2013 年 6 月 1 日

### 武汉大学研究生学位论文作者信息

论文题目	车载移动测量系统关键技术研究				
姓名		学号	200212130032	答辩日期	2013 年 5 月 27 日
论文级别	博士 <input checked="" type="checkbox"/> 硕士 <input type="checkbox"/>				
院/系/所	遥感信息学院		专业	摄影测量与遥感	
联系电话			E_mail		
通信地址 (邮编):					
备注:					

## 郑重声明

本人的学位论文是在导师的指导下独立撰写并完成的，学位论文没有剽窃、抄袭、造假等违反学术道德、学术规范和侵权行为，本人愿意承担由此而产生的法律后果和法律责任，特此郑重声明。

学位论文作者（签名）：陈长军

2013 年 6 月 20 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文复印件和电子版，允许论文被查询和借阅。本人授权武汉大学可以将本学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存或汇编本学位论文。

本论文属于

保密口，在\_\_\_\_\_年后解密后使用本授权书。

不保密口

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名:

陈长军

日期: 2013年6月20日

# 论文创新点

本论文是对近年来车载移动测量系统集成技术研究的总结，主要创新点体现在以下几个方面：

1) 完整地研究了多种模式下的移动测量系统集成方法，构建了基于激光扫描和高分辨率全景成像的城市测量的静动态一体化解决技术。

在分析车载移动测量系统的体系构架以及多种模式移动测量系统功能和需求的基础上，本文设计并实施了面向城市测量、面向空间信息采集与发布及基于立体影像的移动测量系统硬件集成方案和软件集成方案，该设计方案和实践对当前车载移动测量系统软、硬件的进一步集成研究具有良好的引导作用。

研制了国内首款基于激光扫描和全景成像的高精度城市空间信息一体化快速获取系统，可实时完成载体的 GPS 定位、位姿解算、城市三维空间信息的激光点云数据及全景影像数据的采集，实现了集二、三维激光点云数据和影像于一体的测绘新服务模式，为城乡测绘作业提供了一整套便捷高效的静动态一体化解决方案。同时，该系统打破了国外厂商对车载激光扫描集成的技术垄断和价格垄断，顺利实现车载系统的国产化，可促进我国测绘技术装备和城市测绘技术的进步。

2) 研制高精度的 GPS 时钟同步控制器和集成控制系统。

在详细分析了 GPS 时空特性、多传感器的时空特性和各种传感器同步控制方法基础上，提出了 GPS 同步时钟控制原理，并基于此设计了车载同步控制器硬件。设计并实施了整个系统的时空同步控制及同步数据采集方案，该方案对多传感器集成系统的时空同步设计具有现实的指导意义。

3) 研发了全景成像系统硬件及软件，达到了工程化的水平。

在分析和研究全景成像技术的基础上，自主研发了基于多台彩色工业 CCD 相机的高动态特性全景相机及其配套软件，适合于面向城市测量的激光扫描与全景成像的移动测量系统；自主研发了基于微型单反相机的高分辨和高色彩还原性的全景相机，满足面向空间信息采集和发布的移动测量系统需求，从而为城市大范围全景影像或场景纹理信息的快速采集提供了全新高效的技术手段。

4) 车载移动测量系统的整体的高精度标定技术。

在分析移动测量系统各种测量方式的相对测量和绝对测量原理的基础上，建立了立体影像、激光扫描、全景成像和点云融合等测量模型，建立了立体影像测量、激光扫描测量、全景成像和点云融合标定模型，设计和建立了三维激光扫描和全景成像联合标定场，并开发了联合标定软件，完成系统的整体标定，实现了激光点云与全景影像的高精度异源数据配准和融合。

经移动测量成果的第三方外业抽检，动态测量精度满足城市测量规范精度要求，动静态测量精度达到了浙江省 1:500 及以上数字地形图测量规范精度要求。比较系统地解决了车载测量系统的整体标定问题。

## 摘要

城市三维空间信息的快速获取是当今测绘研究领域的热点之一，随着社会发展与进步，现代城市及基础设施建设发展日新月异，要求高效率(快)、大面积(广)、高精度(精)和全面生动(真)地获取城市空间信息数据，传统的以全站仪为主要手段的城市测量劳动强度大、作业效率低，难以满足城市空间信息获取快、广、精、真的需求；而车载移动测量系统的出现为高效率、大面积、高精度的获取城市空间信息提供了可能，车载移动测量系统是目前最为引人注目的城市空间三维信息获取技术之一。目前，3D Laser Mapping、Applanix、Riegl 等国外公司已实现车载移动测量系统的商业化，但其所售车载移动测量系统价格昂贵，严重阻碍了车载移动测量系统在国内的应用。因此，研究车载移动测量系统的集成具有重要意义。

本论文对车载移动测量系统集成中的各种核心技术进行了广泛而深入的研究，包括车载多传感器时空同步技术、DGPS/INS 组合定位定姿技术、车载立体影像量测技术、车载激光扫描技术、车载多传感器的联合标定等。

(一) 车载多传感器时空同步技术。时空同步技术是多传感器集成的重要技术，精确的时空同步是车载移动测量系统实现高精度三维空间信息采集的前提。本文分析了 GPS、惯导、激光扫描仪以及相机等的时空特性，并采用高稳晶振，设计并实现了一种同步控制器；该同步控制器在作业过程中引入 GPS 时间系统并在 GPS 信号中断期间维持该时间系统，能够长时间的实现多传感器的高精度时间同步。

(二) DGPS/INS 组合定位定姿技术在车载移动测量系统中的应用。传统摄影测量中，采用布设控制点进行空三加密的方法得到影像的外方位元素；车载移动测量系统中使用组合定位定姿技术，直接为影像提供外方位元素，称为直接地理定位(Direct Georeferencing)技术。本文采用直接地理定位方法，为车载影像与激光扫描数据提供直接地理定位，建立车载影像立体量测模型与车载激光扫描直接地理定位模型。

(三) 车载立体影像量测技术。数字相机是车载移动测量系统中的常用传感器，在车载移动测量系统中一般按照特殊的安装方式集成多对数码相机，每对数码相机采集的影像可构成立体像对进行立体量测。车载立体影像量测技术来源于摄影测量，但是又与传统的摄影测量有所区别，本文建立了直接地理定位下的车载立体影像的量测模型并开发了相应的车载立体影像量测软件。

(四) 车载激光扫描测量技术。地面激光扫描技术(固定式地面激光扫描)能够高效率、高精度的获取局部区域的三维空间信息，将激光扫描技术应用于

车载移动测量系统中，能够解决大范围大区域三维空间信息的快速高效获取。本文将 SICK LMS 系列激光、Riegl 系列激光以及 Faro focus 3D 激光扫描仪用于车载移动测量系统中，建立了车载激光扫描的绝对定位模型，将“二维”点云重建为三维激光点云，实现大范围三维空间信息的快速高效获取。

（五）车载多传感器集成系统的整体标定。未经整体标定的车载移动测量系统存在多种未知的系统参数，包括相机的主点位置、主距、镜头畸变、相机之间的相对空间关系、相机与激光扫描仪之间的相对空间关系、相机与惯导之间的空间关系以及激光扫描仪与惯导之间的空间关系等。本文在对车载多传感器集成系统中各系统参数深入分析与建模的基础上，利用三维标定场与二维标定板，完成了车载移动测量系统中各未知系统参数的解算，使本文研制的车载移动测量系统的定位精度达到厘米级水平。

在研究车载移动测量系统集成各个核心技术的基础上，本文完成了三种完整的移动测量系统的集成，论文研究的面向城市测量的移动测量系统和面向空间信息采集与发布的移动测量系统的软、硬件及应用成果分别通过宁波市规划局和国家测绘地理信息局的科技成果鉴定；通过实际工程中的应用与验证也证明，本论文研究成果达到了预期目标。

**关键词：**移动测量系统；激光扫描；全景成像；立体图像测量；同步控制；系统标定；城市测量；

# ABSTRACT

Nowadays, Fast collection of three dimensional urban spatial information is a major topic in the field of geodesy and geomatics. With the rapid development of society and infrastructure of modern city, there is a growing requirement for collecting urban spatial information in an efficient, extensive and accurate way. Traditional surveying method based on Total station is labor intensive and inefficient. On the opposite, Mobile Mapping System makes it possible to collect urban spatial information efficiently, extensively and accurately. Some foreign companies (e.g. 3D Laser Mapping、Applanix、Riegl) sell their products all over the world, but it is not completely available for domestic demand due to its high price or lack of post-processing software. Therefore, research on the integration of Mobile Mapping System is of great significance.

In this paper, the key technique of Mobile Mapping System integration have been deeply researched, including space and time synchronization of multi-sensor system, integrated positioning and orientation of DGPS/INS, vehicle based Stereo Photogrammetry , and vehicle based laser scanning as well as joint calibration of the whole Mobile Mapping System.

(1) Space and time synchronization of multi-sensor system. Space and time synchronization is important for multi-sensor integration due to the fact that it is a premise for high-accuracy 3D spatial data collection. The properties of GPS, INS, laser scanner and camera have been analyzed in details in this paper, and a synchronizer based on GPS timing and OCXO crystal oscillator has been researched and developed successfully. The synchronizer can achieve high time accuracy after being synchronized with GPS time system and keep its accuracy for hours during the lack of GPS signal.

(2) Integrated positioning and orientation of DGPS/INS and its application in MMS. In traditional photogrammetry, exterior elements are solved based on control points. In Mobile Mapping System, the orientation parameters can be achieved directly by integrated positioning and orientation of DGPS/INS. Many experiments have been profromed to get the positioning and orientation accuracy in different condition. The result is very helpful for applying DGPS/INS effectively in Mobile Mapping System.

(3) Vehicle based Stereo Photogrammetry. With several digital cameras installed in the system , sets of stereo camera can be used for stereo measuring on each pair of

images. This paper presents the model of relative and absolute survey for vehicle based Stereo Photogrammetry based on Direct Geo-locating from GPS/INS.

(4) Vehicle based laser scanning. As well know, terrestrial laser scanning can capture local 3D spatial data efficiently and accurately. Large scale 3D data collection by integrating laser scanning into MMS can be achieved. And an absolute positioning model has been researched, which can reconstruct the 2D line point cloud into 3D laser point cloud and achieve accurate and efficient 3D spatial data collection.

(5) Joint calibration of vehicle based multi-sensors integrated system. With joint calibration, parameters such as principle points、 focal length, distortion coefficients of cameras, relative orientation among cameras, relationship of stereo cameras to laser scanner, cameras to IMU and laser scanner to IMU can be achieved . In this paper, the joint calibration Mathematical models has been researched and analyzed. The whole Mobile Mapping System has been calibrated successfully with indoor and out-door high precision control field, and system can achieve a centimeter level accuracy.

Based on the reseach of key technique of MMS, the integration of vehicle based multi-sensors system have been achieved in this paper, including integrate positioning and orientation of DGPS/INS, laser scanning system, Stereo Photogrammetry system and panoramic imaging system. The methods of system integration 、 synchronization、 panoramic imaging and joint calibration have been proved to be correct and effective.

**Keywords:** Mobile Mapping System; Laser Scanning; Panoramic Imaging; Stereo Image Measuring; Synchronous Control; System Calibration; City Surveying;

# 目录

论文创新点 .....	i
摘要 .....	iii
ABSTRACT .....	v
目录 .....	vii
第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景与意义 .....	1
1.2 车载移动测量系统技术支撑 .....	2
1.2.1 数字图像传感技术 .....	2
1.2.2 惯性组合定位定姿技术 .....	3
1.2.3 激光扫描技术 .....	4
1.2.4 全景成像技术 .....	4
1.3 移动测量技术国内外发展 .....	5
1.3.1 加拿大卡尔加里大学 VISAT 系统 .....	7
1.3.2 东京大学车载激光道路测量系统 .....	7
1.3.3 Google 公司的街景采集系统 .....	8
1.3.4 RIEGL 公司的 VMX-250 .....	9
1.3.5 车载移动激光扫描测量系统 Lynx .....	9
1.3.6 车载激光雷达及数字成像系统 StreetMapper .....	10
1.3.7 Earthmine 立体全景测量系统 .....	11
1.3.8 Topcon 公司的 IP-S2 系统 .....	11
1.3.9 LD2000-R 型系列移动道路测量系统 .....	12
1.4 车载移动测量系统常见模式 .....	13
1.4.1 影像+激光扫描+GPS/IMU 方案 .....	13
1.4.2 立体影像+GPS/IMU 方案 .....	13
1.4.3 全景影像+激光扫描+GPS/IMU 方案 .....	13
1.5 车载移动测量系统发展趋势 .....	13
1.6 本文研究主要内容 .....	14
1.7 本文结构 .....	15
1.8 本章小结 .....	16

第 2 章 车载移动测量系统集成 .....	17
2.1 车载移动测量系统的体系构架 .....	17
2.2 车载移动测量的系统核心设备 .....	18
2.2.1 组合定位及定姿传感器 .....	18
2.2.2 图像测量传感器 .....	21
2.2.3 激光扫描雷达 .....	22
2.3 车载移动测量中的坐标系统 .....	25
2.4 车载移动测量系统关键技术 .....	27
2.5 车载移动测量的系统硬件集成 .....	28
2.5.1 面向城市测绘的移动测量系统设计 .....	28
2.5.2 面向空间信息采集与发布的移动系统设计 .....	33
2.5.3 基于立体测量的移动测量系统设计 .....	37
2.6 车载移动测量系统的软件集成 .....	40
2.7 本章小结 .....	41
第 3 章 车载多传感器实时同步数据采集技术 .....	42
3.1 GPS 的时空特性分析 .....	42
3.1.1 时间系统 .....	42
3.1.2 时间精度 .....	45
3.1.3 频率准确度 .....	47
3.2 多种传感器时空特性分析 .....	49
3.3 GPS 同步时钟控制器设计 .....	51
3.4 传感器同步方法 .....	53
3.4.1 传感器的同步控制方式 .....	53
3.4.2 核心传感器的同步控制方式分析 .....	54
3.5 系统同步控制设计及同步数据采集 .....	61
3.6 本章小结 .....	63
第 4 章 移动测量系统三维测量技术 .....	64
4.1 组合定位定姿 .....	64
4.1.1 组合定位定姿原理 .....	66
4.1.2 车载系统组合定位定姿实验 .....	70

4.2 基于立体影像的三维测量 .....	77
4.2.1 立体相对测量模型 .....	78
4.2.2 绝对测量模型 .....	80
4.3 车载激光扫描技术 .....	83
4.3.1 车载激光扫描仪工作原理 .....	84
4.3.2 车载激光点云重建 .....	84
4.4 本章小结 .....	89
<b>第5章 全景成像相机集成 .....</b>	<b>90</b>
5.1 全景成像技术原理 .....	90
5.1.1 全景成像简介 .....	90
5.1.2 全景成像模型 .....	91
5.2 全景相机集成 .....	95
5.2.1 基于工业彩色数字相机的全景相机研制 .....	96
5.2.2 基于微单相机的分辨率全景相机研制 .....	98
5.3 全景影像的生成 .....	99
5.3.1 全景影像生成流程 .....	99
5.3.2 影像畸变矫正 .....	100
5.3.3 投影变换矩阵求解 .....	101
5.3.4 影像融合 .....	104
5.3.5 全景影像拼接实验与分析 .....	105
5.4 本章小结 .....	110
<b>第6章 多传感器系统整体标定 .....</b>	<b>111</b>
6.1 车载立体测量系统相对标定和绝对标定 .....	111
6.1.1 立体相机相对标定 .....	111
6.1.2 立体相机绝对标定 .....	115
6.2 2D/3D 一体化激光扫描仪的绝对标定 .....	118
6.2.1 激光标定三维标定场的建立原则 .....	120
6.2.2 激光扫描仪的标定模型及标定参数解算 .....	121
6.2.3 激光扫描仪的标定实验及结果分析 .....	123
6.3 2D 路面激光扫描仪的绝对标定 .....	131

6.3.1	2D 路面激光扫描仪的标定原则	134
6.3.2	2D 路面激光扫描仪的标定原理及标定参数解算	134
6.3.3	2D 路面激光扫描仪标定实验与结果分析	136
6.4	车载全景影像与激光点云联合标定	137
6.4.1	全景相机的内标定	137
6.4.2	激光点云与全景影像的高精度配准	142
6.5	本章小结	149
第 7 章	车载移动测量系统研究成果及工程验证	150
7.1	车载移动测量系统研究成果	150
7.1.1	硬件系统集成成果	150
7.1.2	软件研发成果	153
7.2	车载移动测量系统工程化应用	156
7.2.1	城市部件采集案例	156
7.2.2	建筑竣工测量案例	159
7.2.3	道路竣工测量案例	162
7.2.4	城市三维建模案例	164
7.2.5	全景网络发布案例	166
7.3	本章小结	168
第 8 章	总结与展望	169
8.1	研究工作总结	169
8.2	未来研究展望	170
参考文献		172
攻读博士学位期间发表的主要论文及成果		179

# 第1章 绪论

## 1.1 研究背景与意义

城市空间三维信息的快速获取是当今测绘研究领域的一大热点，城市建筑密度大、地形地势复杂，传统的以全站仪为主要手段的城市测量不再能够很好满足需求，三维激光扫描、全景成像、高精度低成本 POS 的出现为研制新的城市测量系统带来了可能。

目前，城市空间信息采集与发布和城市测量技术中最为引人注目的一项技术便是集成了多种传感器的车载移动测量技术。移动测量技术是当今测绘界最为前沿的科技之一[李德仁 2006]，诞生于上世纪 90 年代初，其集成了全球卫星定位、惯性导航、图像处理、摄影测量、激光扫描、地理信息及集成控制等技术，通过采集激光点云信息与全景影像，由卫星及惯性定位确定激光点云数据三维绝对坐标及全景影像的位置姿态等测量参数，实现影像的浏览和激光点云的量测。

经过多年的研究和应用表明，车载移动测量系统在获取相应数据和信息方面有很明显的优势，即获取信息全面、快捷、准确，自动数据处理以及多种信息表现形式。鉴于这些优势，近年来车载移动测量系统得到相关研究机构的关注和研究，进而获得测绘界专家和学者的关注以及国家测绘部门的支持。

国内外都有关于车载移动测量系统的相关研究，并取得了一定进展。比较国内外的研究现状，国外技术相对比较先进，但是价格昂贵，高精度的产品也不对外出口；国内相关技术处于不断地探索阶段，相对还比较薄弱。

为了缓解我国城市空间三维数据采集及相关领域的应用需求，首都师范大学和中国测绘科学研究院在刘先林院士的带领下，联合开发了新型的车载移动测量系统 SSW，该系统采用 SICK 激光扫描仪以及高速线阵 CCD 相机为主要数据采集设备，以高精度 GPS/IMU 组合以及车轮编码器作为定位定姿传感器[韩友美 2011]。经过不断改型和改善，目前设备的构架已经趋于成熟，但仍然存在较大发展空间。随着激光三维扫描技术和全景成像技术的快速发展，出现了高性能的激光扫描仪和全景相机，这就为车载移动测量系统性能的进一步提高提供了基本的技术保障。

基于以上背景，借鉴国内外产品的成果和经验，本论文对车载移动测量系统集成关键技术三维激光扫描技术、全景成像技术以及 GPS/INS 组合定位定姿技术等进行了深入研究。三维激光扫描技术是继 GPS 空间定位技术后的又一项测绘技术革新，研究激光雷达数据处理技术对促进我国现代测绘事业的改革进

程有着重大意义。全景成像技术与三维激光扫描技术相结合，可以实现三维空间信息的直接测量，又能满足高质量空间影像的要求，对于解决城市复杂测量条件下快速获取城市空间信息具有重要意义。GPS/IMU 组合定位定姿技术给全景成像技术与激光雷达提供高精度的外方位元素，可以实现三维空间信息的绝对定位定姿测量。

## 1.2 车载移动测量系统技术支撑

车载移动测量系统是数字图像传感技术、惯性组合定位定姿技术、激光扫描技术和全景成像技术等发展与结合的产物，它所涉及的理论与技术都是当前信息技术发展的前沿，它不仅需要已有的理论和技术为支持，同时还需从更高层次和一体化系统集成的角度来组合、应用全新的理论和技术，从而更好地、更广泛地推进测绘科技进步。

### 1.2.1 数字图像传感技术

CCD 是一种以电荷为信号载体的微型图像传感器[胡琳 2010]。CCD 图像传感器具有灵敏度高、光谱响应宽、集成度高、维护方便、成本低廉等一系列优点，因此有着广泛的应用，是现代最重要的图像传感器技术之一[宋爱群 2007]。

基于 CCD 传感器的数字照相机的出现是照相机家族发展中重要的里程碑，数字照相机采用 CCD 光敏元件和数字化电路，它能把被拍摄景物和图文二维色彩和亮度变化以数字形式而非银盐胶片形式记录在计算机或数字电路中。自 1990 年第一台数字照相机问世以来，数字摄影成像技术得到迅猛发展，最早该技术被美国用于太空卫星拍照并传向地面，以后这一在航天航空领域发展起来的高科技迅速转为民用，并不断拓宽应用范围，到目前为止，以美国柯达公司衰落为标志，几乎已经完全淘汰传统光学相机。

数字照相机不使用传统胶卷，而是采用 CCD 或 CMOS 光敏原件组成的图像传感器将光信号转变为电信号，电信号经过模数转换(A/D 转换器)并进行数字处理和压缩，最后将图像数据保存在计算机内外存储介质内。图像可以通过显示设备，如计算机显示器或电视屏幕显示，也可以通过输出设备如彩色打印、数码彩色扩印机输出，整个过程无需暗室，操作十分方便。数字照相机获得的数字影像可以利用计算机对所拍影像进行数字加工和处理，处理方法比传统照片快捷、精确、多样、无耗而且具有柔性，因此具有极大的优越性。数字照相机拍摄的照片信息可通过计算机实现传输、存贮、处理和再现，很受新闻界、工业界以及普通消费者的欢迎[程开富 2000]。

作为高端图像传感器的 CCD，仍有巨大的发展潜力[金婷婷 2012]，从目前 CCD 技术的发展趋势来看，CCD 将向高分辨率、高速度、高图像质量等方向发展[寇玉民 2008]。

数字图像传感器的提供商有很多，主要有加拿大的 PointGrey，德国的 Basler，美国的 UniqVision，日本的 JAI 等。这些公司提供了不同分辨率和接口的数字图像传感器，但分辨率在 500 万及以上的图像传感器价格都比较高。

### 1.2.2 惯性组合定位定姿技术

组合导航技术是指使用两种或两种以上的不同导航系统(或设备)对同一信息源作测量，利用不同导航设备性能上的互补特性，从这些测量值的比较值中提取各系统的误差并校正之，以提高整个导航系统性能的方法和手段。

GPS 与 INS 具有不同的定位和定姿原理，并且具有互补性。如果将 GPS 与 INS 通过硬件和算法的集成组合起来，构成的惯性组合系统 GPS/INS，可以同时获得两种定位定姿系统的优点：GPS 的高精度定位信息及 GPS 轨迹中的航向信息，可以作为外部观测值输入，在运动过程中持续修正 INS 推算出来的位置和航向，以控制其漂移误差随时间的积累；短时间内 INS 推算出来高精度的定位和定姿结果，可以很好地解决 GPS 动态环境中的由于遮挡而造成信号失锁[方鹏 2008]。GPS/INS 集成系统如下图。



图 1.1 Applanix 公司 POS/LV 610

GPS/INS 组合导航系统是构建高效率和高精度车载移动三维测量系统的最重要部件。GPS 具有定位精度高、全球覆盖等特点，但卫星信号在受到阻挡时会对定位结果产生影响；另一方面，GPS 一般只能提供每秒一次的定位数据，对高速车载移动测量来说，测量车可能在一秒内移动了 10—20 米的距离，并且经过了几次姿态的变化。因此，必须采用其他传感器弥补 GPS 定位和定姿的不

足，使得定位导航信息更加精确，采用 GPS/INS 组合定位系统正好能够解决这个问题。

成套的惯性定位定姿系统主要有德国 IGI 公司的 AEROcontrol 系列、美国 Trimble 公司 (Applanix) 的 POS/LV 系列、加拿大 NovAtel 公司的 SPAN 系列、美国 Topcon 公司的 Euro112T(GPS)+Sharman2(IMU)等。

### 1.2.3 激光扫描技术

三维激光扫描技术是一项迅速发展的高新技术，它的出现为空间三维信息的获取提供了全新的技术手段。三维激光扫描技术主要采用激光测距原理，瞬时测得空间三维坐标值。其巨大优势就在于可以快速扫描被测物体，不需反射棱镜即可直接获得高精度的扫描点云数据，这样一来可以高效地对真实世界进行三维建模和虚拟重现。目前此项技术已广泛应用于变形监测、工程测量、地形测量、城市规划、智能交通、防震减灾等领域。

地面三维激光扫描技术是 20 世纪 90 年代突破的一种快速获取三维空间信息的技术手段，它采用非接触主动测量方式直接高速获取高精度、超高分辨率三维空间信息，具有点位测量精度高、采集密度大、无需控制点等特点，且融合了激光点云反射强度和物体色彩等光谱信息，可以真实描述目标的光谱、形态和结构等特征，从而为测量目标的识别分析提供了更为丰富的研究内容。由于其获取空间数据的快速高精度特点迎合了测绘发展的趋势，满足了空间信息获取和表达的需要，因而在众多的工程应用领域显现出技术优势，并引发了一场新的技术革命。

三维激光扫描技术是一个迅速发展起来的测量技术，与传统测量手段相比，它具有无可比拟的优势，主要体现在速度快、精度高、自动化程度高、劳动强度低、使用方便、环境依赖性小等方面。随着激光扫描仪价格的降低和性能的提高，它将逐渐被普及，并将大大降低生产成本和提高工作效率。伴随三维激光扫描技术的不断完善与发展，充分发掘三维激光扫描技术在测量领域的利用价值，将会给测量学科带来新的发展机遇，也将给广大测量工作者创造更好的工作条件[谢媛媛 2012]。

目前在车载移动测量研究领域，主要使用到的扫描仪有德国 SICK 公司的 LMS 系列，奥地利 RiegI 公司的 LMS、VZ 和 VQ 系列，加拿大 Optech 公司的 2D 扫描仪以及美国 FARO 公司的 Focus 3D 120 等。

### 1.2.4 全景成像技术

随着图像传感器和数字图像处理技术的发展，越来越多的场合不但需要高分辨率和高保真的图像，而且需要更大的成像视场。全景成像(Panoramic Imaging)是采用特殊的成像装置获得水平方向或者垂直方向上的大于  $180^\circ$  的半球视场或者  $360^\circ$  近似完整于球形的视场。全景成像技术第一时间提供了关于对象的或者拍摄者周围全方位信息，现场环境记录的完整性为后续的图像处理赢得了时间[肖潇, 杨国光 2007]。

全景图像是一种超广角视野表达方式，它包含了比图像序列更直观、更完整的场景信息，同时可供用户自由转换视角，从而得到真实场景漫游的感觉。目前，全景图像已被广泛应用于虚拟场景构建、空间信息采集、深空探测及数字娱乐等领域。

由于制造工艺日趋成熟，价格适中、与普通测量仪器体积相当的全景相机已经上市。引入全景相机后，外业采集的信息将更加全面，而且由于全景相机的特点，可以同时拍摄  $360^\circ$  范围内的所有景物，因此外业作业时有很多路只需单向采一次就可以将全部信息都采集下来。这样将会在增加信息采集全面性的同时降低了生产成本，提高采集效率。

全景相机的出现，将会改变地理信息数据采集的方式，提高地理信息数据的采集效率，提高导航电子地图的质量，缩短导航电子地图的更新和发布周期，影响各地图生产厂商的市场占有率[孙茫 2007]。

目前，商业的全景相机主要还是加拿大 PointGrey 公司提供的 Ladybug 系列相机，其他厂家如美国的 Elphel 的 Eyesis  $3\pi$ 、 $4\pi$  还处于小批量试用阶段。在本论文相关研究开展之时，PointGrey 公司提供的全景相机分辨率也非常低，单个相机的分辨率只有 200 万像素，由 6 个相机（水平 5 个环形布置、顶部 1 个）组成全景合成分辨率总共也不到 1200 万像素。

### 1.3 移动测量技术国内外发展

车载移动测量技术出现于二十世纪八十年代末九十年代初，国内外各大科研机构、院校以及商业公司纷纷对车载移动测量技术进行了广泛而深入的研究。

早期的移动测量系统多采用相机作为核心传感器，并采用摄影测量的原理进行地物的定位。随着 GPS/INS 组合导航定位定姿精度的提高以及激光扫描技术的成熟，2000 年以后开始出现集成激光扫描仪的移动测量系统。目前，车载移动测量系统普遍集成有影像采集系统以及激光扫描系统；随着谷歌街景的出现， $360^\circ$  全景影像成为大家争相研究的热点，在移动测量系统中集成全景影像采集系统是移动测量系统的最新发展趋势。

目前商业市场上的移动测量系统主要有 Google 公司的街景采集系统、RIEGL 公司的 VMX-250 激光扫描测量系统、Topcon 的 IP-S2 全景与激光以及武汉立得空间信息技术有限公司的 LD2000-R 型系列移动道路测量系统等。

表 1.1 国内外主要移动测量系统

系统	研究者	定位定姿传感器	其他传感器
GPS Van	The Ohio State University, USA	GPS/Gyro/Wheel Counter	2CCD, Voice Recorder
GPS Vision	Lambda Tech. Int University, USA	GPS/INS	2Color, Voice recorder
Kiss	Univ. of Bundeswher Muncih and GeoDigital, Germany	GPS/IMU/Inclination/Odometer/Barometer	1SVHS/2 BW CCD/Voice recorder
ON-SIGHT	TransMap Corp., USA	GPS/INS	4Color CCD
Truck Map	John E.Channce and Engg Inc., USA	GPS/Gyro/WA-DGPS	Laser Ranger/Finder, 1 Video Camera
VISAT	The Univ.of Calgary and Geofit., Cannada	DGPS/IMU/ABS	8 BW CCD 1Color SBHS
LD-2000R	Wuhan Ledor/Wuhan University, China	GPS/Gyro /Wheel Counter	8 Color CCD
Spider-Van	GPSKorea/Wuhan University, Korea	DGPS/IMU/ABS	4 BW Digital CCD/1 Video Recorder/
Integrated Laser System	Tokyo University, Japan	DGPS/INS	3 Laser Scanner
3DRMS	Wuhan University/Nanjing Normal University, China	DGPS/IMU(Javad, iMar)/ Wheel Counter	4Color Digtial CCD/1 3CCDVideo /3 Laser Scanner
Street View	Google, USA	GPS/IMU	8CCD, 3 Laser Scanners
Earthmine	Earthmine, Inc. USA	GPS/IMU(Span-CPT)	CCD
Lynx	Optech, Cannada	GPS/INS	LIDAR
VMX-250	RIEGL, Austria	GPS/IMU	VQ-250/ CCD
IP-S2	Topcon, USA	GPS/IMU	Ladybug3 /3 Laser Scanners
Street Mapper	3D Laser Mapping England/IGI Germany	DGPS /IMU	LIDAR
MX8	Trimble, USA	DGPS /IMU	VQ250/CCD

下面介绍具有代表性的移动测量系统。

### 1.3.1 加拿大卡尔加里大学 VISAT 系统

加拿大卡尔加里大学开发的 VISAT 系统(El-Sheimy,N.,Schwarz,K.P. 1999) (如下图所示)。



图 1.2 加拿大 VISAT 系统

在该移动测量系统中，安装了高精度的 DGPS/IMU 定位定姿传感器以及车轮计数器；在车辆的顶部，安装了 8 台黑白 CCD 工业相机及一台彩色视频摄像机。DGPS/IMU 用于测量在运行过程中的车辆的地理位置坐标 (X、Y、H) 及车辆的运行过程中实时姿态 (Roll,Picth,Heading)；8 台黑白相机形成四对立体像对用于道路及道路两旁地物的可视化测量；1 台彩色视频摄像机摄录道路的不间断视频，用于道路属性的记录。

由于开发的时间比较早，系统集成的测量设备主要是多路黑白的立体相机，系统用于道路资产管理等方面，但是该系统是世界上较早开发完成并投入使用的比较完善的车载移动测量系统，在车载系统研究方面具有里程碑式的意义。

### 1.3.2 东京大学车载激光道路测量系统

日本东京大学是世界上较早开发把激光扫描仪集成到车载移动测量系统中并做了大量相关研究的单位，东京大学车载激光道路测量系统如图 1.3 所示。

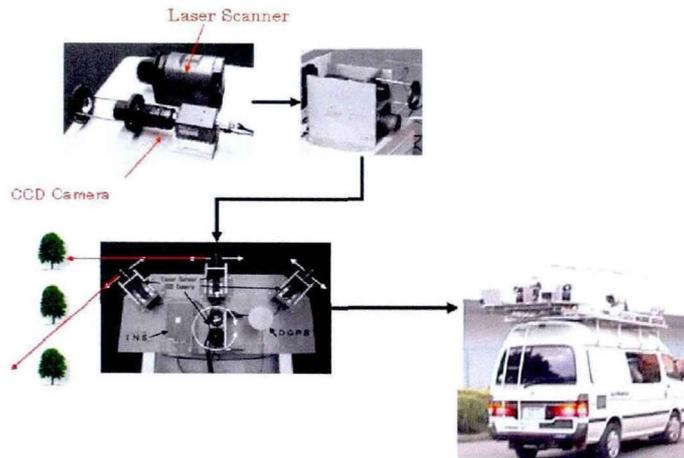


图 1.3 东京大学车载激光道路测量系统

在该移动测量系统中，安装了 DGPS/IMU 定位定姿传感器；在车辆的顶部，安装了 3 台线型激光扫描仪及三台 CCD 相机。DGPS/IMU 用于测量在运行过程中的车辆的地理位置坐标以及车辆的运行过程中实时姿态；3 台线型激光扫描仪用于扫描道路及道路两旁地物的点坐标；3 台 CCD 相机与 3 台激光扫描仪配合，用于采集地物照片及被扫描目标地物的纹理。

与现在相比，尽管当时所使用的激光扫描传感器性能比较低下，但该系统是较早把激光扫描技术应用于车载移动测量系统，在车载激光扫描测量方面做了很多有益的探索。

### 1.3.3 Google 公司的街景采集系统

Google公司的街景采集系统(如图1.4所示)装备有一台惯性定位定姿单元、三台激光扫描仪及一台全景相机。全景相机采用多个面阵感光元件按照近似共投影中心安置，拍摄多幅共投影中心的影像进行拼接以得到具有 360° 的全景影像，该类相机的特点是具有 360° 全方位视角，同时具有分辨率高、帧率高等优势，因此被 Google 公司用于全球的街景采集计划。

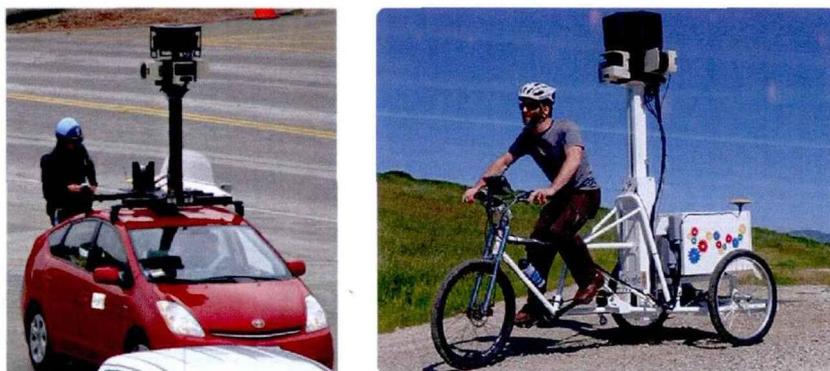


图 1.4 用于 Google 街景采集系统

Google 公司的街景采集系统引领了全景成像系统进入公共服务的潮流，目前 Google 公司的街景服务已经广泛覆盖到欧、美、亚洲主要发达国家和地区。Google 公司是目前最大的基于全景影像的街景服务运营商，基于全景的 Google 街景是 Google 公司继 GoogleEarth 之后又一个具有划时代意义的地理信息公众服务产品。

### 1.3.4 RIEGL 公司的 VMX-250

RIEGL 公司的 VMX-250（如图 1.5 所示）。



图 1.5 RIEGL 公司的 VMX-250

VMX-250 将两台 VQ-250 扫描仪、GPS/IMU 惯性导航系统、数字相机紧凑集成在一个刚体平台中，可根据客户的不同需求方便安装在汽车车顶、火车前部或尾部以及轮船中，从而使其广泛应用于交通基础设施测图、城市建模、隧道断面测量等领域。

VMX-250 系统是一款高性能的车载激光扫描系统。借助 RIEGL 公司自主生产高速高精度扫描仪的近 40 年研发的优势，将 Riegl 最新的全景 360 度激光雷达扫描仪，与 IMU/GPS 惯导系统等技术集成，并开发出数据后处理软件，使得快速获取、制作高精度、高分辨率的三维空间模型成为可能。VMX-250 可以系统模块的方式向其他厂商提供。

### 1.3.5 车载移动激光扫描测量系统 Lynx

Lynx 是以机载激光扫描为主业的 Optech 公司研发的一套车载激光扫描系统。如图 1.6 所示。



图 1.6 车载移动激光扫描测量系统 Lynx

相比于其它同类设备，Lynx 配备的两台激光扫描仪最大限度的保证了避免数据盲区的产生，高达 100000 点/秒的数据采样率不仅保证了足够的数据采集密度，同时也提高了测量、测绘效率。其可以广泛用于道路两侧建筑三维数据采集、城市三维信息化建模、高效地籍测量及监视、涵洞及桥坝勘测等各种高效、高精度三维测量。该系统在国内已有单位购买。

### 1.3.6 车载激光雷达及数字成像系统 StreetMapper

3DLaserMapping 公司生产的 Streetmapper 集成了高精度的 IGI 公司 GPS/INS 系统和 Riegl 公司的 LMS 系列扫描仪，可提供 360° 全方位视野。如下图。



图 1.7 车载激光雷达及数码成像系统 StreetMapper

用光学测距仪代替传统的车轮测距，可测量 300m 范围内的地物，单个传感器的扫描频率为 300HZ，典型定位精度优于 20mm，点对点精度为 10mm，在导航系统包括一个 GNSS 接收机，一个光纤陀螺仪 IMU 和最新的 DIA 辅助导航系统。

StreetMapper 系统使用最先进的的 DGPS 和 IMU 组件，并集成 TERRAcontrol 辅助导航系统。车顶安装有激光扫描仪平台和机架式 PC 仪器

箱。每个测量车均配备一个可定制电源和操作站，并装有两个 12M 像素的相机拍摄并记录影像。

得益于 IGI 公司的高精度惯导和 Riegl 公司的扫描仪，StreetMapper 激光扫描车宣称是目前世界上精度最高的系统[3D Laser Mapping, 2012]。

### 1.3.7 Earthmine 立体全景测量系统

Earthmine 是首个开发成功的基于立体全景测量技术移动测量系统。系统主要设备有惯性组合定位定姿系统（SPAN-CPT）、两台全景相机，其中两台全景相机组成一套立体全景测量系统。通过结合惯性组合定位定姿系统和高保真度、高分辨率的 3D 全景图像，为图像的每个像素提供 3D 坐标[John Ristevski, 2011]。如图 1.8 所示。



图 1.8 Earthmine 公司的立体全景测量车

该系统最大特点在于，采用立体全景测量技术。该系统全景相机中每个相机单元，与美国 NASA 的火星探测车所用的相机相同，其立体全景图像的 3D 点云生成采用美国 NASA 的火星无人探测车的立体视觉技术，因此该车也称为 MARS 采集系统[Earthmine, 2009]。目前该公司已经被 Nokia 收购，用于构建 Nokia 的基于网络的地图应用 Here 服务。

### 1.3.8 Topcon 公司的 IP-S2 系统

Topcon 公司的 IP-S2 激光扫描测量系统（如图 1.9 所示），该系统由一台 Ladybug 全景相机、3 台 SICK 激光扫描仪和 POS 系统构成。



图 1.9 Topcon 公司的 IP-S2 激光扫描测量系统

该系统集成度比较高，相机、激光扫描仪和惯导系统都集成在一起，可以方便地在车顶安装和拆卸。该系统是一个全景成像与激光扫描相结合的系统，系统软硬件集成度比较高，国内已有几家单位采购。

### 1.3.9 LD2000-R 型系列移动道路测量系统

武汉立得空间信息技术有限公司在武汉大学的支持下自主开发的 LD2000-R 型系列移动道路测量系统（如图 1.10 所示），是国内首套具有世界先进水平的车载移动道路测量产品。该系统综合应用了 GPS 全球定位、INS 惯性定位定姿、CCD 立体视频以及自动化控制和集成等多种技术，以车载非接触的方式，实现了对道路及道路两旁地物的空间几何数据、属性数据的快速获取。采集的海量数据通过专用软件加工，可生成能满足不同用户需要的三维空间数据库、专题图及电子地图。



图 1.10 LD2000-R 型移动道路测量系统

武汉立得空间信息技术有限公司是国内最早开展车载移动测量系统技术研发和应用的单位，该公司的车载移动测量系统以多路立体图像测量系统为主，系统应用主要面向数字城管、城市部件普查及数字城市。

## 1.4 车载移动测量系统常见模式

从 1.3 节的国内外车载移动测量系统情况来看，无论是高等院校，还是商业公司，都花费了相当多的人力、物力和财力对车载多传感器集成系统进行了积极的探索和研究，探讨应用的场合和环境，推广该技术在各行业中的应用。

按照系统配置的传感器和基本测量原理分，常见车载多传感器集成的移动测量系统的典型模式有：

### 1.4.1 影像+激光扫描+GPS/IMU 方案

GPS/IMU 作为定位定姿模块，激光扫描仪作为三维地物采集的直接手段，相机影像用于地物分类和纹理贴图，比如 RIEGL 公司的 VMX-250，Trimble 公司的 MX8。

该类系统方案依赖激光扫描作为测量手段，主要应用于高速公路的维护、道路表面评估、交通基础设施测图、城市建模、隧道断面测量等领域。

### 1.4.2 立体影像+GPS/IMU 方案

GPS/IMU 作为定位定姿模块，布置向前、向左和向右三对相机用于立体测量，可以安装激光扫描仪，用于直接测量，比如武汉立得空间信息技术发展有限公司自主开发的 LD2000-R 型系列移动道路测量系统[立得空间，2013]。

该类系统实现了对道路及道路两旁地物的空间几何数据、属性数据的快速获取，以系列影像的立体摄影测量技术为基础，主要应用于数字城市建设。

### 1.4.3 全景影像+激光扫描+GPS/IMU 方案

GPS/IMU 作为定位定姿模块，布置 360° 全景相机用于全方位道路影像采集，安装激光扫描仪，用于直接测量，例如 Google 公司的全景相机。该类系统的特点是具有全方视角，可以生产全景影像及测量激光点云，将激光点云和全景影像融合可以进行全景或激光点云发布、城市三维测量与建模等工程应用。

## 1.5 车载移动测量系统发展趋势

通过移动测量技术国内外发展及车载移动测量常见模式可以看出，在早期的车载移动测量系统的研究中，由于传感器种类较少且性能比较低下，系统测量精度收到了一定的限制，因此也限制了系统的应用和推广。

随着社会发展进步，现代城市及基础设施建设发展日新月异，对城市基础数据获取产生了快、广、精、真的需求，即：

快：城市快速发展要求地理空间信息更新快。

广：城市地理空间信息应用需求广泛、类型多、信息丰富。

精：精度高、品质高。

真：真实表现 360° 范围内现场真实场景。

随着社会需求的不断增加、需求层次的不断提高，建立与城市发展相适应的测绘保障体系显得尤为重要。随着硬件设备等相关技术的进步，出现了更多新型的、高性能的传感器，这就为车载多传感器集成系统提供了基本的技术保障，也使得车载多传感器集成系统进一步朝集成化、高性能以及智能化方向发展。

## 1.6 本文研究主要内容

本论文研究目的是在深入研究车载移动测量系统集成关键技术三维激光扫描技术、全景成像技术以及 GPS/IMU 组合定位定姿技术等当前信息技术发展的前沿技术的基础上，从更高层次和一体化的角度研究了车载移动测量系统的集成，解决城市快速发展所面临的空間信息更新慢、空間信息精度不高等问题，满足城市快速发展快、广、精、真的需求。

主要研究内容如下：

### 1) 车载多传感器软硬件集成技术研究

对车载系统的核心支撑设备和关键技术进行研究，设计面向城市测量、面向空间信息采集与发布及基于立体影像的移动测量系统硬件集成方案和软件集成方案，并在研究过程中完成对应系统的构建。

### 2) 车载多传感器实时同步数据采集技术研究

详细分析了 GPS 时空特性、多传感器的时空特性和各种传感器同步控制方法，提出了同步 GPS 同步时钟控制原理，并基于此设计车载同步控制器硬件，设计并实施整个系统的时空同步控制及同步数据采集方案。

### 3) 车载移动测量三维测量技术研究

研究 DGPS/INS 组合定位定姿在车载系统中的应用方法，并就 DGPS/INS 不同解算方法、不同精度惯性测量单元和不同基线距离下定位定姿精度做深入的实验和分析；分析并研究基于立体影像的三维相对测量和绝对测量模型；研究

基于线扫描模式的车载激光扫描仪的工作原理、定位原理及点云重建模型；开发立体图像测量软件和激光点云生成软件验证该模型。

#### 4) 全景成像技术研究

研究全景采集系统的成像原理，重点研究面阵拼接全景影像生成的原理和算法流程，研发了具有自主知识产权的全景成像系统,为面向空间信息采集与发布系统提供了高分辨率和高色彩真实性的全景影像。

#### 5) 多传感器系统整体标定技术研究

研究立体影像测量系统标定模型、2D/3D 一体化扫描仪标定模型、2D 道路面扫描仪标定模型及全景影像采集系统和激光扫描系统的内外标定模型。利用建立的标定场提出的高精度室内外标定场，按照提出的标定流程，实现了车载三维测量系统的高精度标定和全景影像与车载点云的高精度配准。

## 1.7 本文结构

根据本论文的主要研究内容，本文结构安排如下：

第一章，介绍本文选题的背景和意义，阐述车载移动测量系统的技术支撑、国内外发展状况以及常见模式，并在此基础上提出本文的主要内容。

第二章，阐述车载移动测量系统的体系构架、核心设备、软硬件集成，重点论述了三种不同类型移动测量系统的硬件设计和集成，并归纳总结车载移动测量系统集成关键技术。

第三章，阐述车载多传感器实时同步采集技术。在分析 GPS 时空特性、多种传感器时空特性及多种传感器同步方法基础上，设计 GPS 同步时钟控制器，并详细分析系统核心设备的同步控制方法；最后实现车载移动测量系统中多传感器同步数据的采集。

第四章，论述车载移动测量系统中的三维测量技术。在车载移动测量系统中主要有 DGPS/INS 组合定位定姿技术；基于立体影像的三维测量技术和车载激光测量技术等。

第五章，研究全景成像技术，介绍研究开发的全景图像采集装置的结构、特点、优势以及全景影像生成原理，重点介绍基于特征匹配的投影矩阵计算方法、加权融合法以及全景影像批量生成过程。

第六章，研究车载移动测量系统的整体标定，分别阐述车载立体影像系统相对标定和绝对标定、2D/3D 一体化激光扫描仪的绝对标定、2D 路面激光扫描仪的绝对标定以及车载全景影像与激光点云的联合标定。

第七章，介绍论文研究的系统硬件及软件研究成果，并对车载移动测量系统的在工程中的应用和验证做阐述。

第八章，对本论文的研究内容进行总结，并列出了在车载移动测量领域未来研究方向。

## 1.8 本章小结

本章介绍了本文选题的背景和意义，阐述了车载移动测量系统的技术支撑、国内外发展状况以及常见模式，并在此基础上提出了本文的主要研究内容，并简要介绍了论文结构。

## 第2章 车载移动测量系统集成

车载多传感器集成系统是指一个基于 GPS/INS、LS、GIS、CCD 及其他多种传感器与技术集成的测量和信息采集移动 3S 集成平台。

该移动平台将全球定位系统(GPS/INS)、地理信息系统(GIS)、遥感(RS)进行有机的结合,实现实时、快速地提供目标空间位置,包括各类传感器和运载平台的空间位置;实时或准实时地提供目标及其环境的语义或非语义信息,发现地球表面上的各种变化,及时地对 GIS 进行数据更新;完成对多种来源的时空数据进行综合处理、集成管理、动态存取,为智能化数据采集提供地学知识。三者互为支撑溶于一体,将它们集成在车、船等交通工具上,可以实现定位、导航、实时测量[李德仁 2000]。

### 2.1 车载移动测量系统的体系构架

车载移动测量数据采集、处理及应用系统的体系构架如下:

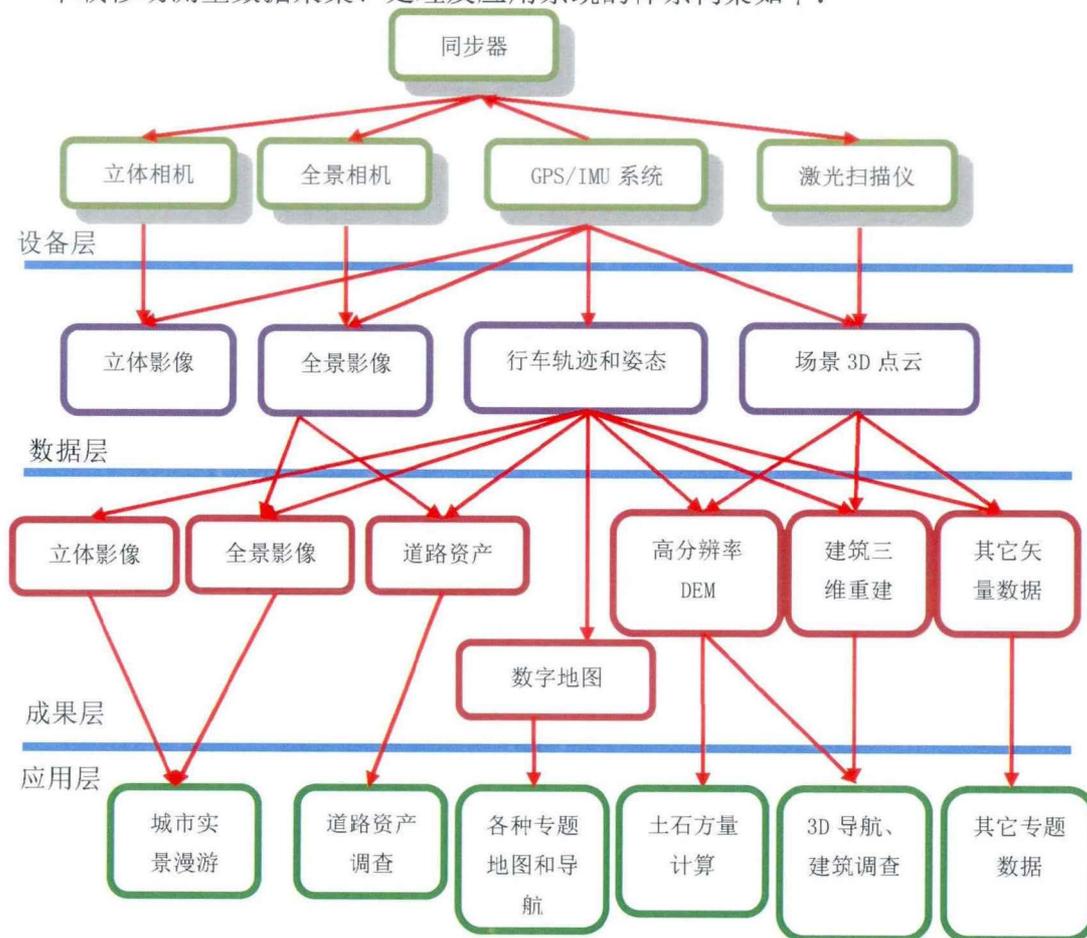


图 2.1 车载移动测量系统体系架构

随着多种新型高性能智能化传感器的出现和性能提高，出现了多种类型的车载移动测量系统。立体影像、360 度全景影像、激光扫描与组合惯性定位定姿相结合的移动测量平台是一种非常典型的车载测量系统。

车载移动测量系统的采集、处理及应用体系结构分为 4 个层次：设备层、数据层、成果层和应用层。

**设备层**为车上数据采集硬件设备，包括作为时间和空间基准的 POS 系统、用于获取影像数据的全景相机、以及能直接得到 3D 集合信息的激光扫描仪。

**数据层**为通过设备直接采集或经过简单处理后得到的数据。其中，POS 系统能恢复高精度的行车轨迹和高采样频率的位置和姿态数据。定位定姿数据能用于标注全景影像位置和方位，同时它也是拼接和融合多个激光扫描仪数据而得到 3D 点云的时间和空间基准。

**成果层**是在数据层的基础上得到的感兴趣的信息。全景影像本身即作为一种可视化输出成果，也可通过它得到一些属性信息（如路面标识和 POI-Point of Interest 等）；高精度的行车轨迹可作为数字地图，用于更新路网等；而点云包含了大量的物理尺寸信息，可构建高分辨率的路面和路旁的 DEM，也可构建三维的建筑模型，以及其它诸如电力线、电杆和其它附属设施的定位调查等。

**应用层**是对成果的应用。不同的行业有不同的需求和具体应用。例如全景影像可直接用于城市街景的实景漫游和实景导航；在全景影像上获得的街道广告位普查；以及基于高分辨率 DEM 的道路改道、维修的土石方量计算；或基于 3D 建筑模型的街道拆迁、还建量估算等等。

## 2.2 车载移动测量的系统核心设备

### 2.2.1 组合定位及定姿传感器

定位及定姿系统由双频 GPS 天线、基站双频 GPS 接收机、流动站双频 GPS 接收机、惯性测量单元(IMU)及里程编码器(Odometer)构成。其核心部件是 GPS 和 IMU，GPS/IMU 定位及定姿组合系统工作时需要采集基站双频 GPS 数据、流动站双频 GPS 数据、与流动站双频 GPS 做时间同步的高频率的惯性测量单元数据及辅助定位的里程编码器数据。这些数据经 GPS 差分处理、与惯性数据耦合集成处理后，得到车辆高频率的绝对位置和载体姿态数据。

Applanix 系列 GPS/INS 系统尽管具有良好的精度，但由于价格昂贵且常常受到进口限制，在国内的移动测量系统研究与开发中使用较少。

NovAtel 的 Span 系列 GPS/INS 系统具有良好的性价比和可获得性。



a NovAtel Span-CPT 组合惯导



b NovAtel SpanSE/LCI 组合惯导

图 2.2 NovAtel Span 系列组合惯导

NovAtel 的 Span 系列主要指标如下表。

表 2.1 SPAN 系列惯性组合系统性能

	SPAN-CPT[NovAtel,2008]	SPANSE/LCI[NovAtel,2011]
单点 L1	1.8 m RMS	1.5m RMS
单点 L1/L2	1.5 m RMS	1.2m RMS
DGPS	0.45 m RMS	0.4m
速度精度	0.02 m/s RMS	0.01 m/s RMS
横滚	0.05° RMS	0.005° RMS
俯仰	0.05° RMS	0.005° RMS
航向	0.1° RMS	0.008° RMS
时间精度	20 ns RMS	20 ns RMS
IMU 性能		
陀螺输入范围	±375°/s	±800°/s
陀螺偏差	±15°/s	±0.3°/s
陀螺偏差稳定性	±1°/hr	/
陀螺刻度因子	1500 ppm	100 ppm
角随机游走	0.0667°/√hr	0.05°/√hr
加速度计量程	±10 g	±40 g
加速度计偏差	±50 mg	<1.0 mg
加速度计偏差稳定	± 0.75 mg	/
加速度计刻度因子	4000 ppm	250 ppm

SPAN-CPT 是一个入门级的惯性组合系统，它的精度比较低，每小时角度漂移达 15°，它只能满足一些基本的定位定姿需求。

SPANSE/LCI 是一个高精度惯性组合系统，其中 IMU-LCI 属于战术级惯性测量单元，由 Norhrop-Grumman Litel 公司生产。NovAtel 用户可以很容易地将 IMU 连接到 SPAN 功能接收机上，如 SPAN-SE 接收机。

Inertial Explorer 是 NovAtel 公司的 Waypoint 系列软件产品，它提供的强大的、可配置度高的处理引擎，利用所有可用的 GNSS 数据来提供高精度的 GPS/INS 导航信息。软件同样具有多种质量控制特性，所以输出结果的定位定姿结果质量良好。

软件基准站数据下载功能可以利用上千个公共可用的、连续工作的参考站数据来实现精密单点定位 (PPP) 功能。这样可以满足众多没有基准站的应用需求。Inertial Explorer 可以从 NovAtel 的 SPAN 系列 GNSS/INS 系统中导入数据，同样可以导入多种接收机产品的 GNSS 数据，并具有一系列 IMU 产品数据导入功能。当数据处理完成后，可以以多种输出格式输出处理结果。

SPAN-SE/LCI 系统后处理精度见下表。

表 2.2 GNSS 中断后 SPANSE/LCI 系统性能表

中断时间	定位模式	位置误差(m)RMS		速度误差(m/s)RMS		姿态误差(度)RMS		
		水平	垂直	水平	垂直	横滚	俯仰	方位
05	RTK	0.020	0.050	0.020	0.010	0.007	0.007	0.018
	HP	0.100	0.080	0.020	0.010	0.007	0.007	0.018
	SP	1.200	0.600	0.020	0.010	0.007	0.007	0.020
	PP	0.010	0.015	0.010	0.010	0.005	0.005	0.008
106	RTK	0.070	0.060	0.022	0.010	0.007	0.007	0.018
	HP	0.280	0.280	0.024	0.011	0.008	0.008	0.022
	SP	1.660	1.170	0.024	0.012	0.008	0.008	0.025
	PP	0.010	0.020	0.010	0.010	0.005	0.005	0.008
606	RTK	1.670	0.480	0.061	0.015	0.009	0.009	0.021
	HP	1.740	0.530	0.063	0.015	0.009	0.009	0.025
	SP	2.460	1.330	0.066	0.015	0.009	0.009	0.026
	PP	0.110	0.030	0.015	0.015	0.006	0.009	0.010

从表上可以看出，在 GNSS 良好的时候，系统的定位定姿精度非常高，但在 GNSS 中断以后，系统精度下降非常快。例如在 RTK 模式下，GNSS 信号良好的时候，水平精度为 0.020 米，在 GNSS 信号中断 10 秒后，水平精度下降为 0.070 米，在 GNSS 信号中断 60 秒后，水平精度下降到 1.670 米。

在表中同样可以看出，基站后处理的方式(PP-PostProcess)相对于其它方式，精度下降的速度相对较慢，在 GNSS 信号中断 10 秒后，水平精度下降为 0.010 米，在 GNSS 信号中断 60 秒后，水平精度下降为 0.110 米。这是由于 Inertial Explorer 松/紧耦合处理引擎可利用所有可用的 GNSS 数据来提供高精度的 GPS/INS 导航信息。GNSS/INS 紧耦合处理利用 GNSS 观测数据，在即使只有 2 颗卫星信号不能形成有效 GNSS 定位时，也可以约束误差增长，计算出定位定姿结果。因此，在需要获得高精度测量结果的场合，必须采用架设基站做后处理的方式来利用 GPS/INS 系统的定位定姿数据。

作为车载移动平台中最重要的一类传感器 GPS/INS，辅以车辆里程计 (Odometer)，它主要的作用在三个方面：

(1) GPS/INS 中的实时 GPS 信号以及 GPS 与 IMU 实时或后处理结果将作系统的时间基准和空间基准，为此该设备在车载多传感器集成的移动测量系统中处于核心地位；

(2) 实时提供并记录车辆的运行轨迹和姿态，利用这些信息可以建立道路网的基础数据，如道路线、道路坡度、转弯半径等；

(3) GPS /INS 集成后处理数据，为安装于车辆上的其他各测量型传感器提供位置和姿态信息。

### 2.2.2 图像测量传感器

基于立体摄影测量系统包括多对百万像素以上的彩色工业 CCD 数字相机和其他纹理/属性相机。每对工业彩色数字 CCD 相机分别组成立体摄影测量单元，一般需要布置向前、向左和向右三对立体相机，对道路及道路两旁地物进行拍照。由工业彩色数字 CCD 相机组成立体近景摄影测量单元是早期车载移动测量系统平台上安装的重要测量传感器。在车辆运行的过程中，它以同步的方式连续采集集道路及道路两旁的立体影像，基于立体摄影测量的原理可以对每一组像片中地物进行相对测量；利用 GPS/INS 提供的位置和姿态信息，可以完成地物的绝对坐标点量测和其他几何信息量测。



图 2.3 工业数字 CCD 相机

表 2.3 工业数字 CCD 相机主要性能

项目	piA2400-12gc [Basler 2009]	FL2G-50S5M/C [PiontGrey 2010]
分辨率	2454 x 2056	2448 x 2048
图像芯片	Sony ICX625ALA/AQA	ICX655 HAD/SuperHAD CCD
光学面阵尺寸	2/3"	2/3"
像素尺寸	3.45 $\mu\text{m}$ x 3.45 $\mu\text{m}$	3.45 $\mu\text{m}$ x 3.45 $\mu\text{m}$
帧速	12fps	7.5fps
接口	Gigabit Ethernet	1394b
AD 颜色深度	12bits	12bits

控制模式	外触发、软件	外触发/自由模式
曝光控制	编程	自动/手动/编程
尺寸	86.7 mm x 44mm x 29 mm	29mm x 29mm x 30mm
供电	12-24V DC 5.4W	8-30V DC 2.5W

获得良好影像和测量精度，关键是选择合适的图像传感器。在在重点考虑影像质量和分辨率的同时还要考虑到相机的帧速、控制模式、曝光模式等等因素。在面向城市测绘的移动测量系统集成中，研制的全景成像相机中采用 PointGrey 公司的紧凑型 500 万像素面阵彩色工业 CCD 图像传感器；在基于立体测量的移动测量系统集成中，采用了 Balser 公司的 500 万像素的面阵彩色工业 CCD 相机。由于工业相机时序严格、可控性高、稳定可靠，在车载移动测量系统中常常会用此类相机采集实时同步系列影像。

### 2.2.3 激光扫描雷达

激光扫描雷达 (LIDAR) 是车载移动测量系统中主要的测量设备，由于激光测量精度高、速度快、直接形成测量结果，作为车载移动平台中传感器的一类，激光扫描仪正快速成为一种三维空间信息的实时获取手段。

在基于立体测量的移动测量系统中，激光扫描雷达测量子系统由二台激光扫描仪 (Sick LMS221) 构成。

在面向空间信息采集与发布的移动测量系统中，激光扫描雷达测量子系统由三台 2D 激光扫描仪-SICK LMS511 构成。



图 2.4 SICK 二维激光扫描仪

SICK 二维激光扫描仪是最早进入国内外市场的扫描仪之一，由于该扫描仪稳定可靠和性价比高，常常被移动测量系统厂家选用，作为激光扫描测量传感器，如 Google 的街景数据采集系统和 Topcon 的 IPS2 移动测量系统，使用了

SICK LMS291 扫描仪，本论文研究中使用的 LMS511 是 LMS291 的改型版本，技术参数有所提升。SICK 扫描仪的技术参数表 2.4 所示。

表 2.4 SICK 扫描仪系统性能

项目	LMS221[Sick, 2005]	LMS511[Sick, 2011]
扫描角度	180 度	190°
扫描频率	25HZ-75HZ 分级可调	25HZ-100HZ 分级可调
角分辨率	0.25°-1.0°分级可调	0.167°-1.0°分级可调
扫描范围	80	80m
扫描精度	35mm	24mm
多次回波	无	有
激光等级	Class 1	Class 1
数据接口	RS422	以太网/CAN/RS422/232
I/O 接口	开关量输出	开关量输入输出
工作温度	-30°~50°	-30°~50°
存储温度	-30°~50°	-30°~70°
电源电压	24V	24V

在面向城市测绘的移动测量系统中，激光扫描雷达测量子系统由一台 2D/3D 一体化激光扫描仪 VZ-400 和一台 2D 激光扫描仪 LMS-Q120i 构成。2D/3D 一体化激光扫描仪 VZ-400 用于道路及两旁地物扫描测量，2D 激光扫描仪 LMS-Q120i 用于道路面扫描测量。

Riegl 系列扫描仪是国际上非常先进的激光扫描仪，由于该系列扫描仪扫描精度高、距离远，分辨率高而且工艺良好，设备稳定可靠，尽管具有相对较高的价格，但还是被移动测量系统厂家和研究单位采用，用于构建高性能的车载激光扫描测量系统。



a VZ-400 扫描仪



b LMS-Q120i 扫描仪

图 2.5 Riegl 激光扫描仪

以 Riegl 系列扫描仪为核心测量传感器的移动测量系统，往往是中高端的移动激光扫描测量系统，如 RIEGL 公司的 VMX-250 移动测量系统和 IGI 公司的 StreetMapper 移动测量系统，使用了 Riegl-Q250 扫描仪和 Riegl-LMS Q120i 扫描仪，本论文研究中使用了 Riegl-VZ400 扫描仪和 Riegl-LMS Q120i 扫描仪。这两款激光扫描仪的技术参数如下表。

表 2.5 激光扫描仪各项技术指标

技术指标		RIEGL VZ-400		RIEGL LMS-Q120i
扫描频率		远距模式	高速模式	30KHz
		100KHz	300KHz	
测程	$\rho \geq 90\%$	600m	350m	150m (>10%)
	$\rho \geq 20\%$	280m	160m	
最近距离		1.5m	1.5m	2m
精度		5mm(1 $\sigma$ ,100m)	5mm(1 $\sigma$ ,100m)	20mm(1 $\sigma$ ,50m)
重复精度		2mm	2mm	15mm
测量速度		42000 次/秒	125000 次/秒	10000 次/秒
扫描帧速		3-120fps	3-120fps	5-100fps
测角分辨率		0.0024°	0.0025°	0.01°
垂直视场角		100°	100°	80°
水平视场角		360	/	/
激光等级		Class 1		Class 1
同步方式		GPS PPS 和 RS232 Time String		GPS PPS 和 UDP Time String

由上表可知，论文研究项目中使用的 Riegl 扫描仪具有非常高的扫描速度、密度和精度，这是移动测量系统提供高质量测量成果的重要保证。同时方案中选用的 VZ-400 扫描仪是一套 2D/3D 一体化的扫描仪，基于这个特性，可以设计动静态一体化的城市测量方案，满足不同精度、不同场合的使用需求，并扩大系统的应用范围。

二维或三维的激光扫描系统能够快速以非接触的方式获取目标的高密度和高精度三维空间点云数据，它有效地拓宽了测量数据来源，提高了目标测量自动化程度。二维或三维激光扫描仪提供以仪器中心为原点的系列相对测量点坐标数据，相对测量由仪器自动完成，无需人工干预；利用 GPS/INS 提供的高频位

置和姿态数据，这些相对测量点云坐标数据就可以利用激光扫描系统绝对标定的参数和数学模型，转换成具有全球地理描述能力的绝对坐标数据。

## 2.3 车载移动测量中的坐标系统

在上面所列出来的系统设备中，组合定位定姿系统是绝对定位传感器；由图像传感器组成的立体相机和激光扫描仪是相对测量传感器，各个传感器都有各自不同的坐标系定义，各传感器的测量都是基于自身的传感器坐标系下进行的。

在车载移动测量系统中涉及到多种坐标系，包括激光扫描仪坐标系（ $LS$ 系）、地心惯性坐标系（ $i$ 系）、载体坐标系（ $b$ 系）、地球坐标系（ $e$ 系）、高斯平面坐标系（ $M$ 系）、当地水平坐标系（ $l$ 系）等。地心惯性坐标系（ $i$ 系）、地球坐标系（ $e$ 系）、当地水平坐标系（ $l$ 系）以及载体坐标系（ $b$ 系）的关系如下图所示 2.6 所示。

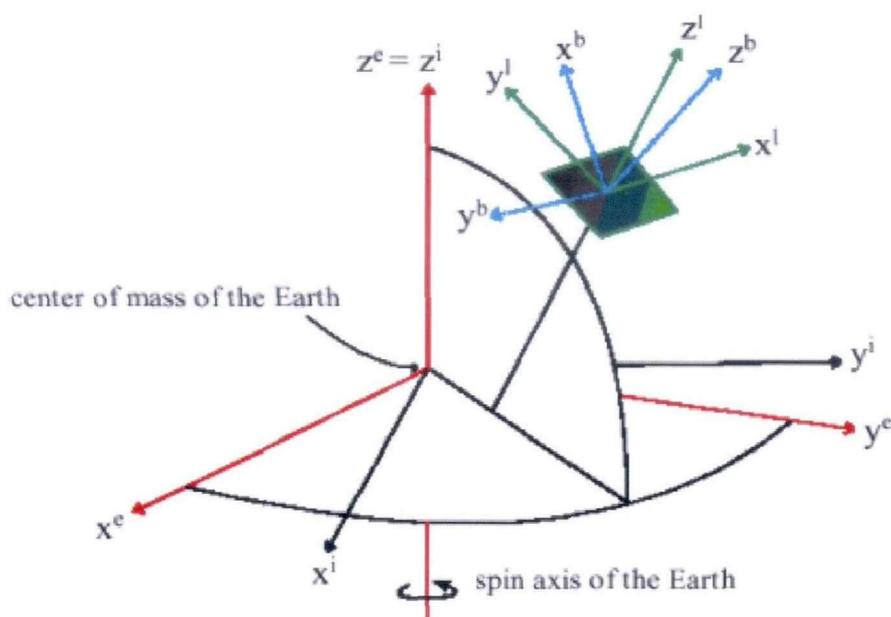


图 2.6  $e$ 系、 $i$ 系、 $b$ 系以及 $l$ 系之间的关系

### 1) 地心惯性坐标系（ $i$ 系）

地心坐标系并不是一个严格的惯性坐标系，但是在近地空间的导航中，可以近似的把地心坐标系看做是惯性坐标系。该坐标系以地球质心为原点以地球自转轴为  $Z$  轴，平均赤道面内指向平春分点的直线为  $X$  轴， $Y$  轴垂直于  $Z$  轴和  $X$  轴，并形成右手坐标系。地心惯性坐标系不直观，在实际的应用中使用较少，它主要用来做惯性导航计算。

## 2) 地球坐标系 ( $e$ 系)

地球坐标系指地心地固坐标系，该坐标系的原点位于地球质心，以地球自转轴的方向为  $Z$  轴， $X$  在平均赤道面内指向零度子午线，以右手坐标系方式确定的垂直于  $Z$  轴和  $X$  轴的坐标轴为  $Y$  轴，在测量领域中，地心地固坐标系得到广泛的应用，其中，WGS84 坐标系是最常用的地心地固坐标系，由于在地心地固坐标系下进行计算比较方便，在组合定位定姿领域中，地心地固坐标系是常用坐标系。

地心地固坐标系和地心惯性坐标系仅在  $Z$  轴上存在一定的旋转角，其旋转矩阵表示为：

$$R_e^i = \begin{bmatrix} \cos wt & -\sin wt & 0 \\ \sin wt & \cos wt & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

其中， $t$  为时间， $w$  为地球自转角速度。

## 3) 当地水平坐标系 ( $l$ 系)

也称导航坐标系、地理坐标系，惯性测量单元 IMU 中心为其原点，参考椭球的子午圈方向、卯酉圈方向和法线方向为三个坐标轴方向，由于坐标轴选取顺序和指向的不同有东北天 (ENU) 和东北地 (NED) 等多种形式。 $l$  系在导航领域使用较多，只要运动点的大地坐标确定，即可得到  $e$  系和  $l$  系的转换关系：

$$R_e^l = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \\ \cos \varphi \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda & \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

## 4) 载体坐标系 ( $b$ 系)

在车载移动测量系统中，以 IMU 坐标系作为载体坐标系，在本文中，IMU 坐标系与载体坐标系指同一个坐标系，不再进行区分。

载体的姿态可以用载体坐标系到当地水平坐标系旋转的欧拉角，如果把旋转顺序定义为航向 (Heading, Yaw)、俯仰 (Pitch)、翻滚 (Roll)，载体坐标系的 XYZ 坐标轴定义为向右为  $X$ 、向前为  $Y$ 、向上为  $Z$ ，当地水平坐标系定义为向东为  $X$ 、向北为  $Y$ 、 $Z$  轴与  $XY$  平面垂直并构成右手坐标系，则载体坐标系到水平坐标系的转换关系为：

$$R_b^L = \begin{bmatrix} \cos r \cos y - \sin r \sin y \sin p & -\sin y \cos p & \cos y \sin r - \sin y \sin p \cos r \\ \cos r \sin y + \cos y \sin p & \cos y \cos p & \sin y \sin r - \cos y \sin p \cos r \\ -\cos p \sin r & \sin p & \cos p \cos r \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

其中， $y$ 、 $p$ 、 $r$  分别代表航向角、俯仰角以及翻滚角。

#### 5) 高斯平面坐标系 (M系)

平面坐标系是利用投影变换，将空间坐标按照指定的变换公式投影到平面上，这样的变换主要有 UTM (Universal Transverse Mercator)、Lambert 和高斯-克吕格 (Gauss-Kruger) 投影，我们国家采用的是高斯-克吕格投影。高斯平面坐标是球面坐标经过高斯投影后的平面表达，高斯平面坐标系以中央经度与赤道的交点为坐标原点，向东为 Y 轴，向北为 X 轴，该坐标系是左手系。

#### 6) 激光扫描仪坐标系 (LS系)

不同的激光扫描仪对坐标系的定义可能不同，一般来说，激光扫描仪在 XZ 平面内发射激光束进行扫描，Riegl VZ400 以及 FARO Focus 3D 的坐标系定义如下图 2.7 所示。

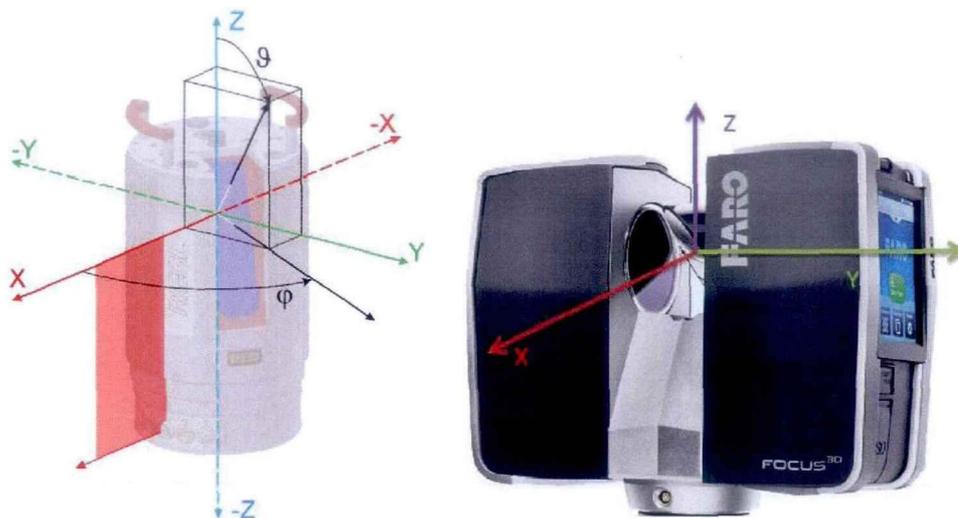


图 2.7 激光扫描仪坐标轴指向 (左图: Riegl VZ400 右图: FARO Focus 3D)

## 2.4 车载移动测量系统关键技术

基于多传感器的车载移动测量系统集成关键技术主要有:

- \*车载移动测量系统硬件集成技术
- \*多传感器实时同步数据采集技术
- \*多传感器大量数据的快速存储
- \*基于立体影像的三维测量技术

- \*全景成像技术
- \*车载激光扫描三维测量技术
- \*DGPS/INS 组合定位和定姿
- \*多传感器系统整体标定
- \*集成数据处理理论及技术等等。

在本论文中，主要针对车载移动测量系统硬件集成技术、多传感器实时同步数据采集技术、基于立体影像的三维测量技术、车载激光扫描三维测量技术、全景成像技术、DGPS/INS 组合定位和定姿及多传感器系统标定，作更详细的研究和论述。

## 2.5 车载移动测量的系统硬件集成

完整车载移动测量系统由安装于不同位置的硬件及软件构成。系统硬件主要包括基于 GPS/IMU 的高频定位及定姿传感器、由数字图像传感器组成的立体测量单元、全景相机、纹理或景观相机、二维或三维激光扫描仪、GPS 同步控制单元、多台计算机、电源和温控单元、测量设备安装架及操作平台元等等。

根据车载移动测量系统的应用要求不同，可以有不同的设计及采用不同功能的传感器。车载移动平台集成不同类型和功能的多种传感器以适应不同测绘及信息采集目标的需要。

### 2.5.1 面向城市测绘的移动测量系统设计

现代城市及基础建设发展日新月异，对城市基础数据获取产生了快（地理空间信息更新快）、广（应用需求广泛，类型多，信息丰富）、精（精度高，品质高）、真（数据反映最新的真实场景）的需求。

对一个快速发展的城市来说，建立与城市发展相适应的测绘保障体系，显得尤为重要。基于改造传统测绘手段、提升测绘服务效率和品质的需求，宁波市测绘设计研究院提出车载全景成像与激光扫描城市测量系统研建与开发目标。

在以往的车载移动测量系统的研究中，由于传感器种类较少且性能比较低下，传感器的集成对于系统研究、设计及实现而言并不成熟，在理论和技术上具有很大的挑战性。随着社会需求的不断增加、需求层次的不断提高以及硬件设备等相关技术的进步，出现了更多新型的、高性能的传感器，这就为车载多传感器集成系统提供了基本的技术保障，也使得车载多传感器集成系统朝着进一步集成化、高性能以及智能化方向发展。

基于现实需要和目前的技术支撑，本研究设计、集成全景成像与激光扫描的移动测量车一辆，该测量车安装有高精度的激光雷达设备用于获取地面点云，安装有全景相机用于同步获取高分辨率全景影像，同时集成了车载高精度的GPS/INS 系统用于运载平台的实时或后处理的定位定姿以及为激光扫描测量系统和全景相机外方位元素。激光扫描仪还可方便拆卸和复位，作为静态地面使用的激光扫描仪，可以对车辆难以进入的地区或有更高精度要求的地物实施测量。

车载激光扫描与全景成像城市测量系统是一个多传感器集成的自动化数据采集系统，集成了新近发展的多种传感器，可以实时完成载体的GPS 定位、姿态解算、城市三维空间信息的激光点云数据及全景影像数据的采集，其系统主要由载体平台、传感器系统、控制系统、计算机系统以及电源系统组成，其中传感器主要有两种，一种是位姿传感器，包括GPS、惯性测量单元IMU 以及车轮编码器，以一定的采样频率获取移动测量系统的位置和姿态；另外一种为激光扫描测量和影像传感器，包括激光扫描仪、全景相机，其中利用激光扫描仪获取目标的三维几何信息，而全景相机则获取目标的纹理特征。车载全景成像与激光扫描城市测量系统总体构成如下图。

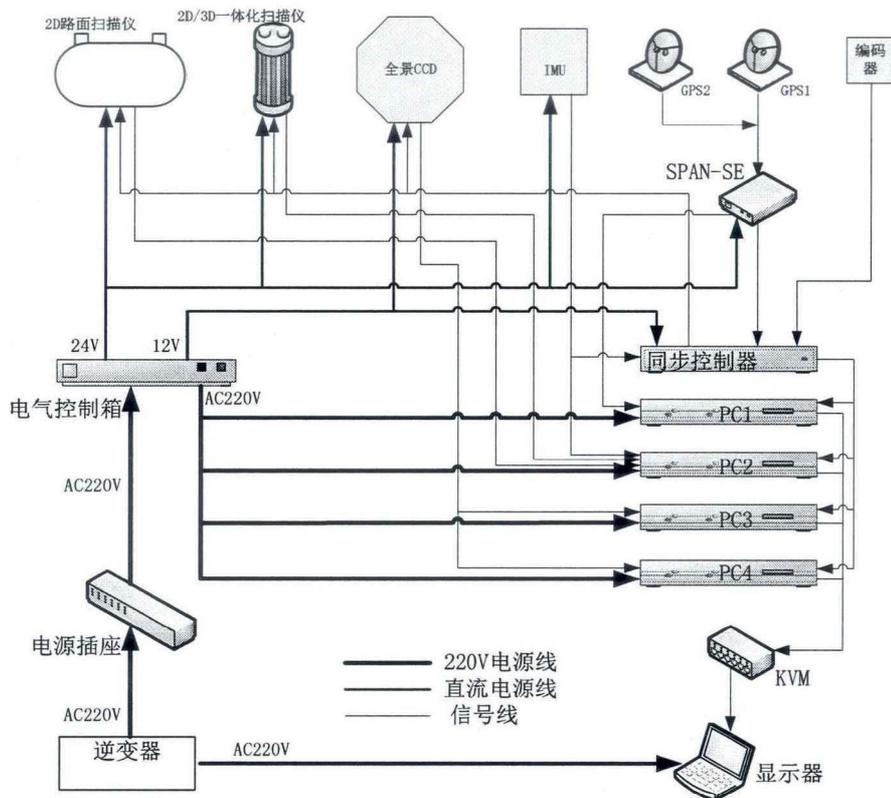


图 2.8 城市测量系统总体构成及连接关系

车载三维激光与全景影像测量系统由车顶平台、扫描测量传感系统、全景传感器、集成控制系统、定位定姿传感器、计算机系统、电源系统、机柜和车辆构成。车顶平台安装在汽车车顶，传感系统安装在车顶平台上，机柜安装在汽车后备箱内，电气控制系统、计算机系统、电源系统固定安装在机柜内；传感系统、控制系统和计算机系统分别通过信号线一一相连；电源系统分别为传感系统、集成控制系统、计算机系统供电。

**激光扫描传感器系统:**车载激光扫描与全景成像城市测量系统集成了 RIEGL 公司两种不同型号的激光扫描仪 2D/3D 一体化扫描仪 VZ-400 和路面 2D 扫描仪 LMS-Q120i。其中 RIEGL VZ-400 扫描仪安装在车体的右后侧，用于获取车辆两侧的目标点云信息；RIEGL LMS-Q120i 扫描仪安装在车体的后部，则主要用于获取地表面点云，从而实现三维空间信息和反射强度信息的获取。

**全景影像采集系统:**全景影像采集系统用于同步获取全景影像，全景提供丰富的场景纹理信息和点云数据处理所需参考信息。目前国内外科院校研制的车载移动测量系统多采用面阵 CCD 相机，获取序列影像用于实现测量定位或作为场景纹理信息。全景图像以一种超广角视野表达方式提供了比图像序列更直观、更完整的场景信息，可方便获取 360° 视角的真实场景影像，因此论文研究的车载激光扫描与全景成像城市测量系统采用全景相机获取场景纹理信息。全景影像采集系统由 8 个 CCD 相机构成，单个 CCD 传感器分辨率为 2454×2056，像素大小为 3.45um，其最大帧数可达到 17fps。

**高精度 POS 系统:**POS 系统主要用于测量扫描仪仪器中心的空间位置和扫描装置的空间姿态，其主要部分为 GP 接收机与惯性测量单元 IMU，同时辅以车轮编码器 (ODO) 提高 GPS 信号弱或者失锁状态下的定位定姿能力。为提高车载系统 GPS 定位的精度，采用差分定位 (DGPS) 的方式同步采集参考站与车辆流动站的观测数据，基站的 GPS 卫星星历、伪距观测值、以及载波相位数据与参考站的观测数据进行联合差分计算。惯性测量单元 IMU 由三轴陀螺仪、三轴加速度计以及计算机构成，其中陀螺仪测量车辆移动时的角加速度，加速度计测量车辆移动时三个方向上的线加速度，通过加速度时间积分获取角速度和线速度，二次积分获得车辆在某一时刻的坐标与姿态。

**集成控制系统:**不同的传感器类型具有不同的数据特性，故需要进行不同测量设备的同步控制和数据采集。集成控制系统主要用于从计算机系统时钟和 GPS 时钟中获取时间基准，控制激光扫描仪和全景影像采集系统的数据采集，实现异源数据的时间基准统一，从而能够将激光点云和全景影像由局部坐标系转换到绝对测量坐标系下。

**车顶平台：**车顶平台是安装激光雷达、全景相机、GPS 天线、惯性测量单元等设备的机械平台，它由固定在汽车车顶行李架上的平台框架，平台框架下方有减震装置构成。车顶平台要求安装方便、结构牢固、具有良好的刚度和抗震性，能各种道路情况下均能支撑激光雷达、全景相机稳定工作，保证了车载移动测量系统数据精度。

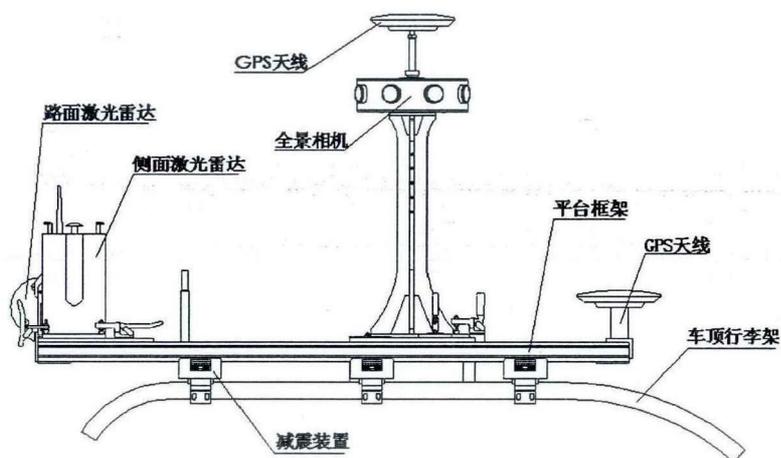


图 2.9 车顶平台设计图（侧视图）

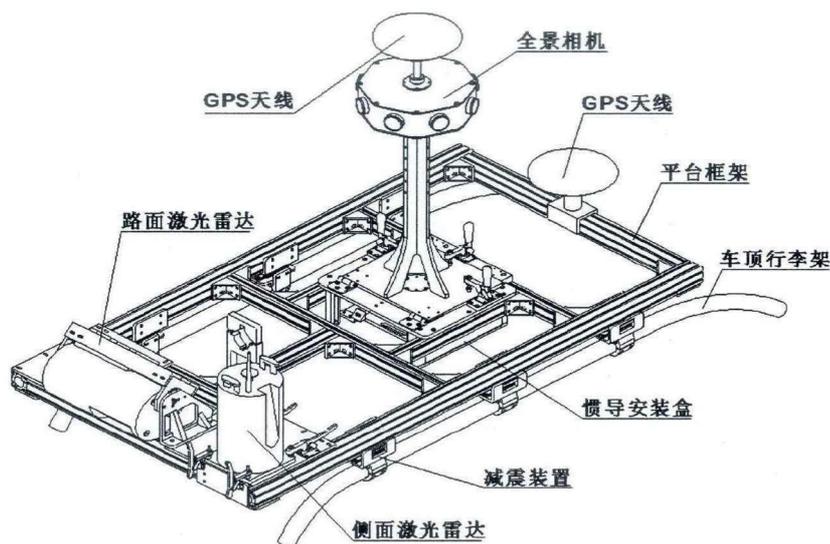


图 2.10 车顶平台设计图（轴测图）

车载激光扫描与全景成像城市测量系统整体设计如图 2.11、2.12 所示。

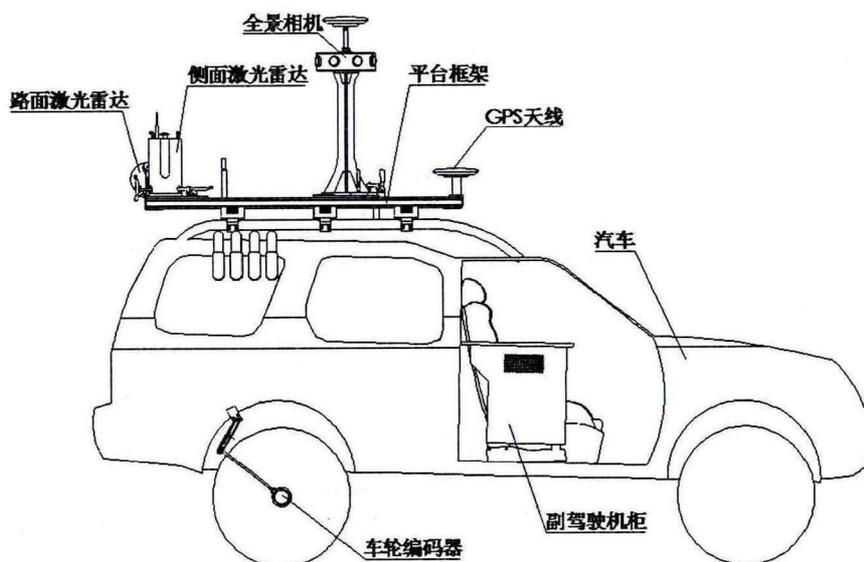


图 2.11 城市测量车整体设计图（侧视图）

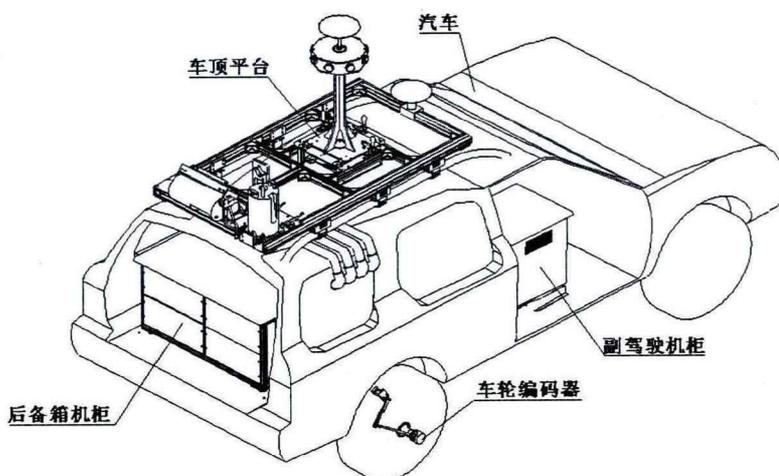


图 2.12 城市测量车整体设计图（轴测图）

在城市测量系统中，为保证动静态条件下的测量精度，设计稳定的光学、机械平台是车载移动测量系统硬件集成的关键，在面向城市测量的车载移动测量系统集成中，光、机平台的设计主要依照以下几个原则：

**平台的稳固性：**相对测量传感器（激光扫描、全景成像）和绝对测量传感器（惯性定位定姿系统）等设备必须牢固安装在车顶平台上，车顶平台不仅需要很好的强度，保证在长时间行车震动的过程中不发生永久变形，而且也要保持良好的刚度，保证惯性测量单元与激光扫描、全景成像之间相对位置和相对角度不会因为运动、受力发生变化。

**平台减震：**各个测量传感器和其他设备，尽管自身具备有一定的抗震能力，但由于车辆将在道路上长期行使，国内路况千差万别，这将给仪器带来强烈的冲击。因此在车辆顶部与平台的连接部位设计有柔性钢丝减震装置。钢丝减震装置会大大减低车辆在非稳定行使状态下的振动和冲击给仪器带来的损害。尤其对是像激光扫描仪这样的精密光学测量设备，尤为重要。

**模块化设计：**适用于城市测量的车载移动测量系统配置了高端的测量传感器，为提高设备的利用率，常常会把单独某个设备从系统中独立出来使用或临时安装在其他系统上使用，因此，需要反复拆卸的设备，要以模块化设计的方式集成到系统中，并且设计方便的拆装和复位装置，从而能够使设备临时快速移出系统使用，并能在能保证设备复位精度的前提下快速复位。

**动静一体一体化测量模式：**系统 VZ-400 扫描仪是一款高密度、高精度和高效 2D/3D 一体化扫描仪，通过编程控制它可以运行在 2D 线扫描模式和 3D 的 360° 扫描模式。为最大限度地利用该高端设备，提高测量系统在在城市复杂地理空间环境下的适用性，研究并设计了多种方式相结合系统激光扫描测量工作模式。即动态扫描模式、走停测量模式和分离测量模式。

动态测量模式是指激光扫描仪工作在 2D 线扫描模式，随着车辆的移动，扫描仪扫过道路两旁的地物，获得激光扫描点云，由 GPS/IMU 提供定位和定姿。在该模式下，车载测量系统快速移动，系统的外业工作效率非常高。

走停测量模式是指激光扫描仪在车顶上做三维扫描，在需要扫描车辆周围三维地物的时候，车辆停下来静止几分钟，通过程序控制扫描仪扫描做 360° 的三维扫描，扫描完以后车辆继续开往下一地点。在激光扫描仪做 3D 扫描的同时，可以继续采集 GPS/IMU 数据，在后处理中可以设定为静态解算模式，提高该点 GPS/IMU 定位定姿精度，从而提高系统的测量精度。

分离测量模式是指把扫描仪从平台上拆卸下来，搬到车辆不能到达的区域做扫描测量，比如小区的内部等地方。分离测量结果可通过控制点集成到车载扫描测量结果中。

## 2.5.2 面向空间信息采集与发布的车载系统设计

根据近地地理空间数据采集需求研制车载空间信息采集系统，该系统主要为面向行业用户及公众用户的空间信息发布平台提供激光点云和高分辨率全景图像基础数据。

本系统适用于多种市售汽车车型，系统由电源系统、副驾驶位操作平台、后备箱机柜、车顶平台以及全景相机、激光扫描仪、GPS/INS 组合导航系统、

车轮编码器等传感器构成。传感器的具体分布为：IMU 单元位于后备箱机柜居中位置，GPS 天线、激光扫描仪、高清全景相机安装在于车顶平台上。

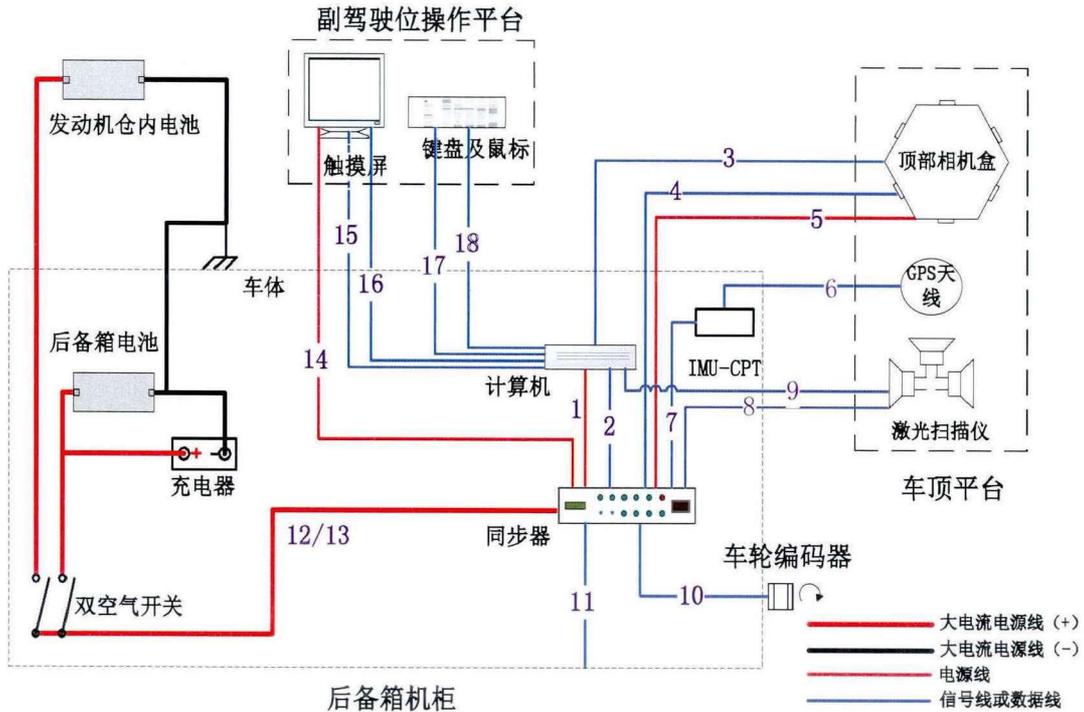


图 2.13 系统总体构成及连接关系

车顶平台的作用是各种测量设备的固定平台，其整体位于车顶行李箱内，通过底部铝合金板与车顶行李架固定。底部铝板上两根滑动导轨，圆柱支杆可通过滑动底座在导轨上滑动。圆柱支杆上可固定相机组合、激光雷达组合等测量、拍摄设备。设备正常工作的状态下，支杆立起并用左右两根撑杆固定；车辆通过限高处时可将支杆暂时倾斜，通过后复原；非工作状态下支架可倒伏在行李箱内，盖上行李箱盖，保护设备。

图 2.14 为车顶平台半倒状态示意图，图 2.15 为车顶平台工作状态结构示意图。

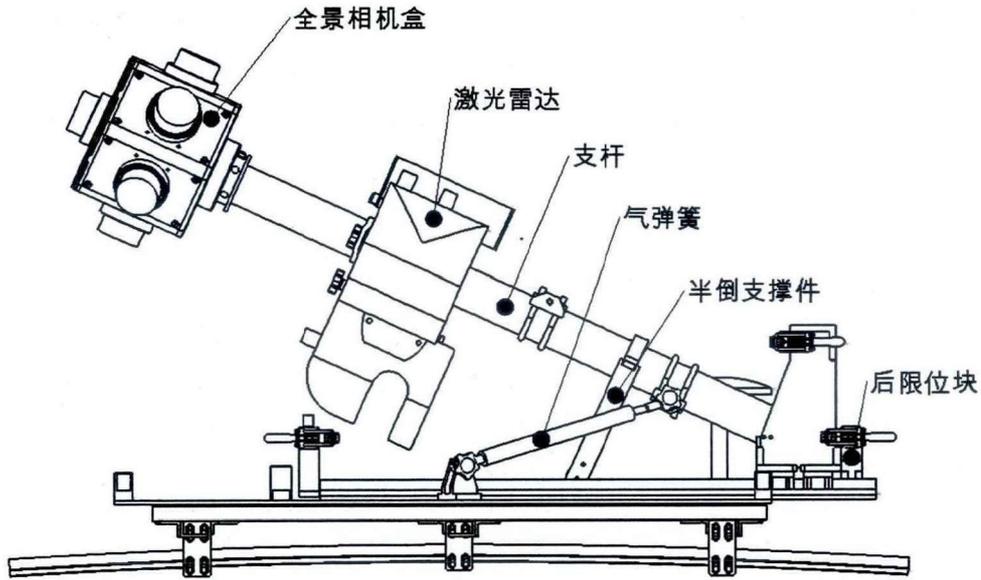


图 2.14 车顶平台结构示意图-半倒状态

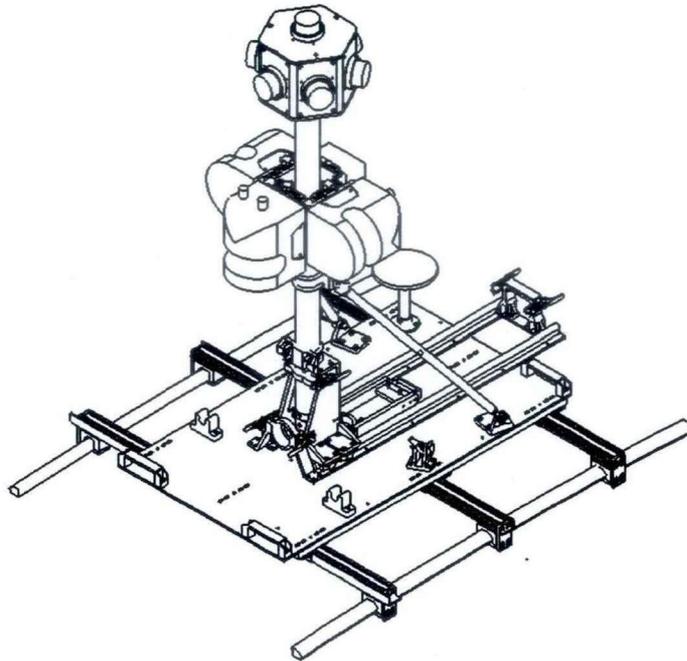


图 2.15 车顶平台结构示意图-工作状态

完成硬件集成后的车载系统如图 2.16、2.17 所示。

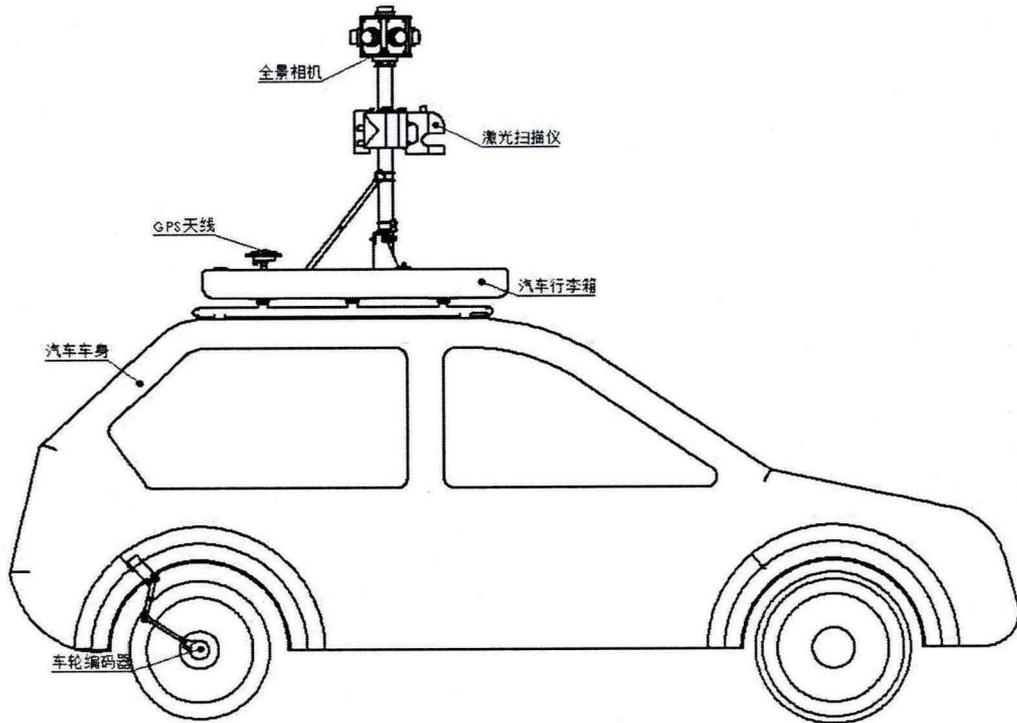


图 2.16 车载系统结构-正视

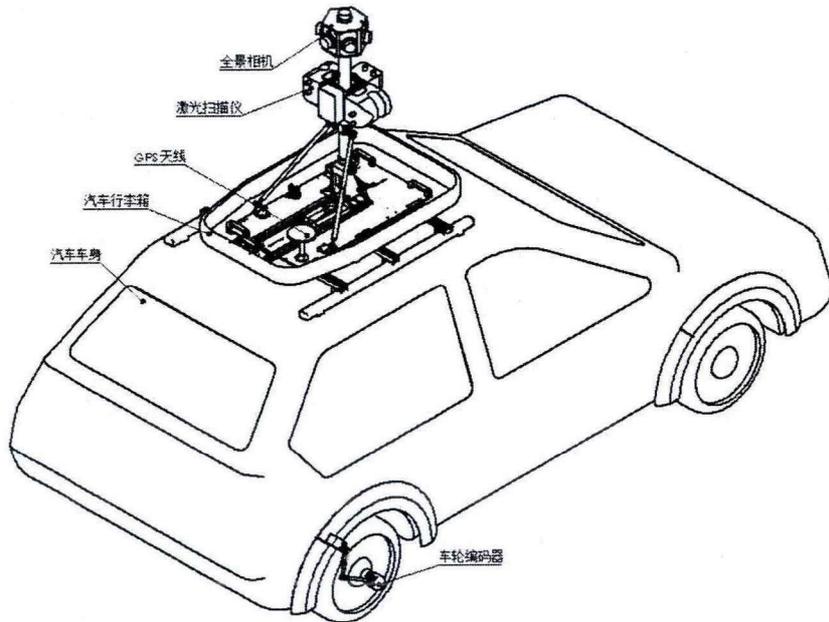


图 2.17 车载系统结构-轴测图

为使系统能在城市里的小巷、公园、自然风景区、学校、名胜古迹等汽车车载采集系统无法抵达的地方工作，特别研发了基于三轮车承载平台的移动测量系统。系统外观如图 2.18 所示。

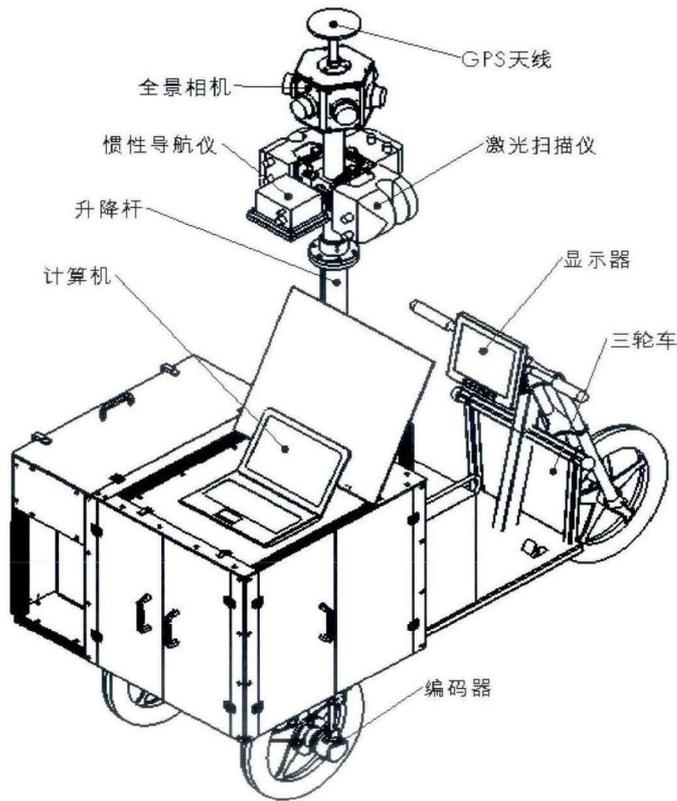


图 2.18 三轮车承载的测量系统示意图

乘用车平台和三轮车平台的激光扫描和全景成像移动测量系统安装的设备基本相同，都安装了高分辨率全景相机、三台激光扫描仪和 GPS/INS 系统。

### 2.5.3 基于立体测量的移动测量系统设计

基于立体测量的移动测量系统主要功能为采集道路及两旁地物的立体影像，系统能建立可量测实景影像库，为道路及附属设施的管理提供详实的基础数据。

系统可采用具有良好内部空间的商务车型改装，系统由电源系统、机柜、操作台、车顶平台、多对立体相机、2D 激光扫描仪、GPS/INS 组合定位定姿系统、车轮编码器等传感器构成。

系统的总体的构成及连接关系如图 2.19 所示。

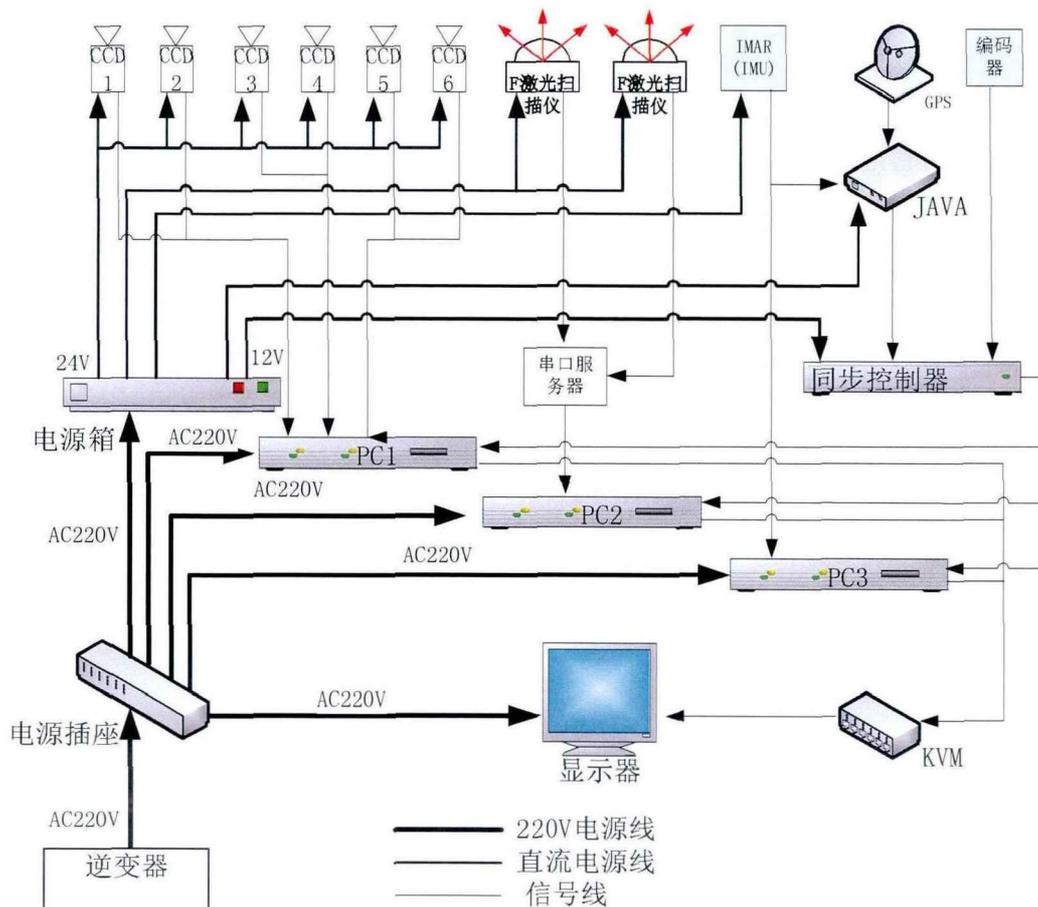


图 2.19 系统总体构成及连接关系

**立体测量相机：**系统设计了三套立体相机，分别向左 45° 布置 1、2 相机，向正前方布置 3、4 相机、向右 45° 布置 5、6 相机。相机为分辨率不低于 500 万像素的工业彩色 CCD 传感器；每套立体影像测量系统内两相机之间距离 1.4~1.6 米，形成测量基线；在三套立体相机安装车顶平台上面，同步采集道路左方、前方、右方的高分辨率影像。

**激光扫描仪：**在测量平台后端，安装有两台 180° 线激光扫描仪，两台激光背靠安装。激光扫描仪在车辆行驶过程中，扫描道路两旁地物及道路面形成完整 360° 激光点云，在该激光点云上可以直接完成对地物的坐标及其它几何要素的测量。

**激光纹理相机：**激光纹理相机是与立体测量相机同型号的彩色数字工业相机，两台相机分别安装在激光扫描仪的上部，在 2D 扫描仪沿道路扫描的时候，同步拍道路两旁的影像。该影像经标定与激光点云融合，作为激光点云的纹理影像，为地物判读以及三维建模提供丰富的属性信息。

**惯性组合系统：**GPS/INS 由双频 GPS 天线、Javad 双频 GPS、iMar-FMS 惯性测量单元及车轮编码器等构成，惯性组合系统高输出频率的位置和姿态，为

三套立体测量相机和两台激光扫描仪提供外部参数，使立体测量相机和激光扫描仪具有绝对坐标测量能力。

**同步控制单元：**同步控制单元为系统运行所需的核心控制和协调单元，同步控制器从双频 GPS 中获得并保持高端精度时间基准，接受车轮编码器的行走脉冲信号输入，控制立体测量相机和激光纹理相机拍摄数字图像，并为 2D 激光扫描仪扫描数据帧提供时间标签。让系统设备都统一运行在 GPS 基准时间上。

**车顶平台：**车顶平台为设备安装机械平台，三套立体相机、两台激光扫描仪、GPS 天线、惯性测量单元、纹理相机都安装在平台上面。该平台设计需要重点考虑做牢固性和可靠性。

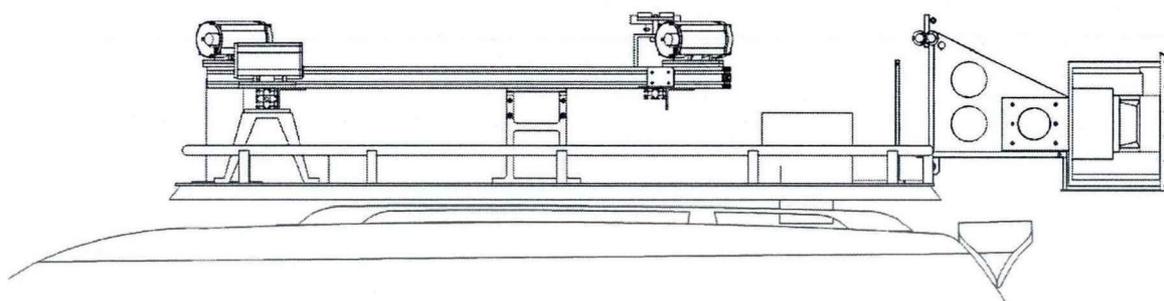


图 2.20 测量平台设计图（侧视图）

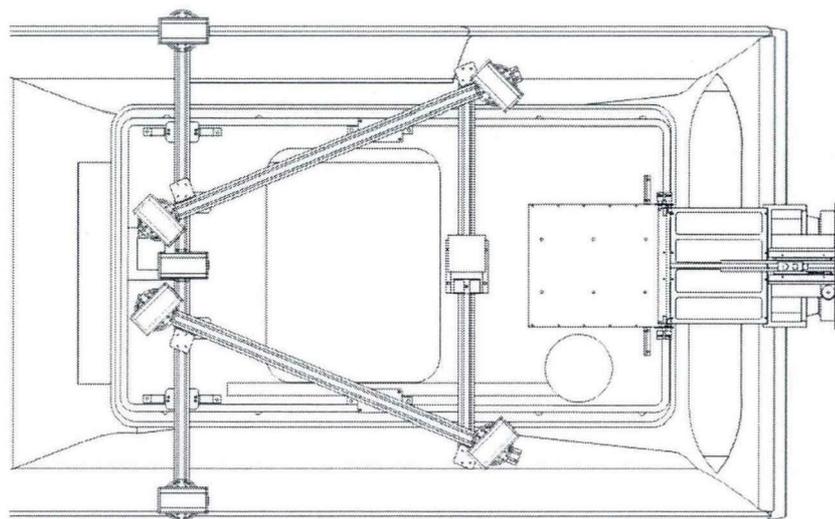


图 2.21 测量平台设计图（俯视图）

车辆整体设计图如图 2.22，图 2.23。

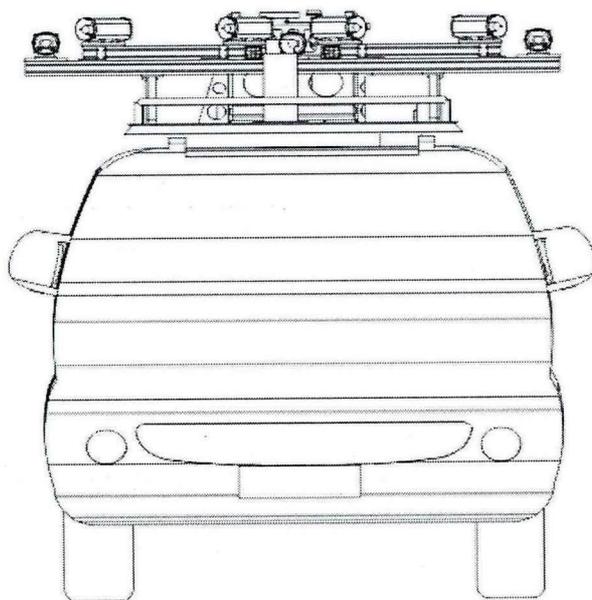


图 2.22 立体测量车整体设计图（正视图）

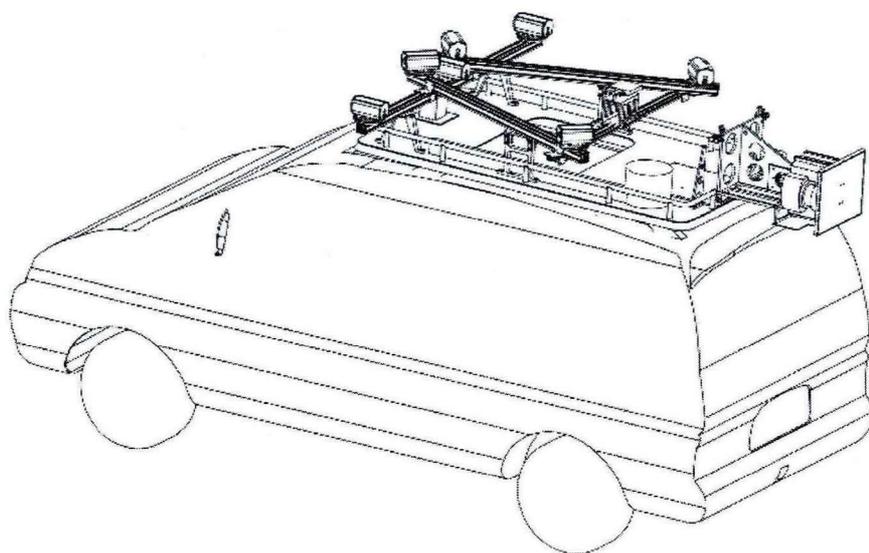


图 2.23 立体测量车整体设计图（右轴测图）

## 2.6 车载移动测量系统的软件集成

车载测量系统的开发和应用，大大提高了外业数据的采集效率，数据采集更为全面、可视、动态和实时。车载移动测量系统的集成，包括硬件系统的集成以及软件系统的集成两个方面。

集成了立体成像系统、360 度全景影像成像系统、激光扫描仪以及组合惯性定位定姿传感器的移动测量平台中涉及到的软件及其数据处理流程如下图所示：

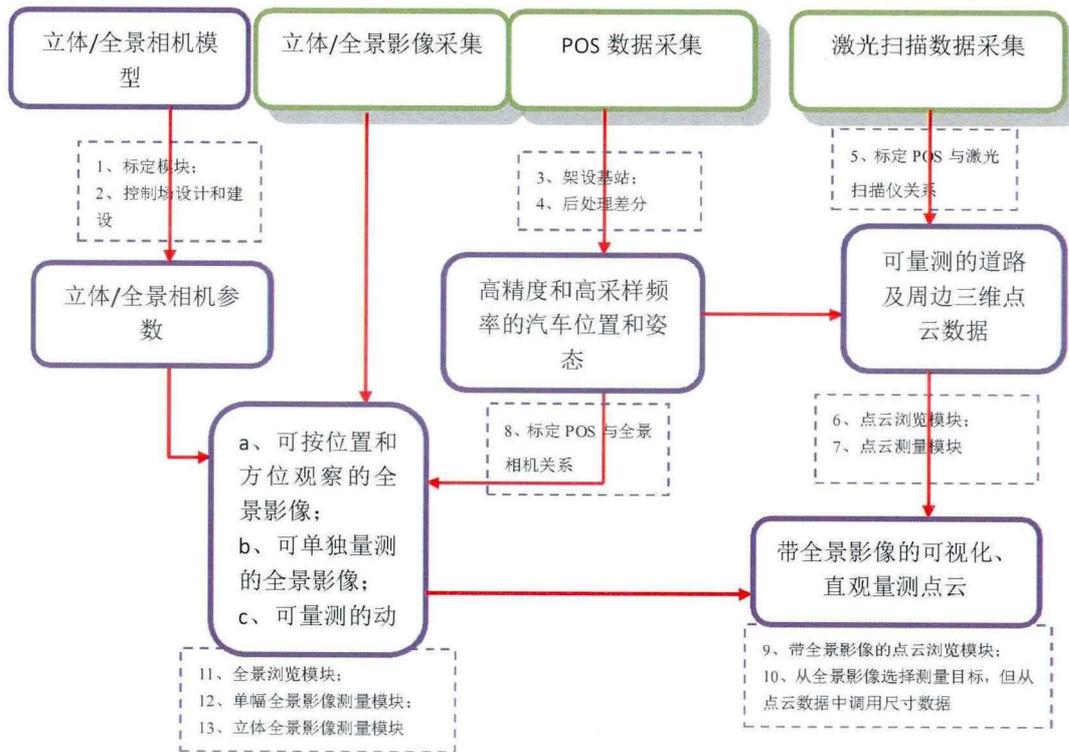


图 2.24 数据采集、处理流程和程序模块

图 2.24 中，虚线框表示各种操作及其对应的软件，顶层部分对应数据采集软件，中间部分对应标定检校软件，下面部分对应数据处理软件。

车载移动测量的软件系统包括数据采集软件、标定检校软件以及数据后处理软件。数据采集软件运行于车载计算机中，负责数据的采集与存储，包括 GPS/INS 数据采集软件、立体图像采集软件、激光扫描数据采集软件、全景影像采集软件；标定检校软件解算系统的各系统误差参数，包括激光扫描仪的绝对标定软件、相机的内外标定软件；数据后处理软件对车载移动测量系统采集的原始数据进行处理，得到各种测绘产品，包括 GPS/INS 组合数据处理软件、激光点云重建软件、影像量测软件等。

## 2.7 本章小结

本章从车载移动测量系统的整体体系架构入手，介绍了车载移动测量系统的组合定位定姿系统、图像测量传感器以及激光扫描仪等核心设备，研究并设计了面向城市测量、面向空间信息采集与发布及基于立体影像的移动测量系统硬件集成方案和软件集成方案，并在研究过程中完成对应系统的构建。

## 第3章 车载多传感器实时同步数据采集技术

车载移动测量系统是一个多传感器集成的数据采集系统，为实现“快”和“广”的测量，车辆往往以尽可能高的速度运行，因此安装在车辆平台上的多种传感器将工作在一个动态条件之下。

同时，车载移动测量系统中各个传感器具有各自不同的测量启动时刻、测量结束时刻、测量数据的输入输出频率及时间精度。

为使这些不同的传感器在动态条件下测量结果反映同一个客观世界的状态，必须使多种传感器具有统一的时间和空间基准。在车载移动测量系统中，GPS 是一个不可替代的重要的时间和空间基准，从 GPS 中引出的时空基准，保证各个传感器工作在统一的时间和空间基准中，从而确保多传感器在数据配准和融合中具有一致性和准确性，实现车载移动测量系统的“精”和“真”的数据获取。

### 3.1 GPS 的时空特性分析

高精度的时间基准是保证 GPS 位置测量精度的基本条件之一，而坐标是所有空间关系定义与空间转换的基本参数[刘红新 2006]。时间系统和坐标系统是 GPS 定位的基本组成部分，卫星定位计算中涉及到诸多不同的时间系统和坐标系统。

#### 3.1.1 时间系统

时间具有两种含义：时刻和时间间隔。时间间隔是指事物运动处于两个瞬间状态之间所经历的时间过程；时刻是指以某一约定的起始点为基准发生某一现象的时间。时刻的测量被称为绝对时间测量，时间间隔的测量则称为相对时间测量。

时间系统规定了时间测量的标准，即包括时刻的参考基准（起点）和时间间隔测量的尺度。如果把时间可以看作是一维的坐标轴，在该轴上原点就是计量参考基准（起点），坐标轴的刻度就是单位时间的间隔长度。

常用的时间系统有恒星时(Sidereal Time—ST)、世界时(Universal Time—UT)、原子时(Atomic Time—AT)、世界协调时(Universal Time Coordinated—UTC)、力学时(Dynamic Time—DT)、GPS 时间(GPS Time—GPST)、历书时(Ephemeris Time—ET)和儒略日等[曹月玲，2008]。

在 GPS 时空基准中，相关的时间系统主要有原子时、世界时、世界协调时和 GPS 时间这四种。

原子时(Atomic Time—AT):

随着空间技术的发展和大地测量学新技术的应用，对时间的准确度和稳定度要求越来越高，即时间系统的原点的唯一性和尺度的均匀性。基于稳定的原子跃迁所建立的原子时是当前最理想的时间系统。

原子时的尺度：1967 年 10 月第十三届国际计量大会通过如下决议规定，1 秒的时间长度为“位于海平面上的铯 133 ( $\text{Cs}^{133}$ ) 原子基态两个超精细能级间在零磁场中跃迁辐射振荡 9192631770 周所持续的时间”。

原子时原点有两个：

(1)美国海军天文台建立的原子时 AI，其原点为 1958 年 1 月 1 日 0 时 UT2。

(2)1971 年国际时间局(BIH)确定的原子时系统 IAT，现改由国际计量(BIPM)的时间部门在维持。其原点为 AI 原点减去 34 毫秒：

$$IAT = UT2_{1958.1.1.0} - 0.034 \quad (3.1)$$

世界时(Universal Time—UT):

格林尼治起始子午线处的平太阳时称为世界时，即以平子夜为原点的格林尼治平太阳时。用 GMAT 代表平太阳相对于格林尼治子午圈的时角，则有：

$$UT = GMAT + 12(h) \quad (3.2)$$

地球上每一个地方子午圈均存在一个地方平太阳时  $M_s$ （简称地方平时），它和世界时的关系为：

$$M_s = UT + \lambda \quad (3.3)$$

上式中  $\lambda$  为此地的经度。

同一瞬时，位于不同的经线上的平太阳时是不同的，为日常生活和工作中使用方便，需要一个统一时间标准，1884 年在华盛顿召开的国际子午线会议决定，将地球分成 24 个标准时区，每个时区以中央子午线的平太阳时作为区时。格林尼治起始子午线处的平太阳时称为世界时，北京对应为第八时区，北京时 = UT + 8h。

世界时是根据地球自转测定的时间，由于地球自转的不均匀性和极移的影响，世界时也是一种不均匀的时间系统。世界时通常有三种形式：

UT0：是由全球分布的多个观测站观测恒星的视运动确定的时间系统。

UT1：对 UT0 经过极移修正后的世界时。

UT2: 对 UT1 进行周期性季节变化修正后的世界时。

由于地球自转的不均匀性, 上述三种形式的世界时都不是均匀的时间尺度。

**世界协调时(Universal Time Coordinated—UTC):**

由世界时和原子时的定义可知, 它们的时间尺度分别基于地球自转速率和原子跃迁, 而天文导航、卫星定轨中既需要以地球自转为基础, 又需要原子时秒长的高精度, 为此, 从 1972 年开始采用一种以原子秒长为基础, 在时刻上尽量接近世界时的一种折中的时间系统, 即世界协调时 (UTC), 该时间系统兼顾了对世界时时刻和原子时秒长两者的需要, 国际上规定以世界协调时 (UTC) 作为标准时间和频率发布的基础, 地面观测系统以 UTC 作为时间记录标准。

具体的定义方法是, 在时间尺度上与国际原子时完全相同, 采用闰秒(或跳秒)的办法, 即当协调时与世界时时差超过 $\pm 0.9\text{s}$  时, 便在协调时中引入一闰秒(正或负), 可以在每年 1 月 1 日或 7 月 1 日强迫 UTC 跳 1 秒 (闰秒), 使协调时与世界时的时刻最为接近, 具体调整由国际计量局在 2 个月前通知各国时间服务机构。

世界协调时与国际原子时的关系为:

$$UTC = \text{IAT} - 1^s * n \quad (3.4)$$

其中  $n$  为调整参数, 由 IERS 发布。

**GPS 时间(GPS Time—GPST):**

GPS 时是全球定位系统 GPS 使用的一种时间系统。它是由 GPS 的地面监控系统 and GPS 卫星中的原子钟建立和维护的一种原子时, 其起点为 1980 年 1 月 6 日 00h00m00s。

在起始时刻, GPS 时与 UTC 对齐, 这两种时间系统给出的时间是相同的。由于 UTC 存在跳秒, 因而经过一段时间后, 这两种时间系统中就会相差  $n$  个整秒,  $n$  是这段时间内 UTC 的积累跳秒数, 将随时间的变化而变化。

由于在 GPS 时的起始时刻 1980 年 1 月 6 日, UTC 与国际原子时 TAI 已相差 19 秒。从理论上讲, TAI 和 GPST 都是原子时, 且都不跳秒, 因而这两种时间系统之间应严格相差 19 秒整。

但 TAI (UTC) 是由 BIPM 根据全球的约 240 台原子钟来共同维持的时间系统, 而 GPST 是由全球定位系统中的数十台原子钟来维持的一种局部性的原子时, 这两种时间系统之间除了相差若干整秒之外, 还会有微小的差异  $C_0$ , 即:

$$TAI - GPST = 19^s + C_0 \quad (3.5)$$

$$UTC - GPST = n\text{整秒} + C_0 \quad (3.6)$$

由于 GPS 已被广泛应用于时间比对，用户通过上述关系即可获得高精度的 UTC 或 TAI 时间。国际上有专门单位测定并公布  $C_0$  值，其数值一般可保持在 10ns 以内[李征航 2010]。

俄罗斯开发并部署的全球导航卫星系统 GLONASS 也建立了自己的时间系统 GLONASS 时，服务于导航和定位需要。该系统采用的是莫斯科时（第三时区），与 UTC 间存在 3h 的偏差。GLONASS 时也存在跳秒，且与 UTC 保持一致。同样，由于 GLONASS 时是由该系统自己建立的原子时，故它与由国际计量局 BIPM 建立和维持的 UTC 之间（除时差外）还会存在细微的差别  $C_1$ 。转换关系为： $UTC + 3^h = GLONASS + C_1$ ，用户可据此将 GLONASS 时化算为 UTC，也可以将其与 GPS 时建立联系关系式。同样， $C_1$  值也由专门机构加以测定并予以公布，其值一般为数百个纳秒，近来可能有所改善。

GPS 时系统在表示时间采用的最大时间单位为 GPS 周（GPSWeek，即 604800 秒），其表示时间方法是从 1980 年 1 月 6 日 0 时开始计算的 GPS 周数（Weeks）和周内时间从每周周六/周日之间的子夜开始计算的周秒（Seconds of week）。在 GPS 卫星发送的导航电文中，时间就采用这样的表示形式。

GPS（GLONASS）已经广泛用于精密授时，利用 GPS（GLONASS）测量得到的时间是 GPS 时（GLONASS 时），用户需要获得精确的 UTC 时，除需要考虑那个整秒（3h）的差异外，还需要顾及  $C_0$  和  $C_1$  项。

### 3.1.2 时间精度

GPS(global position system)是美国研制的导航、授时和定位系统[LewandowskiW 1993]。GPS 系统除向具有适当接收设备的全球范围内的用户提供精确、连续三维位置和速度信息外，GPS 还广播世界协调时（UTC）[EllittD.Kaplan 2007]。

卫星上备有精度为  $10E-14s$  的铷频标原子钟[朱文治 1997]，卫星时钟不受气候和地域的限制，该系统具备有精确授时功能，可以在全球范围内全天候提供精确统一时间，其 C/A 码（粗码或民码）的时间对比精度为 0.1us，在停止施加选择可用（SA-selective availability）干扰，系统成倍地提高了定位和授时精度[ConleyR 2000]，最高精度可达 20ns[CrossleyP 1994; WeissM 1997]。

GPS 作为授时单元，一般采用 GPS 接收机或 GPS OEM 板，GPS 接收器负责接收来自卫星的信号，并能自动补偿信号在卫星与接收机之间的传输延时，输出国际标准时间（UTC）对应的标准时间、日期，并输出与 UTC 时间保持高

度同步的 1PPS 信号，1PPS 的脉冲前沿对应 UTC 中整秒的准确时刻[邹红艳 2004]。GPS 时钟输出的时间信息是通过 RS-232/RS-422/RS-485 等 EIA 标准串行接口发送一串以 ASCII 码表示的日期和时间报文，每秒输出一次，时间报文中可插入奇偶校验、时钟状态、诊断信息等；GPS 输出的整秒时刻，是通过 1PPS/1PPM 的一个脉冲信号提供，时钟脉冲输出不含具体时间信息，只用脉冲前沿指明整秒准确时刻，因此 GPS 接收机的时间精度，将反映在 1PPS 脉冲边沿上。

不同的 GPS 接收单元也具有不同的时间精度，表 3.1 列出了本研究项目涉及到的不同型号的 GPS 接收机的时间精度。

表 3.1 GPS 接收机时间精度对比

型号	生产商	特点	项目用途	时间精度 (1PPS) (定位锁定正常)
M12+ [MOTOROLA 2002]	Motorola 美国	12 通道 精密授时型 GPS 在 USNO 全面 标定到 UTC	车载 GPS 同步 器	使用时钟粒度信息 < 2ns 1 Sigma < 12ns 6 Sigma 不使用时钟粒度信息 < 10ns 1 Sigma < 60ns 6 Sigma
LEA-6T [u-blox,2010]	u-blox 瑞士	50 通道 精密授时型	车载 GPS 同步 器	RMS 30ns 99% <60ns 误差补偿后 15ns
LEA-4R [u-blox 2008]	u-blox 瑞士	16 通道 航位推算型	车载 GPS 航位 推算仪	RMS 50ns 99% <100ns
Span-CPT [NovAtel 2009]	NovAtel 加拿大	入门级惯性组 合系统	惯性定位和定 姿	RMS 20ns
Span-FSAS [NovAtel 2009]	NovAtel 加拿大	高精度惯性组 合系统	精密惯性定位 和定姿	RMS 20ns

从表 3.1 中可知：

- 1) 不同的接收机时间精度有所不同，但都能保证在 0.1us 以内；
- 2) 授时型 GPS 比一般导航型的 GPS 具有更高的时间精度，最高可以达到 2ns；
- 3) 惯性组合系统中的 GPS 单元时间也能达到非常高的精度，这是因为一方面 GPS 单元需要提供时间和位置，另一方面 GPS 单元要作为具有高动态的加速度计和角加速度陀螺的组合而成的惯性测量单元的时间基准。因此，惯性组合系统中的 GPS 时间数据和时间脉冲信息，也可以用来作为系统的授时基准。

尽管 GPS 具有很高的时间精度，但 GPS 接收机接收到的 GPS 时钟因星历误差、卫星钟差、电离层误差、对流层误差、多径误差、接收机误差、跟踪卫星过少误差等因素的影响，精度和稳定性难以得到保证[曾祥君 2000]。通常，GPS

接收机的秒脉冲误差服从正态分布，时钟精度以概率指标表示。例如 Motorola UTONCORE 型接收机，统计精度为 50ns(1Sigma)，表示 GPS 时钟误差落在 1 Sigma 范围(50ns)内的概率为 0.6828，落在 2Sigma 范围(100ns)内的概率为 0.9546，落在 3 Sigma 范围(150ns)内的概率为 0.9974。但在卫星失锁或卫星时钟实验跳变的条件下，GPS 时钟误差达几十甚至上百 ms[王元虎 1998]。根据文献对 2 个同型号接收机产生的秒时钟的比较测试，正常工作条件下最大偏差可能达 1.6Ls，在卫星失步的情况下偏差甚至达到了上百 ms[高厚磊 1997；曾祥君 2003]。

带航位推算功能的 GPS 以及组合惯导系统，需要在城区全覆盖的条件下工作，因此常常会穿行在高架桥、高层建筑、狭窄的小巷、隧道及树木茂密的道路上，常常会出现 GPS 信号干扰大、失锁的现象而且 GPS 本身带有的时间尺度基准精度较差，这样就会带来 GPS 模块输出时间精度的丧失，因此在 GPS 锁定时间后需要外部引入时间基准。如在 NovAtel 的 DLV3 产品中，就有连接外部频率振荡器的接口[NovAtel 2009]，如图 3.1。



图 3.1 DLV3 接收机接口

在 DLV3 接收机的接口中，有一个外部振荡器的输入口，该输入接口用于连接比 GPS 内部晶体振荡器精度更高的外部时钟，比如铷钟、铯钟或高级的晶体振荡器。

### 3.1.3 频率准确度

振荡器是一种时间基准或时间频率基准，原则上任何一个可以观测到的连续周期运动只要满足运动周期稳定和运动周期复现性好都可以作为时间基准。

常见的基准有天体自转/公转周期、晶体振荡器、原子频标等等。这些基准的稳定度各不相同，表 3.2 中列出了一些基准机器稳定度。

表 3.2 常见时间基准及其稳定度

时间基准		特点	稳定度	用途
晶体	一般晶体振荡器	中低性能	$2 \times 10^{-8}$	一般集成电路
	TCXO	温度补偿	$1 \times 10^{-9}$	高精度授时系统
	VCXO	压控	$3 \times 10^{-10}$	高精度授时系统
	OCXO	恒温	$5 \times 10^{-12}$	高精度授时系统
原子频标	铷钟	小型高精度	$3 \times 10^{-12}$	卫星授时系统
	铯钟	高精度	$2 \times 10^{-14}$	卫星授时系统
	氢钟	高精度	$5 \times 10^{-13}$	卫星授时系统
天体基准	地球自转周期	天体周期	$10^{-8}$	天文
	行星绕日公转周期	天体周期	$10^{-10}$	天文
	脉冲星自转周期	天体周期	$10^{-19}$	天文

计算机的时钟一般都采用石英晶体振荡器。晶振体连续产生一定频率的时钟脉冲，计数器则对这些脉冲进行累计得到时间值。由于时钟振荡器的脉冲受环境温度、匀载电容、激励电平以及晶体老化等多种不稳定性因素的影响，故时钟本身不可避免地存在着误差。例如，某精度为 $\pm 20\text{ppm}$ 的时钟，其每小时的误差为： $(1 \times 60 \times 60 \times 1000\text{ms}) \times (20/10^6) = 72\text{ms}$ ，一天的累计误差可达  $1.73\text{s}$ ；若其工作的环境温度从额定  $25^\circ\text{C}$  变为  $45^\circ\text{C}$ ，则还会增加 $\pm 25\text{ppm}$  的额外误差。可见，计算系统中的时钟若不经定期同步校准，其自由运行一段时间后的误差可达到系统应用所无法忍受的程度。

振荡器随着晶振制造技术的发展，目前在要求高精度时钟的应用中，已有各种高稳定性晶振体可供选用，如 TCXO(温度补偿晶振)、VCXO(压控晶振)、OCXO(恒温晶振)等。

原子钟最显著的工程应用是在全球定位系统(GPS)中，GPS 是一个三维长度测量系统，精密的长度测量往往需要转变为电磁波传播时间的测量；电磁波的传播速度通常认为是一个常量(即光速  $C$ )，而原子钟又是目前时间测量中最精准的“尺子”，因此 GPS 系统的定位精度中很重要的因素就是卫星系统中使用的原子钟本身的性能。

频率准确度是评估原子钟性能的一个重要参数。

频率准确度是指实际输出频率与标称频率的一致程度。频率准确度的计算公式如下：

$$A = \frac{f_x - f_0}{f_0} \quad (3.7)$$

$A$  为频率准确度， $f_x$  为被测设备的实际输出频率， $f_0$  为其标称频率。

卫星钟和接收机钟均采用 GPS 时，卫星钟采用原子钟，接收机钟一般为石英钟。下表为几种不同类型石英晶体振荡器和原子振荡器的准确度典型指标。

表 3.3 不同类型的振荡器时间准确度

准确度	石英晶体振荡器			原子振荡器		
	TCXO	MCXO	OCXO	铷	氢	铯
	$2 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-11}$	$5 \times 10^{-11}$	$5 \times 10^{-11}$

从性能上看，铯钟和氢钟性能较好，从价格上和可靠性上看，晶体振荡器则更有竞争力，所以，导航卫星上不仅配备铯钟和氢钟，也配备晶体振荡器。常见的石英晶体振荡器和其它的原子钟，由于自身的老化以及受到温度变化等环境因素的影响，其记录的时间间隔与国际原子时是有一定误差的，而且随着时间的延长，这些误差将会积累，因此需要每隔一定的时间对这些计时器进行对时处理。

在集成有多种传感器的车载移动测量系统中，为维持系统的时间准确性，我们采用高稳晶振来建立同步时间基准。

### 3.2 多种传感器时空特性分析

作为一个高端的车载移动测量系统，系统包含有更多类型数据源（多传感器），具体包括：GPS 数据、INS 数据、倾斜仪数据、ODO 数据、RS 数据（立体影像系列数据）、GIS 数据、3CCD 视频数据及激光雷达数据等等。

上述数据来自不同类型的传感器件和子系统。在移动测量车运行过程中，必须控制数据的同步实时采集，否则不同的数据将失去时间和空间上相互联系的桥梁，也就不能进行有效的操作、管理和时空融合。

整个系统的数据源基本情况如下：

表 3.4 不同来源数据的特征

传感器	数据类型	特性
GPS	定位数据	每秒 1 帧-20 帧
IMU	定位及定姿数据	每秒 100 帧-200 帧
倾斜仪数据	定姿校验	每秒 20 帧
CCD 图像传感器	系列影像数据	运行时每秒 5 帧左右
3CCD 景观传感器	影像数据流	每秒 25 帧
激光扫描仪	扫描点云数据	每秒 25 帧-100 帧
高分辨率全景相机	全景图像	每秒 2 帧

在车载移动测量系统中，实时及同步传感数据的获取，是一个最重要且需要首先解决的问题。一方面是由于车辆在线动态运行，这就要求数据需要实时获取；另一方面多种不同传感器的存在，需要数据具有严格的同步或对应关系。

例如：不同于传统概念上的摄影测量或航空影像，基于数字 CCD 图像器件的车载多传感器摄影测量系统往往需要同步实时获取多个图像传感器的图像，图像传感器之间具有严格的定位关系。“同步实时像对”是指，在车载摄影测量平台在运行过程中，多个图像传感器产生的每组图像，一方面任意一组图像内的多个图像都必须在同一时刻产生，另一方面，对于系列像对中的每一组图像必须是在采集控制发出时实时产生或者每组图像都可以获得精确的采集时刻。“同步”保证图像传感器之间的姿态相对不变，它们之间的位置关系就是安装完成后确定好的关系；“实时”保证整个图像传感器的坐标系统在采集控制发出时与大地坐标系统关系已知（通过 GPS/INS 获得车载平台的位置和姿态）。

在某一车载测量系统中，采用四个普通模拟摄像机作为图像传感器采集道路图像，摄像机帧数为 25fps（PAL 制式），在车辆以 72km/h 运行时拍摄系列像对，如果摄像机不经同步和实时处理，每个图像传感器都有自己固定的运行周期，因此各图像传感器之间的最大采集图像差别是 40ms，沿车辆运行方向导致的实际拍摄位置差别为：

$$0.040 \times 72 \times 1000 \div 3600 = 0.80 \text{ m}$$

由上面的计算可知，某两个图像在拍摄时的位置差别最大可能达到 0.80 米，而这一位置差别可能是一个随机的。这就导致，用于空间前方交会的两个图像（摄站）位置误差在 0.8 米，而一般而言，基于摄影测量的车载测量系统图像传感器之间的距离（基线长）在 1.2~2.0m 之间，像这样不同步的误差，绝对不能容忍，一般同步精度至少必须控制在 1ms 一下。同样的道理，采集的实时性，也必须严格要求。

在上面的五种数据源中，GPS 具有绝对时间系统：GPS 启动后，只要能够锁定足够的卫星，GPS 可以输出高精度的时间系列，即每秒准时输出一帧数据，其中包括时间信息、导航定位信息等，GPS 还作为一个授时设备，每秒输出一帧数据的同时还输出一个整秒时间脉冲，提供给其他系统校准整秒时间。

INS 具有相对时间系统，INS 作为自主一个相对定位设备，在其内部有一个高精度的计时器，一旦给定 INS 一个起始时间后，INS 就能够保持高精度的时间，并且按照这个时间基准，每秒输出 200 帧数据，这帧数据包括三轴线加速度和三轴角加速度信息和时间信息。

CCD 数据没有时间信息，一方面 CCD 的帧速率不是很精确，拍摄时间不能准确确定，另一方面 CCD 数据的获取往往是根据车辆行走距离来控制的，每帧数据的拍摄时间更是很任意。这就需要有一个外部设备给 CCD 提供到帧的时间标签。

3CCD 数据没有准确的时间信息，3CCD 是一个视频数据流设备，尽管它的每秒速率比较固定，但还是不足以提供精确的时间基准到每一视频帧。因此，它也需要一个辅助的时间标签产生方法，以便定位到每一帧的时间。

Laser 数据没有精确的时间信息，Laser 提供一个高速的点扫描数据，它的速率也比较固定，但还是不能自主提供一个精确到帧的时间标签。因此需要一个辅助的时间标签产生方法。

由此可见不同传感器类型，具有不同来源的数据，具有不同的数据特性。由上面的描述可以知道，若要把整个系统同步起来，提供不同数据源的每帧数据的时间标签，并且整个时间标签要统一这一个时间基准下面，必须系统设计时间同步方案：把绝对的时间基准，引入相对系统；设计一个相对时间系统，给没有时间功能的设备提供每帧数据的时间标签；数据采集时，一并采集每帧数据产生的时刻。

### 3.3 GPS 同步时钟控制器设计

基于 GPS 授时的同步控制器是多传感器集成的车载移动测量系统中非常重要的系统控制和同步设备。车载移动测量系统包含有多传感器集成，因此就有多种类型数据源，这些数据来自不同时间和空间特性的传感器件或子系统。在移动测量车运行过程中，必须控制数据的同步实时采集，否则不同的数据将失去相互联系的桥梁，不能集成到统一的时间和空间基准中，也就不能进行有效的操作和管理。同步控制器从卫星信号良好且定位 GPS 中获取时间基准并保持这个时间基准，同步触发控制立体测量相机实时图像采集、二维或三维激光扫描测量系统数据采集等等，使采集到的数据具有统一的时空间基准，从而能够使激光扫描测量量子系统和立体摄影测量量子系统相对测量能够在 DGPS/INS 提供的空间坐标和载体姿态结果转换到绝对测量结果中。

根据上面的分析，设计系统 GPS 同步控制单元。该 GPS 同步控制单元在授时型 GPS 锁定 5 颗以上卫星后，从高精度授时型 GPS 中获取基准时间，并由同步器内部的高稳晶体振荡器维持时间的准确性。由里程计驱动的数据采集信号到达同步器 CPU 后，同步器一方面向对应设备发送采集控制脉冲，同时发送准确的时间标签到计算机，让计算机同步记录传感器数据。

同步器基本原理如图 3.2 所示。

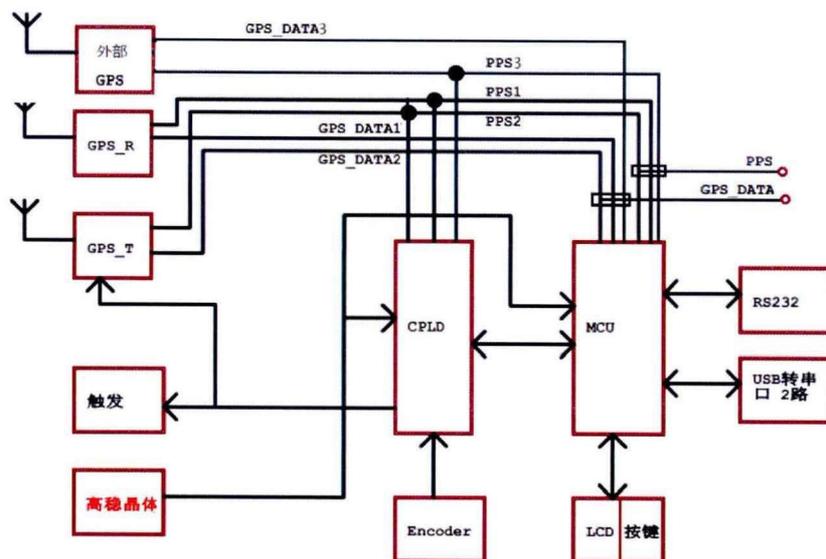


图 3.2 GPS 同步控制器基本原理

根据不同的需求，GPS 时钟同步控制器可以选择采用授时型 GPS、航位推算型 GPS 或者外部 GPS 来作为时间基准。授时型 GPS 作为时间基准的控制器可以获得高精度时间，用于对同步要求很高的系统，比如车载激光扫描系统；航位推算 GPS 作为时间基准的控制器除了授时同步以外，还可以作为简单的低精度的惯性组合来使用，适合于时间同步要求不高的系统，比如全景影像采集系统、视频影像 GIS 系统和电子导航数据采集系统（采集路网和 POI 信息）；外部 GPS 作为时间基准的同步系统中，这个外部 GPS 主要是惯性组合系统自己带有的 GPS，由于惯性组合系统的 GPS 本身时间精度非常好可以达到 20ns（见表 3.1），可以直接采用该 GPS 的时间信息给同步器授时。

车载移动测量系统中的时钟同步控制器采用 GPS 的 UTC 时间作为时间输入基准，采用高稳晶振为同步控制器的保持时间精度。

MCU 接收到 GPS 信息后，从中解算出 UTC 时间、位置、速度及当前卫星数目等信息，当卫星数大于一设定数目（一般为 5 颗），说明当前定位正常，GPS 时间精度满足要求，1PPS 脉冲有效，CPLD 控制电路进入校对状态。CPLD 是完成校对的关键部分，它内部有 us、ms 及 s 脉冲产生单元。当对齐脉冲产生电路检测到有效的 1PPS 脉冲时，产生对齐脉冲，此时将毫秒和秒脉冲产生电路复位完成一次校对，即在 1PPS 脉冲沿到达 CPLD 电路中，电路就把时间“秒”的小数部分清零，同时把接收到的时间数据中年月日时分秒写到时钟芯片中。

根据文献[王铮 2002]对校对系统的延时分析的系统校对延时的计算方法和文献[高文武 2004]中对校对误差测试方法，测试校对误差在 4.2us；使用同样的

测试方法测试 4 小时后，卫星锁定正常的 1PPS 与同步控制器输出的秒脉冲之间的误差在 50us 以内。

由于系统采用 GPS/INS 作为时间和空间坐标基准，GPS 失锁以后定位精度会很快下降(见 DGPS/INS 章节)，同步控制器同步器能 4 小时内时间漂移 50us，已经足够车载一定测量系统使用，设计达到系统要求。

### 3.4 传感器同步方法

在多种传感器集成的车载系统中，所选用的传感器目标用户群不同，厂商设计和制造的过程中不一定都考虑到该设备与其它设备的同步问题，即便是考虑了同步问题，往往也不是采用相同的思路来设计，因此同步的接口千差万别。

#### 3.4.1 传感器的同步控制方式

根据设备是否具备控制接口及同步控制方式，可以分为无同步控制、接收外部同步控制、主动输出同步控制以及时间基准同步这四种。

##### 无同步控制：

该类设备是比较老的设备或者为面向非测量领域的设备。尽管设备本身具有较高精度的内部时钟，设备的数据采集可以在内部时钟控制下稳定进行，但从本身软件和硬件上缺乏与外部时间基准的交换机制。

例如在 3.2 节中分析过的 3CCD 相机和模拟 CCD 相机，这些相机本身没有外部同步接口，视频数据是按照内部规定帧速输出。为了对此类设备同步，需要在采集软件数据获取函数上利用数据流的帧头和帧尾到达计算机内的时刻，与同步过的计算机之间产生关联。由于数据流在相机内部产生以及传输过程中有一定的延时，获得数据的时间精度有很大的降低。此类设备在低端的移动测量系统设备常常使用，如道路视频 GIS 系统等等。

##### 接收外部同步控制：

该类设备具有外部控制接口，该设备除了可以在内部时钟控制下采集数据外，还可以接收外部控制信号，按照外部信号的周期完成每帧数据的采集，外部信号一般有同步控制器等具有高精度时间基准的设备发出，在发出控制信号的同时，也把信号的时刻信息保存下来。

最新的数字 CCD 相机和部分激光扫描仪具有这样的接口，同步控制器可以用电平控制 CCD 相机拍摄图像，并向计算机发送同步信号的时刻信息；同步控制器也可以引入里程信号，控制激光扫描仪每帧数据的扫描。

##### 主动输出同步控制：

该类型内部具有高精度时钟，没有接收外部同步信号的接口，但在进行每帧数据采集的时候，可以同时输出一个该帧数据采集起始或者结束的电平信号，标志数据采集开始或者结束，该电平信号可以输出到外部事件记录功能的 GPS 或者是同步控制器中，让外部设备（GPS 或同步控制器）记录数据采集发生的准确时刻。

部分数字相机和激光扫描仪具备此类接口，在图像采集完毕或者每一个扫描周期结束，设备输出一个电平信号给 GPS 或者同步控制器。

时间基准同步：

随着设备电子化和数字化水平的提高，很多厂商开始关注给设备赋予高精度时间标签或地理信息特性，即使设备能够接收外部授时和 GPS 位置，给设备采集每帧数据打上时间和位置标签，因此该设备与时间信号发生器或者 GPS 连接后，可以直接与外部时间同步。

目前不少高端的设备图像设备具有 IRIG-B 或 GPS 时间同步接口，部分扫描仪拥有 GPS 同步接口。

### 3.4.2 核心传感器的同步控制方式分析

在系统设计过程中必须针对每种传感器做详细的分析，然后才能依据不同的设备设计出不同的同步连接硬件接口和软件控制接口。

下面分别对本论文涉及到的几种核心传感设备进行同步方式分析。

#### 3.4.2.1 GPS接收机

GPS 接收机是核心的时间和位置传感器，如 3.1.2 节所述，GPS 接收机能够提供高精度的时间基准和位置。GPS 对外部的时间传递是通过每秒输出的时间信息和每秒同步输出的 PPS 电平信号实现。

GPS 还设计有外部事件输入功能，即与主动输出同步控制类型设备配合，记录该类设备的数据采集的精确时刻。

LEA-4T 授时型 GPS 芯片及布局如图 3.3。

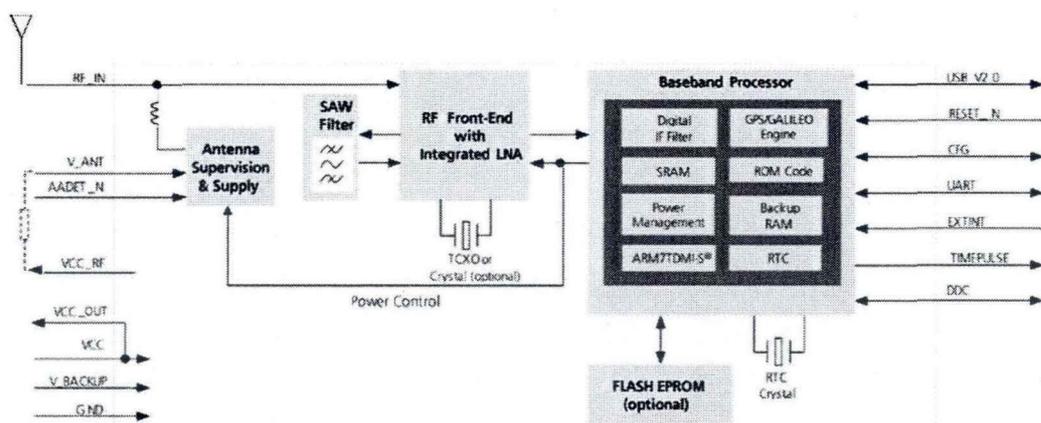
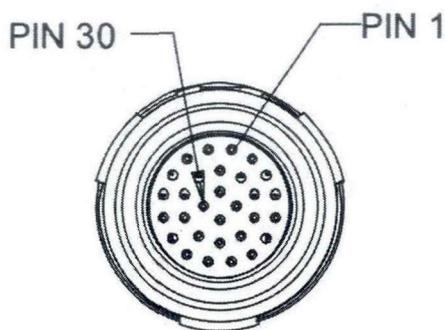


图 3.3 LEA GPS 组成模块图[u-blox 2009]

在 LEA-4T 授时型 GPS 模块输入输出定义中，TIMEPULSE 为 PPS 输出接口，输出的时间精度为 RMS 50ns；GPS 时间信息通过 RxD1 和 TxD1 串口输出；EXTINIT0 和 EXTINT1 是外部事件输入接口，用于记录两路外部设备发送的同步请求信号，时间精度也可以保持在 RMS 50ns。

SPAN-FSAS 的同步功能设计的比 LEA-4T 更完善，它可以通过两种方法来同步外部设备。如图 3.4。



P1 <sup>a</sup>		Remote Connectors	
Pin #	Function	Connector	Pin # <sup>a</sup>
10	EVENT-OUT 1	Detail B Bare Wire (BLACK)	
23	EVENT-OUT 2	Detail B Bare Wire (BLUE)	
11	EVENT-OUT 3	Detail B Bare Wire (RED)	
27	GND	Detail B Bare Wire (GREEN)	
6	EVENT-IN 1	MOLEX	1
5	EVENT-IN 2	MOLEX	2
20	EVENT-IN 3	MOLEX	3
19	EVENT-IN 4	MOLEX	4
28	GND	MOLEX	5 (GND1), 6 (GND2)
29	GND	MOLEX	7 (GND3), 8 (GND4)

图 3.4 SPAN-FSAS 同步接口

(1)接收机有三个可以设置的电平信号输出接口。每个电平信号都与 GPS 时间同步，都可以设置脉冲宽度和极性。SPAN-FSAS 如果作为同步控制器的授时时间来源，则需要把电平设置为 1PPS 相同的规格。

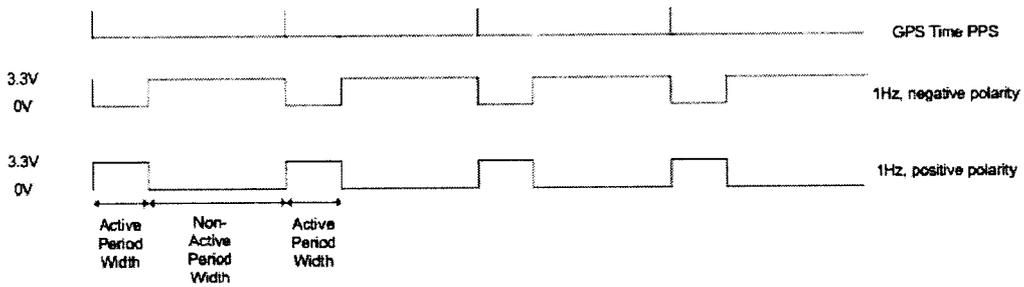


图 3.5 SPAN-FSAS 输出电平设置

(2) 接收机可以接 4 个输入脉冲（事件），每个事件信号可以设置正负极性。与每个输入时间相对应的时间、位置、速度以及姿态通过数据接口同步地输出。

### 3.4.2.2 惯性测量单元（IMU）

惯性测量单元（IMU）是一个相对测量传感器，IMU 本身有内部高精度时钟，但没有时间基准，因此需要外部设备提供一个稳定的时间基准供它使用，因此 IMU 是一个时间基准同步类型的设备。IMU 同步原理如图 3.6 所示。

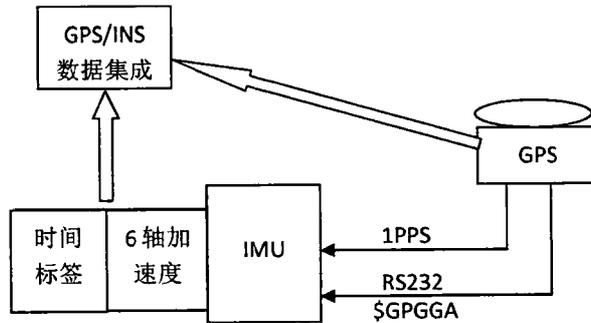


图 3.6 IMU 同步原理

在 SPAN 系列关系组合系统中，惯性测量数据从 IMU 发送到 GNSS/INS 接收机 SPAN-SE 中，接收机通过处理可以以 200Hz 的速率提供融合后的载体位置、速度、姿态信息。通过 NovAtel 接收机触发 IMU，以保证所有的 IMU 测量和 GNSS 测量时间同步。IMU-LCI 具有低噪声和偏差稳定的特点，这表示 IMU 适用于地面或航空测量，还可在 GNSS 接收不好的情况下进行定位和导航。

SPAN-SE 接收机封装提供了 SPAN 用户接口。可通过多种接口协议输出原始观测数据或处理数据，可将数据保存到可拔插的 SD 卡上。多路 GPS 同步选通接口和事件输入接口，可方便用户的集成应用。将 SPAN-SE 和 SPAN 支持的

IMU 组合，可建立一套完整的 GNSS/INS 系统。使用 SPAN-SE 双天线版本的产品，可以实时提供用外部方位信息。

### 3.4.2.3 图像传感器 (CCD)

图像传感器不是一个直接测量设备，它通过多个传感器组成立体视觉的方式或者通过传感器在不同的位置定位定姿来完成测量。因此必须获得图像传感器采集的精确时刻并保证多个图像采集的同步性才有可能获得确定的测量结果并把测量结果反映到地理坐标系统中。

图像传感器可以按照自身固有的帧速获取图像，但在基于立体测量的移动系统中以及全景图像采集系统中，要求所有的图像具有同步一致的采集控制和精确的采集时刻。工业数字型图像传感器都具有外部控制接口，是一个接收外部同步控制类型设备。图像传感器的同步控制原理如图 3.7 所示。

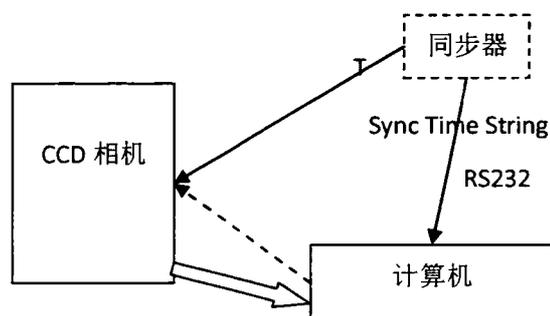


图 3.7 图像传感器的同步原理

图像传感器采用 CamLink、千兆网等接口用来与计算机交换控制信息和传输图像数据，此外一般会有一个触发输入接口。在需要同步采集图像时，计算机通过数据接口把相机设置成异步采集模式，然后向相机发送采集图像采集命令，相机接到命令后，并不产生图像采集动作，只是做好采集准备，等待采集模式中的触发 TTL 信号；计算机发送采集命令后，控制同步器发出 TTL 同步触发电平；所有的相机都会同时受到同步触发电平，然后同步响应，采集图像同步传输到计算机中；同步器同时还发送同步时间标签给计算机，计算机记录同步 TTL 电平发出的时间。

按照此原理同步控制相机拍照可以获得精确的拍照时间，并且拍照的同步性可以保证在 10us 以下。

### 3.4.2.4 激光扫描仪 (LS)

2D/3D 一体化扫描仪-VZ400:

VZ-400 是一个 2D/3D 一体化扫描仪，在本论文研究中用于扫描道路及道路两旁的地物，该扫描仪精度高、扫描速度快、角分辨率高。

VZ-400 是一个 2D/3D 一体化扫描仪，VZ-400 扫描仪内部集成了一个 GPS 接收机，接收机天线通过天线适配器安装在扫描仪的顶部。内部 GPS 可以为扫描仪提供 GPS 时间和位置信息，该 GPS 时间和位置信息可以满足一般性时间和位置指示的需求。

为与更高精度地与外部设备同步，VZ400 扫描仪可以连接一个外部的 GPS 接收机，VZ400 提供两种必须同时存在的信号输入接口[Riegl 2010]:

RS232 串口数字输入接口，用于接收来自 GPS 接收机的时间字符串信号。需要注意的是 GPS、接收机发送的实际数据字符串的格式必须与扫描仪的设定的格式匹配，一般而言，设置为 NEMA803 的 GPGGA 格式，时间字符串，每秒钟一次。来自外部 GPS 接收机的时间字符串，也可以通过 LAN 网络接口以 UDP 的方式送到扫描仪中，即计算机通过 RS232 接口实时捕获 GPS 接收机的时间字符串后，立即采用 UDP 网络协议传输到扫描仪中。

1PPS 的 TTL 电平信号输入接口，用于接收来自 GPS 接收机的高精度时间同步电平信息，该电平脉冲每秒钟一次，与时间字符串同步。

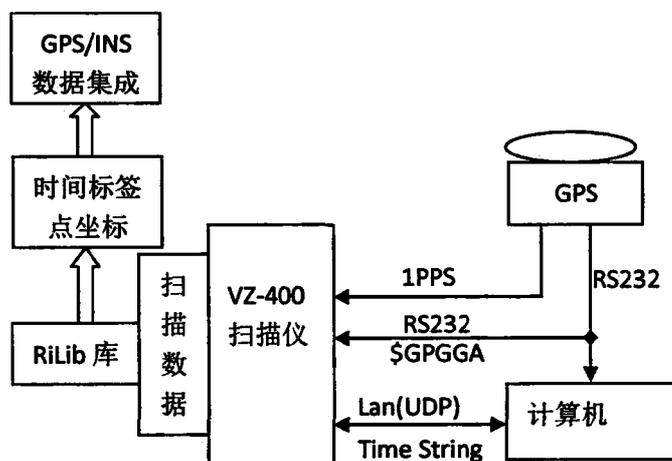


图 3.8 VZ-400 扫描仪同步原理

当扫描仪检测到一个配对时间字符串和 PPS 脉冲，扫描仪的测量数据流中就被插入一个 GPS 数据包，该数据包包含 GPS 时间内和机器内部时间的耦合关系，一系列的数据包将作为时间同步数据保存在原始扫描数据中，同步好的扫描仪每个扫描线和扫描点，将都具有 GPS 精确时间标签，时间标签的分辨率为 4ns。

通过仪器提供的 RiLib 开发库可以提取扫描数据点坐标和时间标签，因此扫描仪的测量数据通过 GPS 时间统一起来，然后通过 GPS/INS 数据统一到空间坐标系中。

### 2D 扫描仪-LMS120i:

LMS-Q120i 是一个 2D 扫描仪，在本论文研究中用于扫描道路路面。

LMS-Q120i 激光扫描仪提供了一个内部时钟 (SyncTimer)，该内部时钟由一个震荡频率为 100KHZ 的石英钟进行计时[Riegl 2009]。为了将激光扫描仪的内部时钟与外部事件同步，可以通过激光扫描仪的“Trigger”输入针将外部 TTL 脉冲输入到激光扫描仪中，激光扫描仪在接收到外部电脉冲后，将使 SyncTimer 清零，以达到与外部事件同步的目的，在这种方式下，由于 LMS-Q120i 只接受了 TTL 电平信号，因此发 TTL 信号的设备（同步控制器）需要把 TTL 电平的时刻标签信息发送到数据采集计算机中，由计算机同步记录每个 TTL 的时间标签。同步原理见下图。

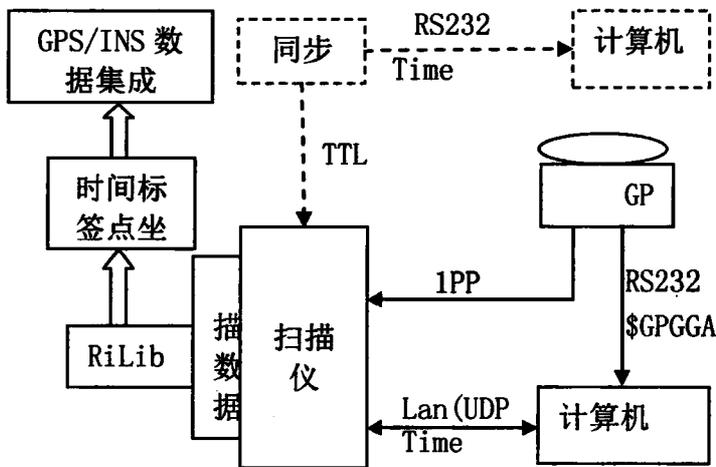


图 3.9 LMS-Q120i 同步原理

另外，LMSQ120i 还提供了一种先进的同步机制：将激光扫描仪直接与 GPS 同步的机制，简称为 GPS 同步机制。

GPS 同步机制由 GPS 接收机或 GPS/INS 组合定位定姿系统提供时间数据串以及 PPS 脉冲，时间数据串由控制计算机解析后以特定的格式发送给 LMSQ120i 激光扫描仪，PPS 脉冲通过激光扫描仪的触发输入口输入到激光扫描仪中，该同步过程需要计算机的参与，并且需要特别注意 UDP 数据发送时序，需要一起回应以后才能算是一个有效的同步过程。

由于 LMS-Q120i 的扫描数据获取，是依靠 100M 网传输的，因此在本论文的研究中，采用了计算机捕获时间标签扫描仪发送，同时由 GPS 发送 1PPS 信号的方法。

**FARO -Focus 3D 120:**

Focus 3D 120 是一个 2D/3D 扫描仪，该扫描仪精度高，但测量距离不太远，在本论文研究中用于扫描道路路面及道路两旁的附属地物。

Faro Focus 3D 激光扫描仪既可以作为主动同步器 (Master timer)，也可以作为被动同步器 (Slave timer) [Faro 2011]。

当作为主动同步器时，Faro Focus 3D 内部的时间系统作为参考时间系统，外部设备通过 CAN 方式获得 Faro Focus 3D 的内部时间，获取时间的同时，扫描仪发出 Trigger\_out 电信号，该电信号可以输入组合导航系统中记录下该事件，如下图所示；当作为被动同步器时，外部时间系统（如 GPS 时间系统）作为参考系统，通过 CAN 通讯方式给激光扫描仪设置外部时间，同样在给 Faro focus 3D 设置外部时间时，需要 Trigger\_in 电信号标记准确的时间点，如下图所示。

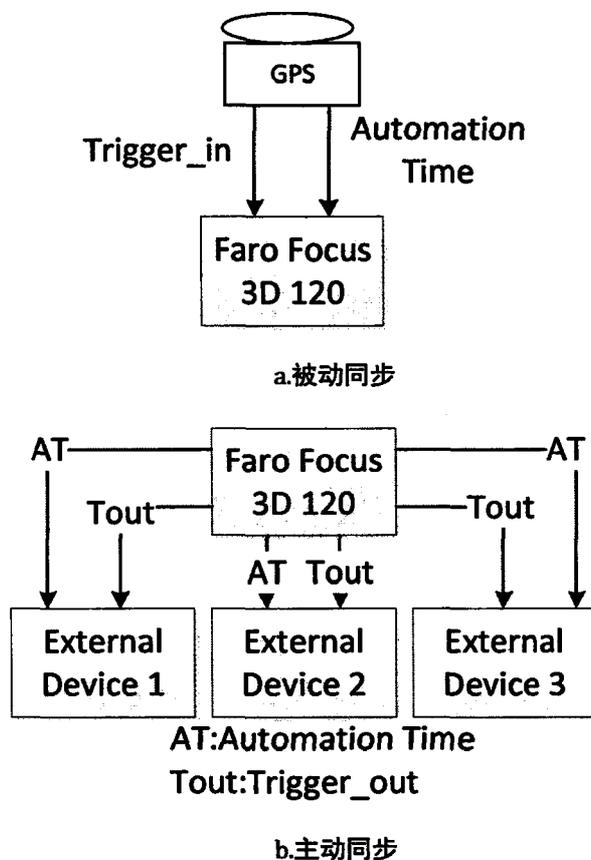


图 3.10 Focus 3D 120 同步原理

在主动同步和被动同步两种方式中，主动同步在数据采集时实现起来相对来说简单，但系统没有直接引入 GPS 时间基准，需要使用仪器时间和 GPS 外部

事件时间记录的时间进行比对插值。为简化后处理，在本研究中使用被动同步方法，即使用同步器捕获 GPS 时间信息，编码成 64 位 UNIX 时间格式，使用 Pre-Triggered 消息，通过 CAN 总线发送给扫描仪。

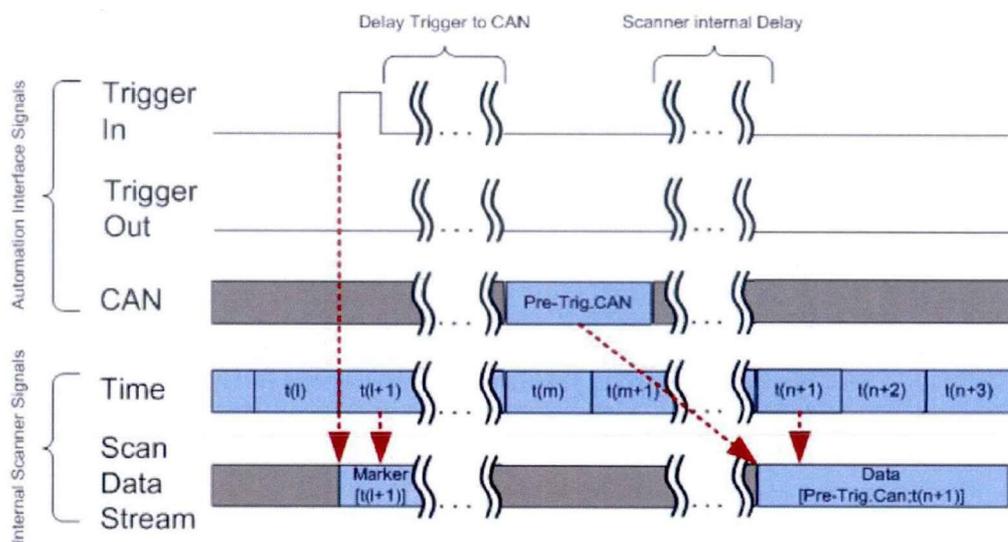


图 3.11 Focus 3D 120 被动同步的信号时序

在被动同步中，1PPS 的电平信号，作为仪器的被动同步 Trigger 信号，在本次 Trigger 信号到达后，下一次 Trigger 到达前，发送与该 1PPS 的相对应的时间标签，因此时间信息的发送比对应的 1PPS 信号稍晚，但不能晚于下一次 1PPS。在此过程中仪器会按照时序在扫描数据流中记录每次 1PPS 到达的时间和 GPS 时间标签数据，从而把每个扫描线和扫描点的时间统一到 GPS 时间系统中。

分析不同核心传感器的同步方式，对于理解每种传感器的时空特性和控制特性并设计与之相协调的控制电路和数据同步采集软件具有非常重要的意义，上面的分析基本涵盖了车载移动测量系统中涉及到的传感器，这对基于多传感器的车载移动测量系统集成有良好的指导意义。

### 3.5 系统同步控制设计及同步数据采集

根据前面的分析，本文研究所涉及的项目中设计完成的系统同步体系如图 3.12 所示。



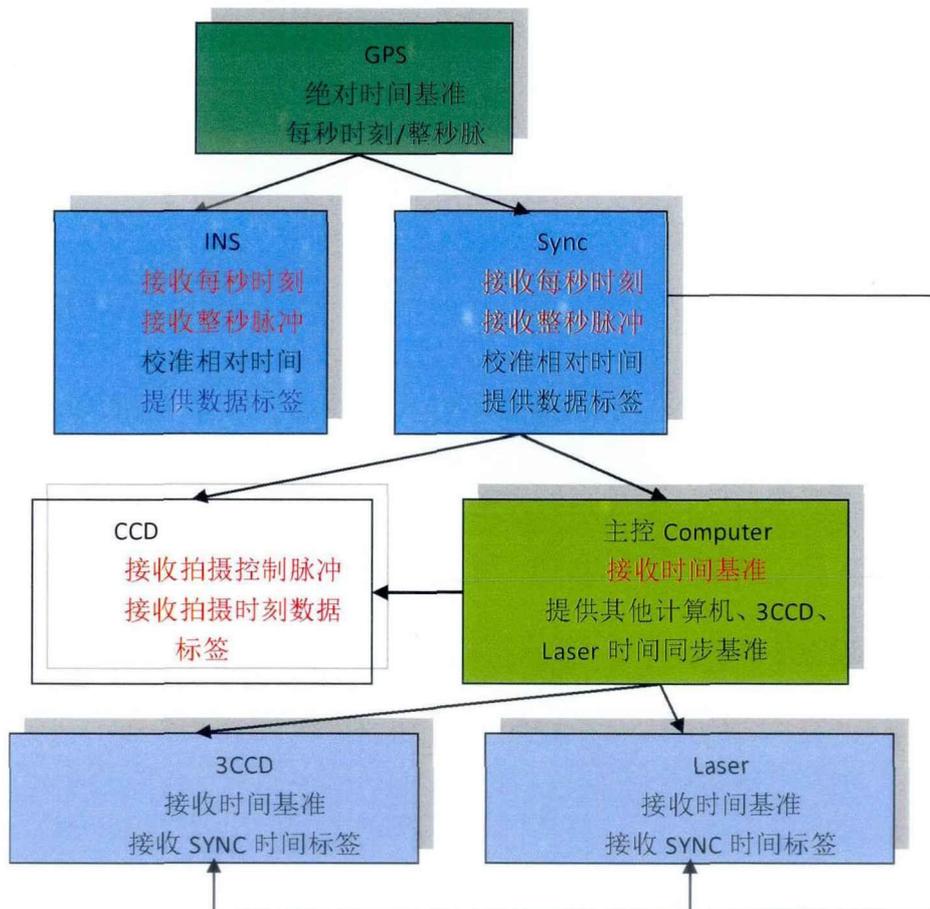


图 3.13 数据同步采集控制流程

系统的数据采集软件针对不同的设备基于该同步数据采集流程编写，采集软件在对应的数据采集计算机上运行，实时同步地获得多个传感器测量数据。

### 3.6 本章小结

本章围绕多传感器的同步数据采集展开，在深入分析 GPS 的时空特性以及其它传感器的时空特性基础上，设计了一种 GPS 同步时钟控制器，针对车载移动测量系统几种重要传感器分析和设计了有效的同步方法，并利用该 GPS 同步时钟控制器实现车载移动测量系统中各传感器的时空同步。

## 第4章 移动测量系统三维测量技术

### 4.1 组合定位定姿

车载移动平台的定位与定姿是车载移动测量系统的一个重要部分，其提供的时间、姿态与位置创建了系统的时空基准，平台的定位与定姿精度直接决定了系统的最终精度[孙红星 2004]。目前，车载移动测量系统的定位定姿一般采用 DGPS/INS 组合的方式进行，差分 GPS 能够消除星钟误差、星历误差、对流层误差、电离层误差，从而大大提高定位精度[关凤英 2006；夏熙梅 2002]，因此采用差分 GPS/INS 组合定位定姿的方式来提高定位定姿的精度，即 DGPS/INS 组合定位定姿，本章所涉及的问题是车载移动测量系统的核心，本章为系统的成功集成奠定基础。

在 GPS 信号良好的前提下，GPS 能够提供连续的高精度定位；然而，在市区环境以及隧道、高架等复杂环境中，GPS 信号经常受到遮挡，同时易受多路径效应的影响，使 GPS 的定位精度无法满足需求；此外，GPS 的定位结果输出频率有限，一般为 1-50HZ，无法满足车载移动测量系统的动态测量需求。INS 能够在短时间内提供高精度的位置与姿态数据输出，其输出频率高达 200HZ；但其定位定姿误差随着时间快速积累，无法持续的提供高精度定位定姿结果；另外其需要外部数据源提供初始位置与姿态，限制了惯性导航系统的独立使用。无论是单独的使用 GPS 定位定姿还是单独使用惯性导航系统进行定位定姿，都存在其不足，难以满足车载移动测量系统的定位定姿的需求；将 GPS 与 INS 系统进行组合能够取长补短，在 GPS 信号良好区域，可以利用 GPS 的高精度定位结果校准 INS 误差，而在 GPS 信号较弱甚至完全没有 GPS 信号的时候，可利用 INS 的自主定位定姿能力，提供持续的高精度位置与姿态输出。

与 GPS 输出绝对位置不同，INS 是一个相对位置解算系统，加速度（线、角）传感器以一定的测量周期输出数据，新位置通过与原来位置的改变量计算出来。

GPS/INS 组合系统的基本原理可以用图 4.1 说明。

相对位置计算需要用到以下三个方面数据：

行驶距离：通过线加速度计积分得到或者通过里程计的速度脉冲得到。

行驶方向：车辆前进或者后退指示信号。

转角：通过角加速度计积分得到角度变化数值。

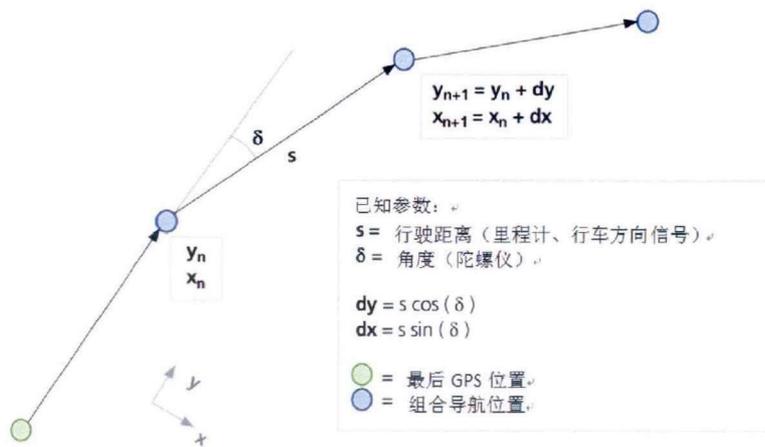


图 4.1 组合导航航位推算原理[u-blox,2010]

为得到连续的绝对定位，起点必须是 GPS 给出来的一个绝对位置，也就是最后一个可用的 GPS 定位位置；初始航向也必须是通过一段 GPS 线计算给出来的方向，也就是在 GPS 信号良好的时候，运动车辆行驶一段直线所计算出来的方位角。

由于传感器存在误差，航位推算结果位置会与实际位置有偏差。惯性组合导航单元航位推算误差及性能评价如图 4.2。

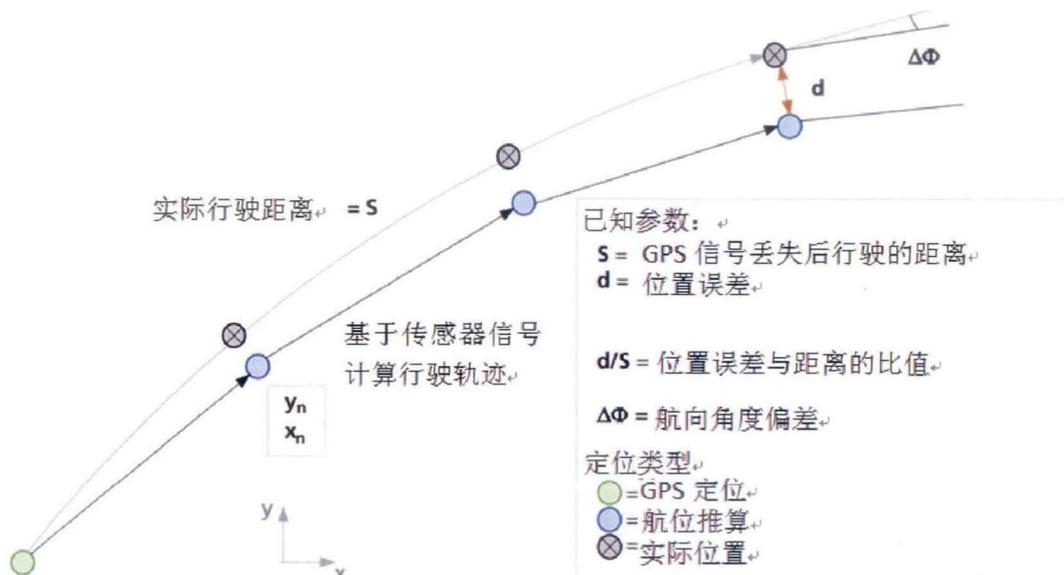


图 4.2 惯性组合导航航位推算误差及性能[u-blox,2010]

航位推算是一个增量算法，位置精度取决于所使用传感器的质量和稳定性。实际在 GPS/INS 集成组合中需要使用非常高精度、高稳定性的加速度元件，以及复杂的卡尔曼滤波算法，才能得到良好的定位和定姿效果。

### 4.1.1 组合定位定姿原理

DGPS/INS 组合定位定姿系统主要由基站 GPS、移动站 GPS、惯性测量单元 IMU、里程计以及导航计算机等组成。

在本文中所集成的车载移动测量系统中采用 SPAN 组合定位定姿系统。SPAN (Synchronized Position And Navigation) 系统是加拿大 Novatel 公司的 GPS/INS 组合定位定姿系统, 在该系统中, 惯性测量单元 (IMU) 与 GNSS 接收机紧密耦合, GNSS 和 IMU 通过耦合取长补短, 其集成架构如下图 4.3 所示。

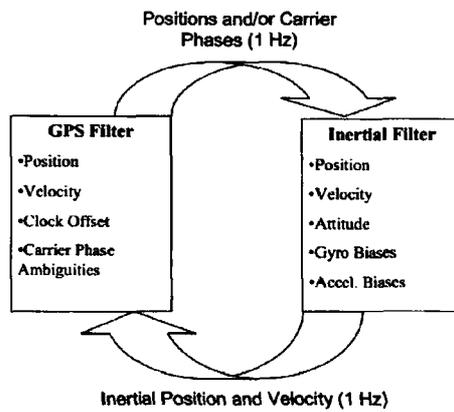


图 4.3 SPAN 集成架构

SPAN 系统的典型配置包括基站 GPS、移动站 GPS、惯性测量单元 (IMU) 以及导航计算机 PCS, 其安装示意图如图 4.4 所示。

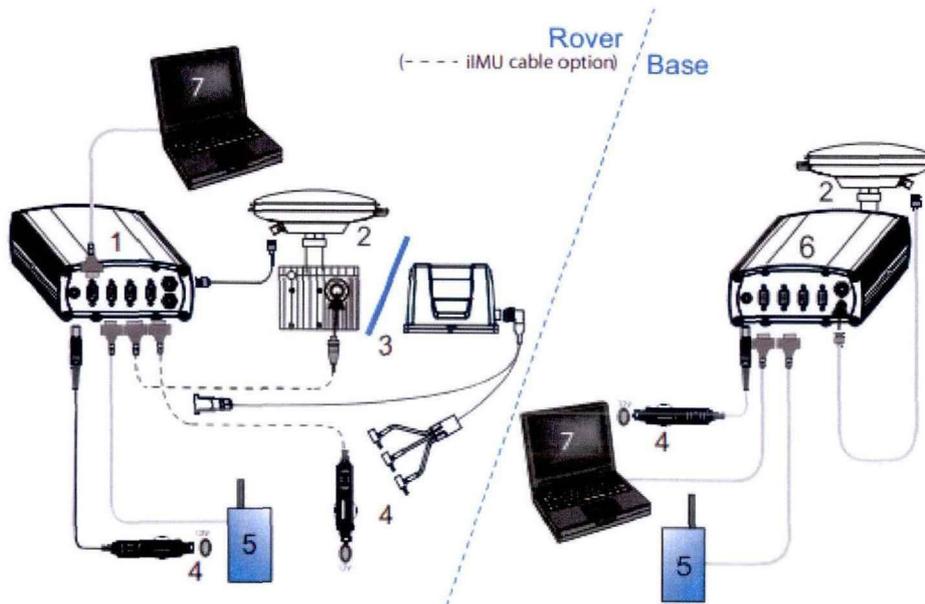


图 4.4 SPAN 系统典型配置

基站 GPS（上图中序号 6）：基站 GPS 就是传统的测量型 GPS，作业时基站 GPS 安置于 GPS 信号良好区域的已知点上，在整个作业时间范围内，基站 GPS 以静态测量的方式采集数据，供移动站测量数据进行差分后处理使用；若需进行实时差分处理，则在基站 GPS 以及移动站中需增加无线通信设备，并通过无线通讯设备实时将 GPS 差分改正信息发送到移动站中。

移动站 GPS（上图中序号 1）：移动站 GPS 是 GPS/INS 组合定位定姿系统的一部分，包括 GPS 天线以及集成在导航计算机中的 GPS 接收机。移动站 GPS 在车载移动测量系统的行驶过程中实时的采集 GPS 数据。

惯性测量单元 IMU（上图中序号 3）：IMU（Inertial Measurement Unit）是指陀螺仪、加速度计及其安装结构组件及电子设备的组合[A. Chatfield 1997]。在 SPAN 组合定位定姿系统中使用的 INS 是捷联式惯性导航系统，捷联式惯性导航系统使用由微型计算机及航位推算处理软件构成的数学平台，加速度传感器安装在飞机、轮船和汽车等运动载体上[徐胜 2007]，不需要平台式惯性导航系统中的稳定平台和常平架 [孙树侠 1992]。SPAN 组合定位定姿系统可使用的惯导包括 Honeywell HG1700、Northrop Grumman LN200、iMAR-FSAS 以及 UIMU-LCI 等。

导航计算机 PCS（上图中序号 7）：导航计算机采集、存储 GPS 以及惯导数据，并利用导航计算机中的数据处理软件实时的处理 GPS 与惯导数据，实时的输出位置与姿态信息。

#### 4.1.1.1 组合定位定姿数据后处理软件

目前，使用较广泛的 GPS/INS 数据后处理软件主要有加拿大 Intermap 公司 StarNav 软件、Applanix 公司的 POSPac 软件以及加拿大 Novatel 公司 Inertial Explorer 软件，本文使用 Inertial Explorer 软件进行 GPS/INS 数据后处理。

Inertial Explorer 后处理软件将 IMU 传感器阵列测量得到的六自由度角速度以及加速度信息与 GNSS 观测数据进行融合，得到高精度的位置与姿态信息。Inertial Explorer 采用松组合或者紧组合的方式处理 GPS 与惯导数据，紧组合方式采用载波相位观测值进行处理以限制在 GPS 卫星数不足（只有 2-3 颗卫星时）时的定位误差[Novatel 2011]。

#### 4.1.1.2 松散组合模式

松散组合的工作原理是，首先独立解算 GPS 的位置和速度，而将 INS 滤波器作为主滤波器，滤波器以 GPS 与 INS 的分别获取或推算出来的速度和位置的差值作为量测值，使用卡尔曼滤波算法，估计出惯性导航系统的导航位置误差

和速度误差，进而采用误差值校正惯性导航系统[陈世同 2005]。松散组合是一种较低层次的组合，其特点是 GPS 和 INS 独立导航计算，当 INS 时间被 GPS 时间同步后，GPS 辅助 INS 进行误差的估计和补偿，该组合方法工程实现简单，算法可靠性比较强。但是其不足是当 GPS 卫星数少于 4 颗时，GPS 则不能进行有效的独立定位和测速，INS 独立以线加速度和角加速度测量数据为基础进行航位推算，由于线加速度和角加速度本身的测量精度有限，并且存在时间相关的漂移，航位推算精度比较低。松散组合的工作原理如下图 4.5 所示[朱智勤 2012]。

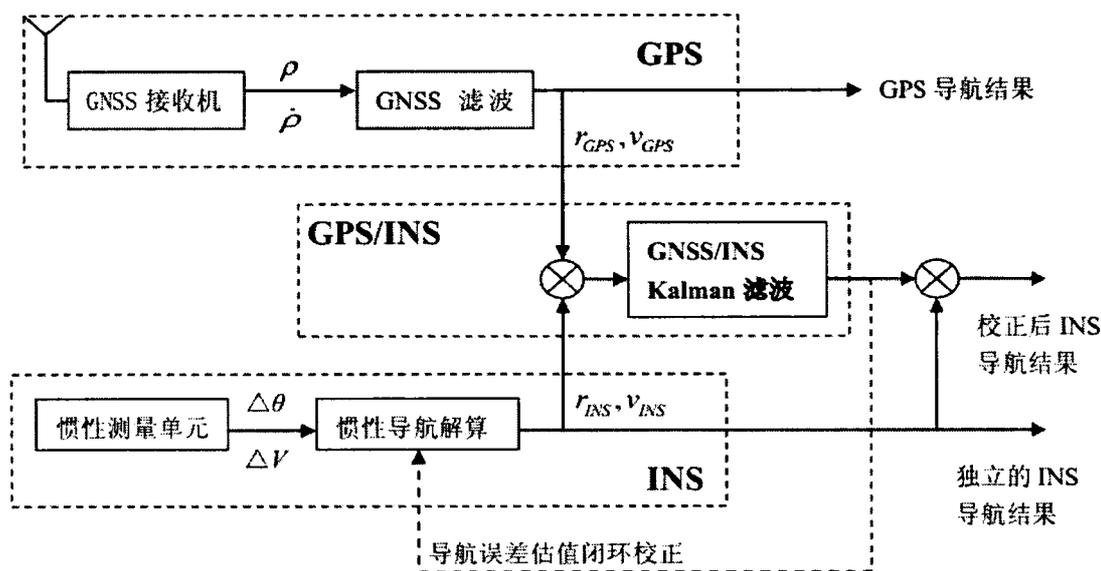


图 4.5 松散组合工作原理

#### 4.1.1.3 紧密组合模式

在 GPS 卫星数少于四颗的情况下，紧密组合能够充分利用少量的 GPS 观测值，紧密组合的原理如下图 4.6 所示[朱智勤 2012]。

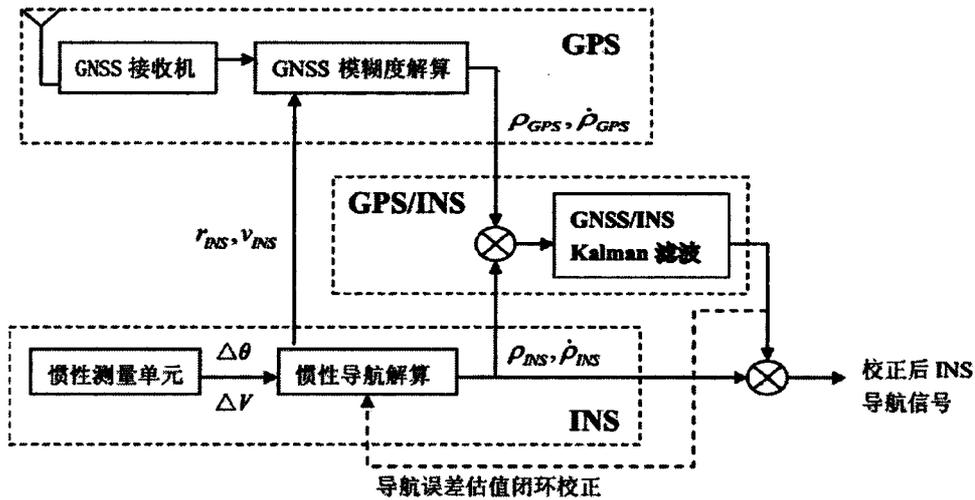


图 4.6 紧密组合的工作原理

紧密组合的工作方式是将 GPS 码观测信息、相位观测信息或者 Doppler 观测信息等直接输入滤波器，滤波器使用 GPS 观测信息估计 INS 的导航误差以及元件误差等，在估计出 INS 的导航误差以及元件误差后对其进行校正。根据输入滤波器的观测值不同有不同的组合方式，一种是采用码观测，采用该种组合方式精度较低，但工程实现比较简单。另一种方式是采用载波相位观测，也可以附加 Doppler 观测值，这是一种比较复杂的组合方式，组合的精度较高。

#### 4.1.1.4 DGPS/INS数据处理流程

使用 Inertial Explorer 后处理软件进行 GPS/INS 数据后处理包括四个步骤：数据预处理，GPS/INS 数据组合，数据平滑以及结果输出。数据处理流程如下图 4.7 所示。

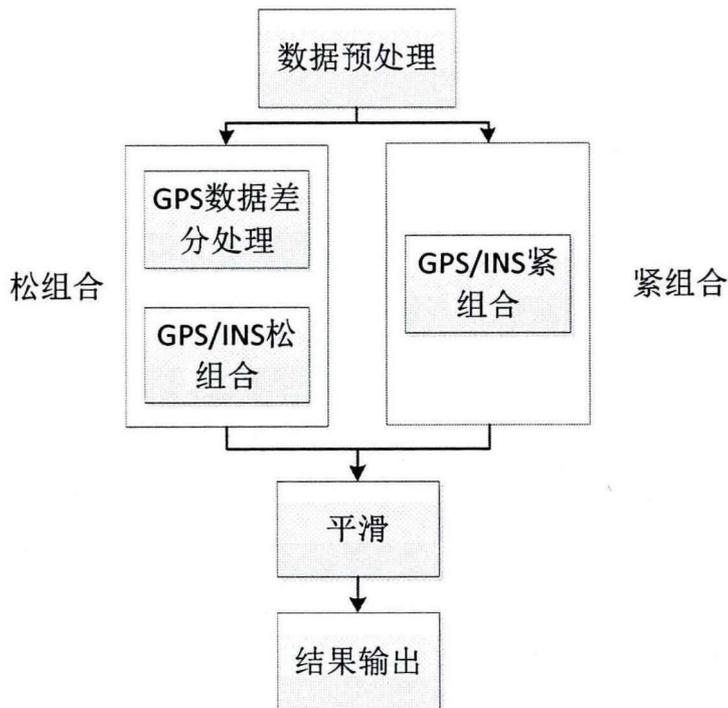


图 4.7 Inertial Explorer 数据处理流程

上图中，数据预处理指将不同格式的 GPS 原始数据以及惯导原始数据转换为 Inertial Explorer 自定义的数据格式；数据转换完成后，可以选择松组合或者紧组合中的一种进行数据处理，使用松组合时，需要先单独对 GPS 数据进行差分处理后，再进行组合，紧组合直接使用 GPS 数据与惯导数据进行处理；Inertial Explorer 使用 Rauch-Tung-Striebel[Rauch 1965]平滑算法对组合结果进行平滑，可选择向前平滑、向后平滑、双向平滑以及 Multi-Path 等多种平滑方式；平滑完成后，选择需要输出的数据类型进行输出。

#### 4.1.2 车载系统组合定位定姿实验

在车载 DGPS/INS 数据后处理中，可以采用松组合以及紧组合等不同的解算模式进行数据解算，不同的解算模式会得到不同的定位与定姿结果；在车载移动测量系统的集成过程中，不同的应用领域对系统的最终精度有不同的要求，因此需要选择合适精度水平的组合定位定姿系统，以达到最高的性价比；在差分 GPS 中，基线的长短（基站与移动站的距离）会影响差分定位精度，同样，在 DGPS/INS 中，基线的长短也会影响 DGPS/INS 定位的结果；本小节将通过实验的方法探讨这些因素对定位定姿精度的影响。

为了有效的进行实验，我们在一个车载移动测量系统中搭载多套 GPS/INS 组合定位定姿系统，使用一个 GPS 天线通过功分器将天线信号分给多个

GPS/INS 组合定位定姿系统，同时，将多个惯性测量单元排成一条直线，固定于刚性平板中。

在实验数据采集中，采集了不同环境下的组合定位定姿数据，包括 GPS 信号足够良好区域（三环高速公路）、受高大树木遮挡区域（武汉大学信息学部）以及完全没有 GPS 信号区域（武汉长江隧道）等，实验数据采集中行车轨迹如图 4.8 所示。

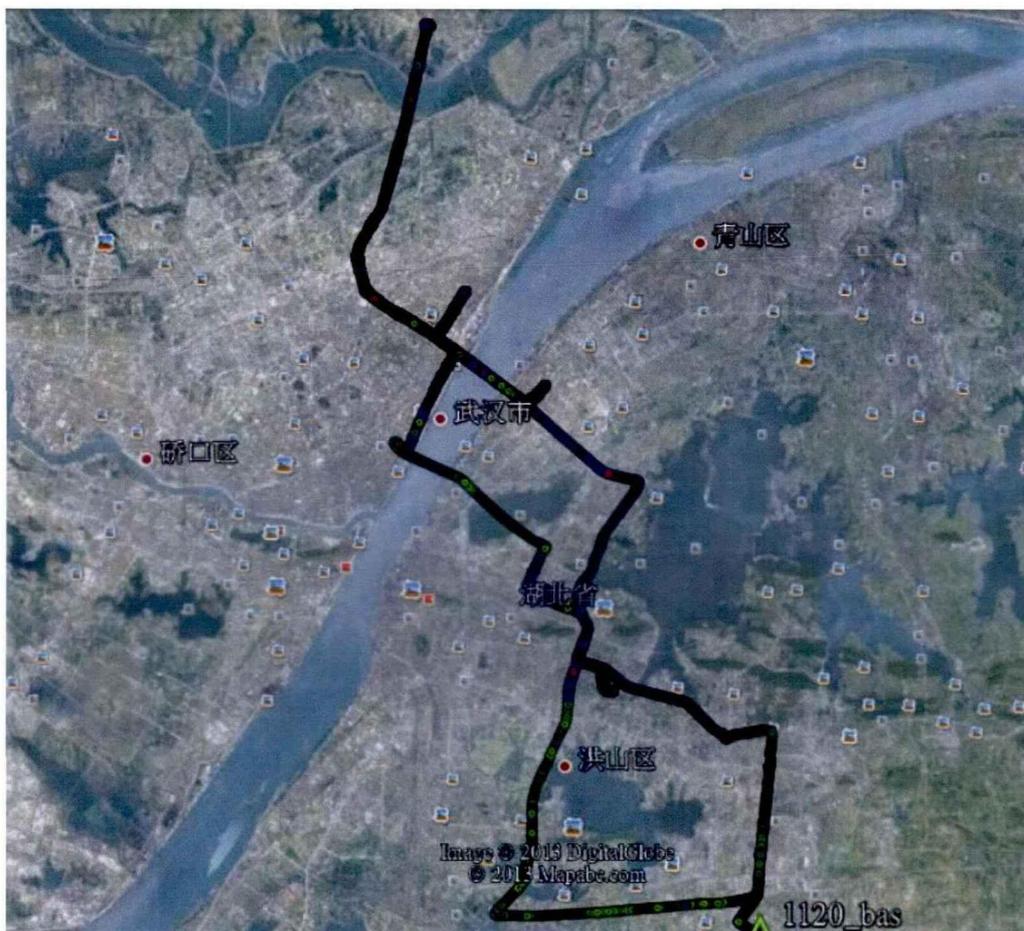


图 4.8 实验数据采集行车轨迹

实验使用加拿大 Novatel 公司的组合定位定姿系统，包括两台 SPAN-SE 组合定位定姿系统以及一台 SPAN-CPT 组合定位定姿系统，SPAN-SE 组合定位定姿系统可以使用多种不同的惯性测量单元，在本实验中，两台 SPAN-SE 组合定位定姿系统分别使用 IMAR-FSAS 以及 CIMU-LCI 惯导，它们的技术参数如下表 4.1 所示。

表 4.1 实验所用惯导技术参数

	SPAN-CPT	iIMU-FSAS	UIMU-LCI
Gyro Rate Bias	20deg/hr	0.75deg/hr	0.3deg/hr

Gryo Rate Scale Factor	1500ppm	300ppm	100ppm
Angular random walk	0.0667deg/ $\sqrt{\text{hr}}$	0.16deg/ $\sqrt{\text{hr}}$	0.05deg/ $\sqrt{\text{hr}}$
Accelerometer Bias	1.0mg	1.0mg	1.0mg
Accelerometer Linearity and Scale Factor	4000ppm	300ppm	250ppm
Velocity Random Walk	NULL	50 $\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$	50 $\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$

#### 4.1.2.1 松组合与紧组合解算结果对比

在车载移动测量系统中，GPS/INS 组合定位定姿数据主要有两种解算方式，一种为松组合方式，另一种为紧组合方式。

本次数据解算使用 SPAN-SE 加 iMAR FSAS 惯导采集的数据，图 4.9 松组合（上图）紧组合（下图）位置精度为松组合与紧组合模式进行数据解算后得到的位置精度，图 4.10 松组合（上图）紧组合（下图）姿态精度为松组合与紧组合进行数据解算后得到的姿态精度。

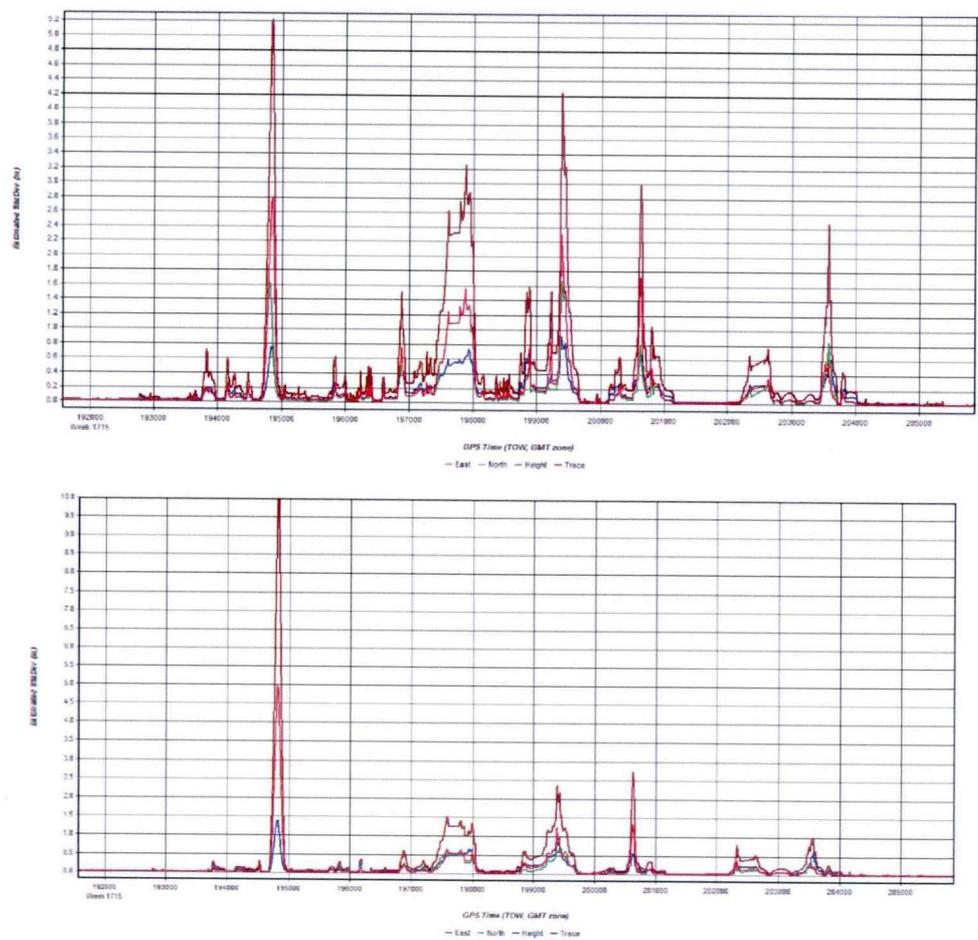


图 4.9 松组合（上图）紧组合（下图）位置精度

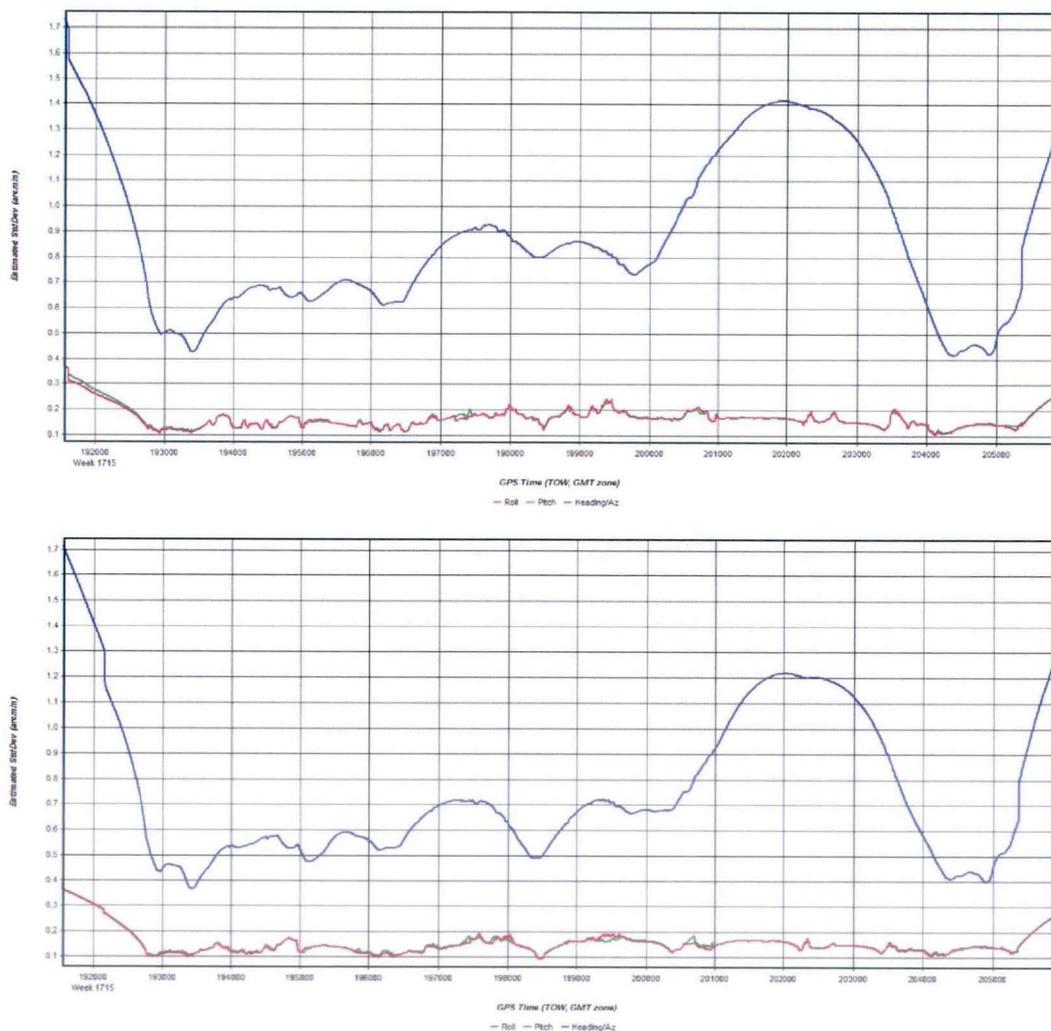


图 4.10 松组合（上图）紧组合（下图）姿态精度

从松组合与紧组合解算结果的精度图中可以看出，在 GPS 信号良好的时候，松组合与紧组合能够达到同样的精度水平；在 GPS 卫星数只有 2-3 颗的情况下，使用紧组合能够达到较好的精度；在 GPS 长时间失锁的情况下，松组合与紧组合的结算结果没有明显的区别。

在图 4.10 松组合（上图）紧组合（下图）姿态精度中，不管是使用松组合还是使用紧组合模式进行结算，起始阶段与结束阶段的姿态精度均比较差，这主要是由于惯导需要在起始阶段以及结束阶段必须利用 GPS 轨迹进行航向对齐导致的，因此在实际作业过程中，进入作业区前以及结束作业后需要进行一段时间的 GPS/INS 数据采集。

#### 4.1.2.2 不同精度惯导解算结果对比

在实验中，本文选取一段 GPS 信号良好的区域（约 10 分钟）进行分析，在对原始数据不做任何截断处理的情况下，使用紧组合方式进行解算，以此得到

的位置与姿态作为基准。然后，将 GPS 原始数据在相同时间点截去 1 分钟、两分钟、三分钟以及四分钟，分析并比较他们对组合定位定姿的影响，截去一分钟、两分钟、三分钟以及四分钟的 GPS 数据后的定位误差见表 4.2 中断 GPS 信号后不同组合系统定位误差。

表 4.2 中断 GPS 信号后不同组合系统定位误差

惯导型号	SPAN-CPT		SPAN-FSAS		SPAN-LCI	
	2D(m)	H(m)	2D(m)	H(m)	2D(m)	H(m)
1min	0.264	0.041	0.187	0.078	0.105	0.053
2min	1.569	0.162	1.445	0.117	1.273	0.095
3min	2.393	0.920	2.356	0.358	1.894	0.165
4min	10.459	1.440	3.064	0.225	2.523	0.201

在截断 GPS 数据的时间范围内，由于 Inertial Explorer 软件采用双向处理技术，定位误差在截断时间的中间部分达到最大值，在恢复 GPS 信号后在 5S 内能够恢复正常定位水平，如图 4.11 GPS 信号失锁后的误差变化情况所示。

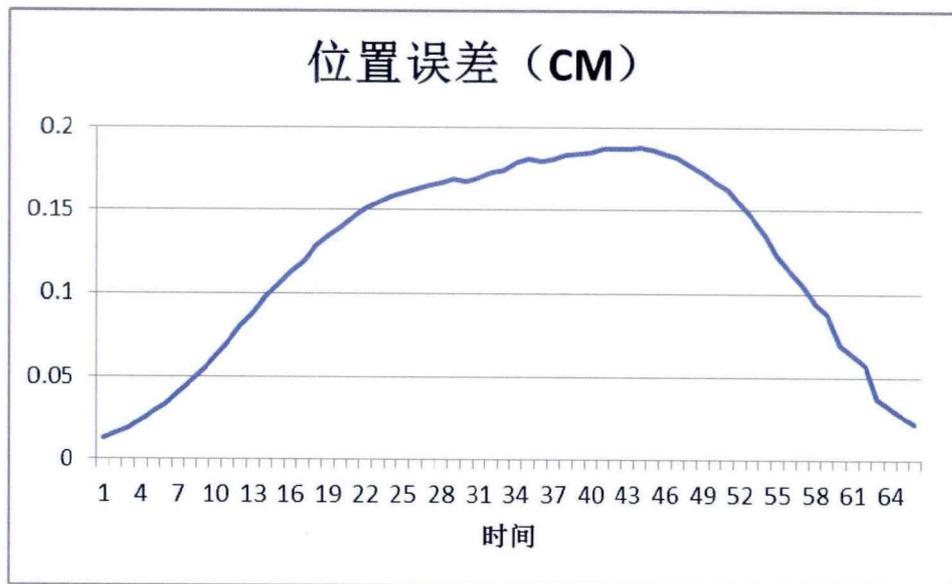


图 4.11 GPS 信号失锁后的误差变化情况

截去一分钟、两分钟、三分钟以及四分钟的 GPS 数据后的姿态误差见表 4.3 中断 GPS 后各组合系统的姿态误差（单位：度）。

表 4.3 中断 GPS 后各组合系统的姿态误差（单位：度）

惯导型号	SPAN-CPT			SPAN-FSAS			SPAN-LCI		
	Roll	Pitch	Heading	Roll	Pitch	Heading	Roll	Pitch	Heading
1min	0.008503	0.012175	0.017315	0.003081	0.003447	0.011217	0.002987	0.003074	0.010717
2min	0.009267	0.025381	0.011554	0.004575	0.014334	0.009658	0.003857	0.009427	0.012584
3min	0.014699	0.03862	0.034459	0.010505	0.015819	0.017979	0.006405	0.012715	0.014649

4min	0.034363	0.042483	0.025998	0.012041	0.014012	0.007773	0.009131	0.013221	0.015763
------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

#### 4.1.2.3 基线距离对DGPS/INS定位结果的影响

在 GPS/INS 组合定位定姿中，随着基站与移动站的距离的增加，系统的定位精度会降低，这是由于随着基线距离的增加，流动站和基站的空间和地面环境差别逐渐变大，很多公共误差难以通过差分的方式进行消除，同时随着解算基线距离增加可以基站和流动站同时观测到的相同的卫星数也会减少，影响定位精度或导致解算失败，另外，基线越长，模糊度的解算难度越大，成功率越低[王潜心 2011]。因此在车载移动测量系统的中应用 GPS/INS 这一核心定位定姿设备，研究基线长度对定位定姿精度的影响具有重要意义。

在本实验中，使用基线长度不同的单基站以及多基站对同一份 GPS/INS 数据进行处理，分析基线距离对定位精度的影响，数据采集行车轨迹如图 4.12 实验数据采集行车轨迹所示。



图 4.12 实验数据采集行车轨迹

#### (一) 多CORS站方式POS数据后处理

多 CORS 站方式后处理使用七个 CORS 站数据作为基站数据进行解算，CORS 站以及作业区的分布如图 4.13 多 CORS 站以及作业区的分布所示。



图 4.13 多 CORS 站以及作业区的分布

### (二) 单CORS站方式POS数据后处理

单 CORS 站方式 POS 数据后处理使用距离作业区最近的一个 CORS 站的观测数据作为基站数据进行 POS 数据的解算，CORS 站与作业区的分布如图 4.14 单 CORS 站与作业区的分布所示，CORS 站距离作业区域的距离约为 16.8KM。



图 4.14 单 CORS 站与作业区的分布

### (三) 单基站方式POS数据后处理

单基站方式在作业区架设基站（架设基站控制点 WGS84 坐标系下经纬度以及大地高已知，基站距离移动测量系统的距离在 7KM 以内），单基站方式的基站与作业区分布关系如图 4.15 单基站方式的基站与作业区分布。

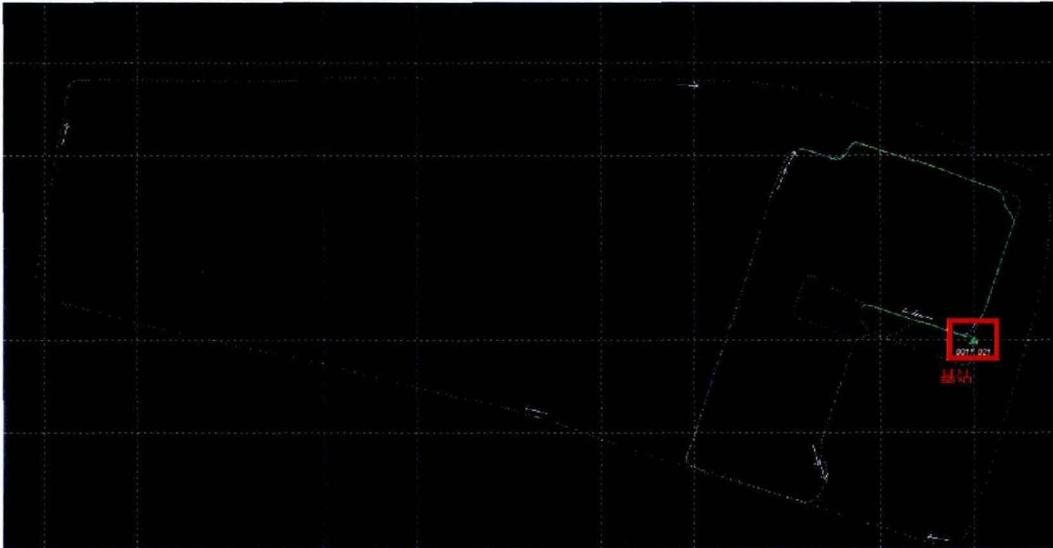


图 4.15 单基站方式的基站与作业区分布

#### (四) 不同基线长度处理精度分析

为了验证不同基线长度对 POS 数据后处理的精度影响，以扫描车两次经过同一条直线的高程差作为检验标准，检验结果如表 4.4 精度对比结果（单位：m）。

表 4.4 精度对比结果（单位：m）

基线距离	多 CORS 站	单 CORS 站(基线约 16.8KM)	单基站 (基线小于 7KM)
第一次经过高程	18.415	18.398	18.240
第二次经过高程	18.552	18.599	18.285
高程差	0.137	0.201	0.045

从上表中可以看出，基线在 7KM 以内，高程差在 5cm 以内，精度最高；多 CORS 站解算结果次之，高程差达到 13.7cm；基线超过 15KM 以后，组合定位结果的高差将达到 20cm。

从实验可以看出，在移动测量数据采集时，将基站架设在距离作业点较近的地方，能够提高 POS 数据的解算精度，进而提高整个系统的定位性能。

## 4.2 基于立体影像的三维测量

在基于立体影像的三维测量中，要分析和研究立体像对解析处理方法，首先必须建立起相机的成像模型。在建立好的相机成像模型中，涉及到立体相机中的单个相机的内部参数和两立体相机之间的相对位置和角度参数，如果获得了立体相机中这些参数，利用立体成像原理，通过立体像对解析处理算法就可以计算出空间点的三维坐标。从立体相机中左、右像点的位置计算出三维坐标

是立体摄影测量的一个重要任务和关键步骤。只有通过空间坐标点的三维坐标重建，才能从两幅二维图像中恢复三维的立体信息。从计算方法和过程上来讲，三维坐标计算是立体相机系统标定的逆过程。

### 4.2.1 立体相对测量模型

在双目立体测量系统中，两台相机安装在一个稳固的刚体之上，相机的光轴可以平行布置，也可以交向布置。如果按照理想的相机光轴平行布置的方式，立体相机中的左右相机各个光轴坐标轴需精确地平行，相机之间分开一定距离形成基线，因此左右相机的光轴原点位置会不相同，在这种情况下，立体相机中相对位置和姿态参数就大大简化，因此立体相机系统的标定和三维坐标的计算都比较简单。按照平行光轴的方式安装相机，只有在实验室环境下才能完成，如在高精度的坐标量测机的运动测头上安装一个相机，通过移动一个相机来模拟双目立体相机的测量，由于坐标量测机运动精度很高，在这种情况下相机在两个位置上的光轴以看着是平行光轴的。在实际立体测量应用中，这样的条件很难满足，而且在平行光轴立体测量模型下，双目立体相机中左相机的左边部分图像和右相机的右边部分图像是非重叠区域，因此相机的重叠区域会变小，有效测量范围有限，两相机布置为光轴交向方式是常见的选择，如图 4.16 所示。

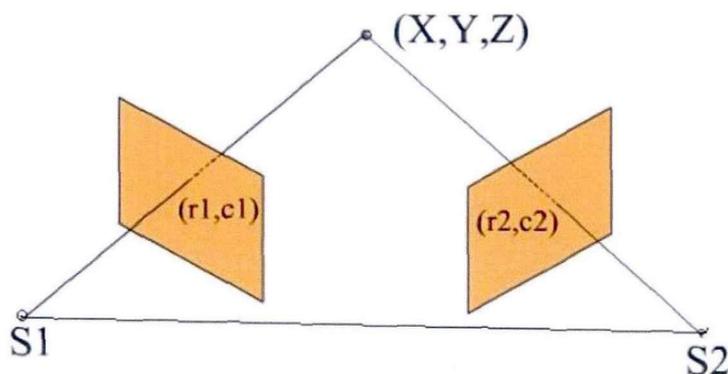


图 4.16 交向式空间前方交会

在立体相机测量系统设计中，交向方式布置相机，尽可能地扩大立体测量范围，有效地利用各相机的视场。

如图 4.16，S1 和 S2 的位置放一个交向布置立体相机，物方空间有一点  $(X, Y, Z)$  同时在左右两个相机上成像，物方点在左相机的图像上的图像平面坐标为  $(r_1, c_1)$ ，在右相机的图像平面坐标为  $(r_2, c_2)$ 。图 4.16 中  $(r_1, c_1)$  和  $(r_2, c_2)$  分别所在的平面可以认为是左相机和右相机的成像平面。三维坐标的计算就是利用

左、右相机的各自参数和相对位置姿态参数以及从成像面上获取的左像点 $(r_1, c_1)$ 、右像点 $(r_2, c_2)$ ，求解物方点坐标 $(X, Y, Z)$ 。

通过相机的标定，可以获得立体相机的各自参数和相对位置姿态参数，根据共线方程并顾及到相机镜头的畸变有式(4.1)、(4.2) [李德仁 郑肇葆 1992；张祖勋 张剑清 2000]，单个相机只有两个方程，需求解三个未知数 $(X, Y, Z)$ 。当采用立体相机成像时，左右相机总共可列出四个方程，需求解物方点坐标中三个未知数，可用最小二乘的方法求解。

$$-f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} = u + \sigma_u(u, v) \quad (4.1)$$

$$-f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} = v + \sigma_v(u, v) \quad (4.2)$$

观察(4.1)、(4.2)由于相机参数已知，因此式子的右边导出更简洁的形式，令 $u_{LF} = u + \sigma_u(u, v)$ ， $v_{LF} = v + \sigma_v(u, v)$ ，那么对于左相机有：

$$\frac{a_{L1}X + a_{L2}Y + a_{L3}Z + X_{Ls}}{c_{L1}X + c_{L2}Y + c_{L3}Z + Z_{Ls}} = u_{LF} \quad (4.3)$$

$$\frac{b_{L1}X + b_{L2}Y + b_{L3}Z + Y_{Ls}}{c_{L1}X + c_{L2}Y + c_{L3}Z + Z_{Ls}} = v_{LF} \quad (4.4)$$

式(4.3)、(4.4)也可写为如下形式：

$$(a_{L1} - u_{LF}c_{L1})X + (a_{L2} - u_{LF}c_{L2})Y + (a_{L3} - u_{LF}c_{L3})Z = u_{LF}Z_{Ls} - X_{Ls} \quad (4.5)$$

$$(a_{L1} - u_{LF}c_{L1})X + (a_{L2} - u_{LF}c_{L2})Y + (a_{L3} - u_{LF}c_{L3})Z = u_{LF}Z_{Ls} - X_{Ls} \quad (4.6)$$

同样右相机也有关系式(4.7)、(4.8)：

$$(a_{R1} - u_{RF}c_{R1})X + (a_{R2} - u_{RF}c_{R2})Y + (a_{R3} - u_{RF}c_{R3})Z = u_{RF}Z_{Rs} - X_{Rs} \quad (4.7)$$

$$(a_{R1} - u_{RF}c_{R1})X + (a_{R2} - u_{RF}c_{R2})Y + (a_{R3} - u_{RF}c_{R3})Z = u_{RF}Z_{Rs} - X_{Rs} \quad (4.8)$$

式(4.5)、(4.6)、(4.7)和(4.8)构成一个方程组[刘勇 2004；李玉广 2009]，通过观察左相机和右相机各自的方程可知，该方程组是线性的，所以测量点的三维坐标 $(X, Y, Z)$ 可以采用一个线性的最小二乘解方法求解出来。

现建立立体相机坐标系，如图 4.17 所示。

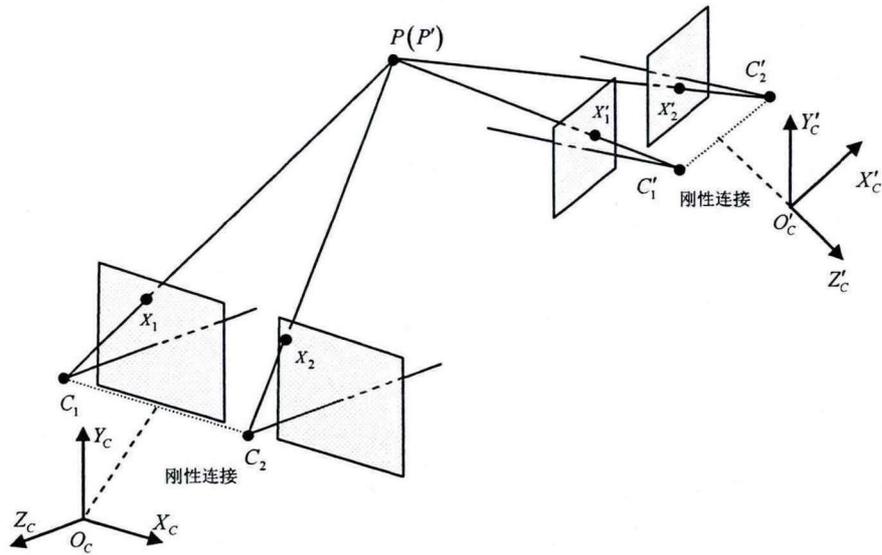


图 4.17 立体相机坐标系

其中  $O_c - X_c Y_c Z_c$  为标定相机时所用控制场坐标系。由立体相机标定原理可知，标定结果中的外方位元素（三个平移量和三个旋转量）表示相机在控制场坐标系里的位置和姿态，相机与该坐标系构成了刚性关系。当移动了立体相机，则相当于把该坐标系也做了相应的移动  $O'_c - X'_c Y'_c Z'_c$ 。因此， $O'_c - X'_c Y'_c Z'_c$  即相当于立体相机的坐标系  $O_s - X_s Y_s Z_s$ 。而通过立体影像重建的目标点三维坐标也位于这个移动后的坐标系下。因此，同一个目标点  $P$ ，通过不同位置和姿态的立体相机来测量，得到的坐标点是不一样的  $P'$ ，且与立体相机构成了一种相对关系。

#### 4.2.2 绝对测量模型

仅利用立体影像所测得的尺寸是物体的真实值，但其位置却是相对于立体相机坐标系的，而非大地坐标系。为了能直接从影像上定位目标，需要把测得的相机坐标系点转换到大地坐标系。如果能知道每个立体影像拍摄时立体相机在大地坐标系的位置和姿态，那么从立体影像上所测的坐标就可以转换到大地坐标系下。

在设计车载系统时，立体相机、组合定位导航系统和汽车三者之间被定义为刚性连接（汽车坐标系一般定义为与汽车惯导坐标系重合）。它们自身的局部坐标系之间只相差一个平移和旋转关系。因此，如果已知组合定位导航系统的位置和姿态，和他们三者之间的相对关系，则可推算出立体相机的当前绝对位置和姿态。下图 4.18 为汽车惯导坐标系的设置，坐标系原点为惯导的中心，Y 轴指向汽车的前进方向，Z 轴竖直向上，X 轴按右手法则确定。按此设置，惯导

的翻滚角 (roll) 为绕 Y 轴的旋转角；俯仰角 (pitch) 为绕 X 轴的旋转角；航向角 (heading) 为绕 Z 轴的旋转角，且方向相反。



图 4.18 安装汽车上惯导的坐标系

图 4.19 为立体相机坐标系、组合定位导航坐标系和大地坐标系三者之间的关系

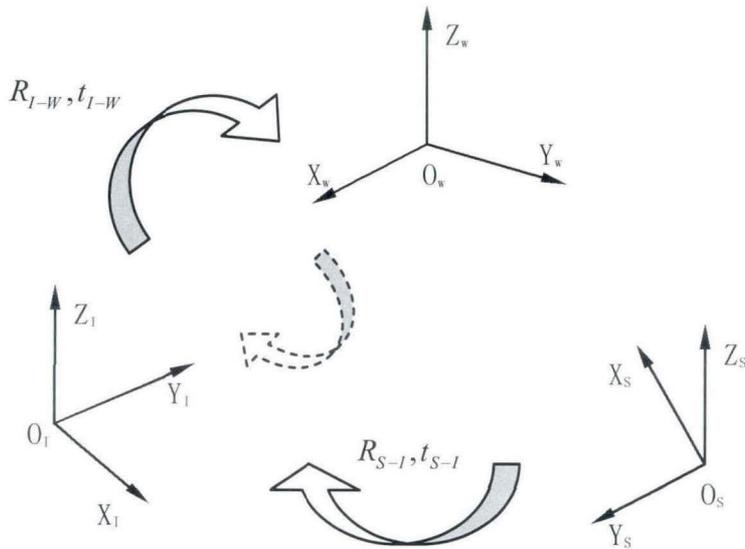


图 4.19 车载立体测量系统中坐标系转换关系

图4.19中,  $O_w - X_w Y_w Z_w$  代表大地坐标系,  $O_I - X_I Y_I Z_I$  代表组合定位导航坐标系,  $O_S - X_S Y_S Z_S$  表示立体摄影测量坐标系。

设  $O_S - X_S Y_S Z_S$  坐标系中的一点  $(X_S, Y_S, Z_S)$  转换到  $O_I - X_I Y_I Z_I$  坐标系中  $(X_I, Y_I, Z_I)$  的方程式为:

$$\begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{bmatrix} = R_{S-I} \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} + t_{S-I} \quad (4.9)$$

其中  $R_{S-I}$  和  $t_{S-I}$  表示从坐标系  $O_S - X_S Y_S Z_S$  到坐标系  $O_I - X_I Y_I Z_I$  的旋转矩阵和平移矢量, 是需要通过标定得出的。

由组合定位导航系统提供的 6 个外部定向参数  $X_{POS}, Y_{POS}, Z_{POS}, roll, pitch, heading$ , 可以把惯导坐标系  $O_I - X_I Y_I Z_I$  里的一点  $(X_I, Y_I, Z_I)$  转换到大地坐标系  $O_w - X_w Y_w Z_w$  里的点  $(X_w, Y_w, Z_w)$ , 其转换方程为 (式中的 r,p,h 分别表示 roll,pitch 和 heading 角):

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-h) & \sin(-h) & 0 \\ -\sin(-h) & \cos(-h) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(r) & \sin(r) \\ 0 & -\sin(r) & \cos(r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(p) & 0 & -\sin(p) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(p) & 0 & \cos(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{POS} \\ Y_{POS} \\ Z_{POS} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

因此, 通过立体影像得到的三维点可通过如下步骤转换到大地坐标系下:

利用公式(4.9)把位于立体相机坐标系下的点转换到惯导坐标系, 需要事先已知  $R_{S-I}, t_{S-I}$ 。

利用公式(4.10)把位于惯导坐标系下的点转换到大地坐标系下, 需要的位置和姿态可从惯导数据中获得。

由上可知, 基于立体影像的三维测量, 只要已知  $R_{S-I}$  和  $t_{S-I}$  即可通过影像来定位目标的绝对位置。而  $R_{S-I}$  和  $t_{S-I}$  的确定, 需要通过标定过程来得到。

图 4.20 是用数字摄像机同时拍摄的 4 个画面。

图 4.21 是立体系列影像测量界面。



图 4.20 系列立体影像

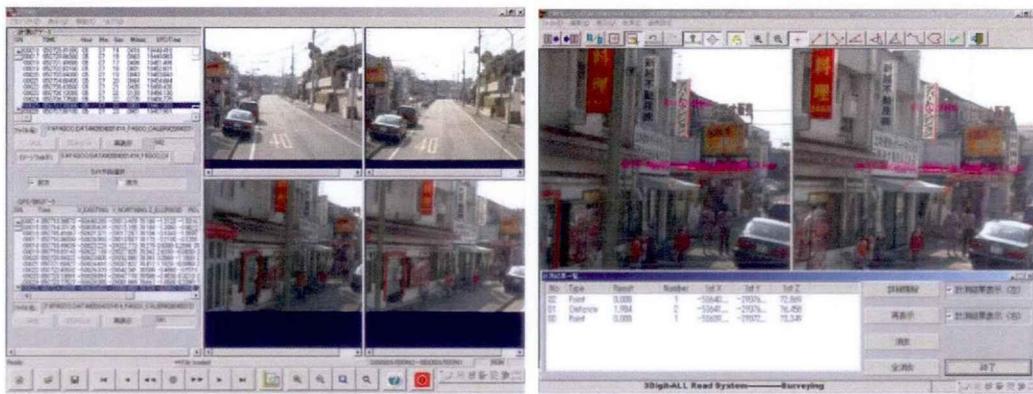


图 4.21 立体影像三维测量（左图为数据管理界面、右图为立体量测界面）

通过基础的点坐标量测可以实现距离、角度、面积等的量测。

### 4.3 车载激光扫描技术

三维激光扫描系统可划分为三类：机载（或星载）类型激光扫描系统，地面型激光扫描系统，手持型激光扫描系统[马力广 2005]。在地面型激光扫描系统中，可将激光扫描仪置于三脚架上进行单站三维扫描，此方式称为固定式激光扫描系统；也可将激光扫描仪与组合定位定姿系统、光学成像系统等集成于一个数据采集平台上，将采集平台安置于汽车、舰船上进行移动式数据采集，此即为移动式激光扫描系统。本文中的车载激光扫描技术指将激光扫描仪集成在车载移动数据采集平台中的激光扫描技术。

不管是机载（或星载）型激光扫描系统、地面型激光扫描系统还是手持型激光扫描系统，其核心技术均为激光测距。有两种基本的方法实现激光测距，一

种是光线传播时间测量法，另一种是三角法激光测距。其中光线传播时间测量法又可分为脉冲法与连续波法[Vosselman 2010]。

### 4.3.1 车载激光扫描仪工作原理

车载移动测量系统中搭载的激光扫描仪主要有两种工作方式：线扫描模式以及走走停停模式（Go and Stop Mode）[Kukko 2007]。线扫描模式车载移动测量系统在车辆的行进过程中进行断面扫描，下图中的绿色粗实线表示激光扫描仪有效扫描边界，两条绿色粗实线之间的区域表示有效扫描区域，绿色细实线代表激光束，蓝色折线代表地物表面，包括道路面以及建筑物外轮廓，红色点则代表激光扫描点，随着车辆的前进，连续的断面构成地物的三维采样表达，如图 4.22 所示。

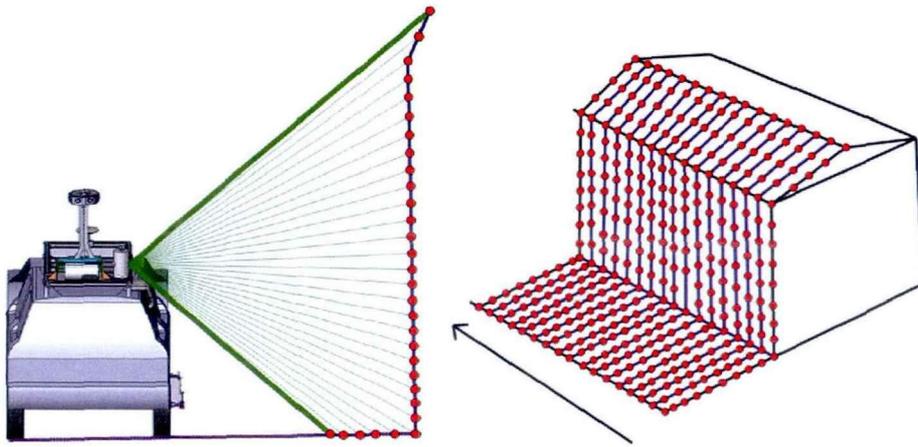


图 4.22 车载激光线扫描示意图

图 4.22 中，黑色实线是地物的轮廓线，带箭头的直线表示行车轨迹以及方向，红色点表示激光点，距离激光扫描仪距离近的区域激光点密度比距离激光扫描仪距离远的区域密度大，蓝色实线表示一条扫描线。走走停停模式车载移动测量系统在需要进行扫描的区域将车静止，使用激光扫描仪的三维扫描模式对周围地物进行扫描。

本文中的车载移动测量系统中，在动态测量时激光扫描仪采用线扫描模式进行工作；在走停模式和静态模式中，激光扫描仪采用 3D 扫描模式进行工作。

### 4.3.2 车载激光点云重建

车载移动测量系统中，各传感器的测量是在传感器自身坐标系下完成的，车载激光扫描仪的原始扫描数据基于激光扫描仪自定义的扫描仪坐标系，扫描

过程中，相对于激光扫描仪自身来说，扫描在一个平面内进行，如图 4.23 所示。

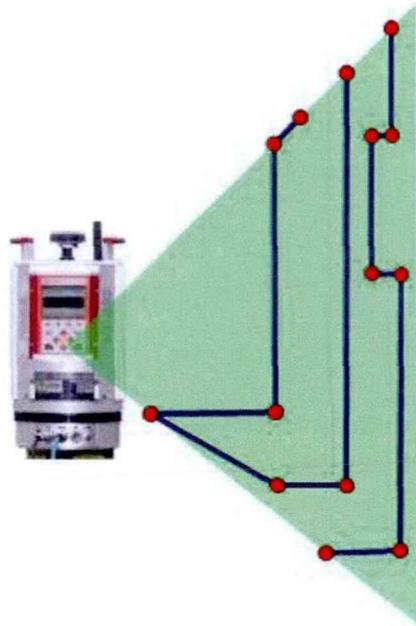


图 4.23 车载激光扫描线“聚集”于一个平面中

图 4.23 中，每一条蓝线代表不同时刻的一条扫描线，激光扫描仪在扫描仪坐标系下的一个固定平面内进行扫描，因此，车载激光扫描仪的原始扫描数据“聚集”在一个平面内，车载移动测量系统集成过程中的一个核心技术就是从一个平面中的“二维”激光点云中恢复出地物的三维结构，论文中将这一过程称为车载激光点云重建。

#### 4.3.2.1 车载激光扫描定位原理

车载移动测量系统中涉及到的几个坐标系之间的关系如下图 4.24 所示。

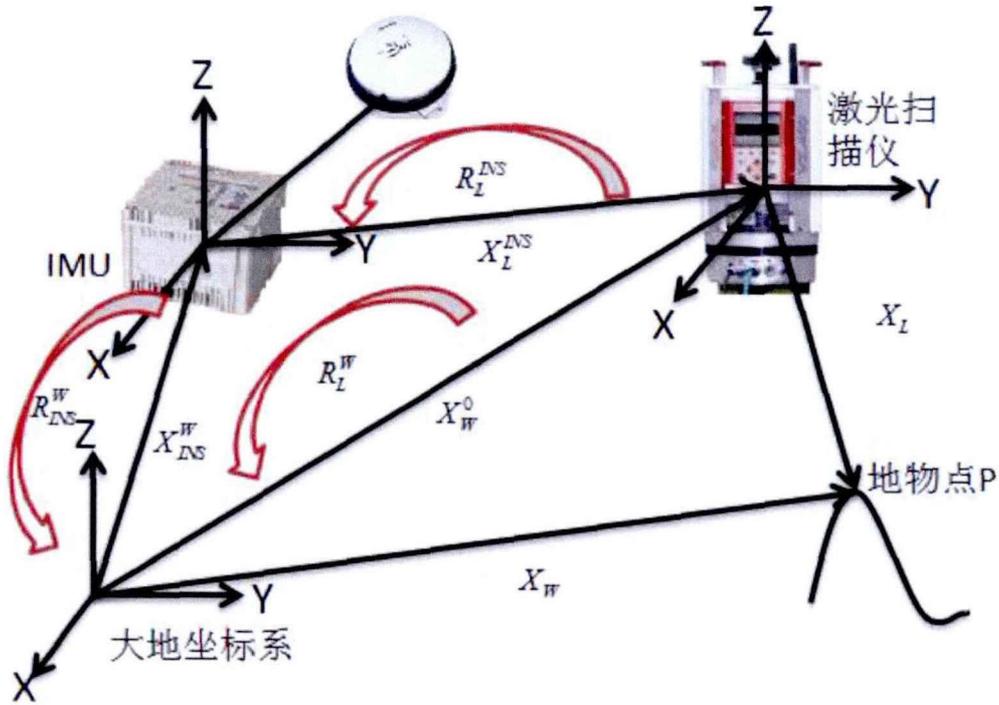


图 4.24 移动测量系统中各坐标系之间的关系

如图 4.24，假设在  $K_L$  时刻，激光扫描仪坐标系下任一地物点  $P$  的坐标为  $X_L$ ，其对应地面点的 WGS-84 坐标为：

$$X_W = X_W^O + \lambda R_L^W X_L \quad (4.11)$$

其中  $\lambda$  为尺度因子； $X_W^O$  为激光扫描仪坐标系原点在 WGS-84 系下的坐标； $R_L^W$  为激光扫描仪坐标系到 WGS-84 坐标系的旋转矩阵。

由于激光扫描仪坐标系和惯导坐标系之间的关系固定，且惯导载体和 GPS 接收机之间的偏移量可通过直接测量获得，则  $X_W^O$ 、 $R_L^W$  分别为：

$$X_W^O = X_{INS}^W + R_{INS}^W X_L^{INS} \quad (4.12)$$

$$R_L^W = R_{INS}^W R_L^{INS} \quad (4.13)$$

式中： $X_{INS}^W$  为惯导坐标系原点在 WGS-84 坐标系中的坐标向量， $R_{INS}^W$  是惯导坐标系到 WGS-84 坐标系的旋转矩阵， $X_{INS}^W$  以及  $R_{INS}^W$  可通过 GPS/IMU 组合定位定姿数据联合解算获得； $X_L^{INS}$  为激光扫描仪坐标系原点在惯导坐标系中的偏移向量（平移参数）， $R_L^{INS}$  是由激光扫描仪坐标系与惯导坐标系间的旋转角所构成的旋转矩阵， $X_L^{INS}$  以及  $R_L^{INS}$  由激光扫描仪的绝对标定得到。

综合式(4.12)、(4.13)，可得到车载激光扫描系统的严密定位方程：

$$X_W = X_{INS}^W + R_{INS}^W X_L^{INS} + \lambda R_{INS}^W R_L^{INS} X_L \quad (4.14)$$

式中：

$$X_L^{INS} = [T_x, T_y, T_z]^T \quad (4.15)$$

$$R_L^{INS} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$R_{INS}^W = \begin{bmatrix} \cosh & -\sinh & 0 \\ \sinh & \cosh & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r & -\sin r \\ 0 & \sin r & \cos r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos p & 0 & \sin p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin p & 0 & \cos p \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

式中： $(r, p, h)$ 是对 GPS/INS 组合定位定姿数据处理后获得的激光扫描测量时刻的滚动角、俯仰角和偏航角。

#### 4.3.2.2 车载激光点云重建流程

本文所使用的三维激光点云重建流程如图 4.25 所示。

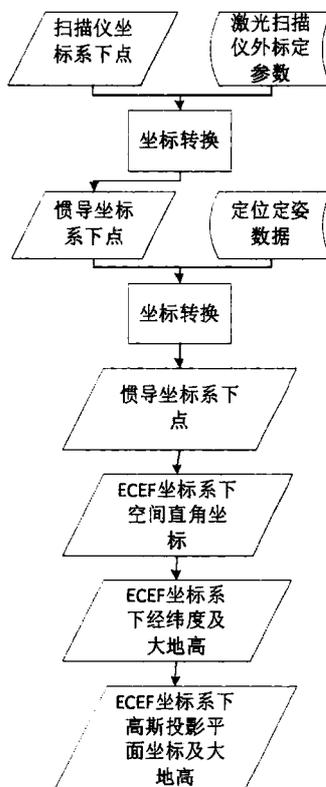


图 4.25 严密激光点云重建模型

车载激光点云重建技术根据激光扫描仪定位方程，将原始的激光扫描数据融合激光扫描仪外标定参数以及组合定位定姿数据，重建出三维的激光点云。

如前文所述，激光扫描仪坐标系下的激光点云“聚集”于一个平面内，如图 4.26 所示，图 4.26 中上图是激光扫描仪坐标系下点云的侧视图，从该图可以看到点云在一个面内，而在俯视以及正视图图中，点云在一条线上，结合侧视、俯视、正视以及斜视图能够清楚的看出激光点云“聚集”于一个平面内。

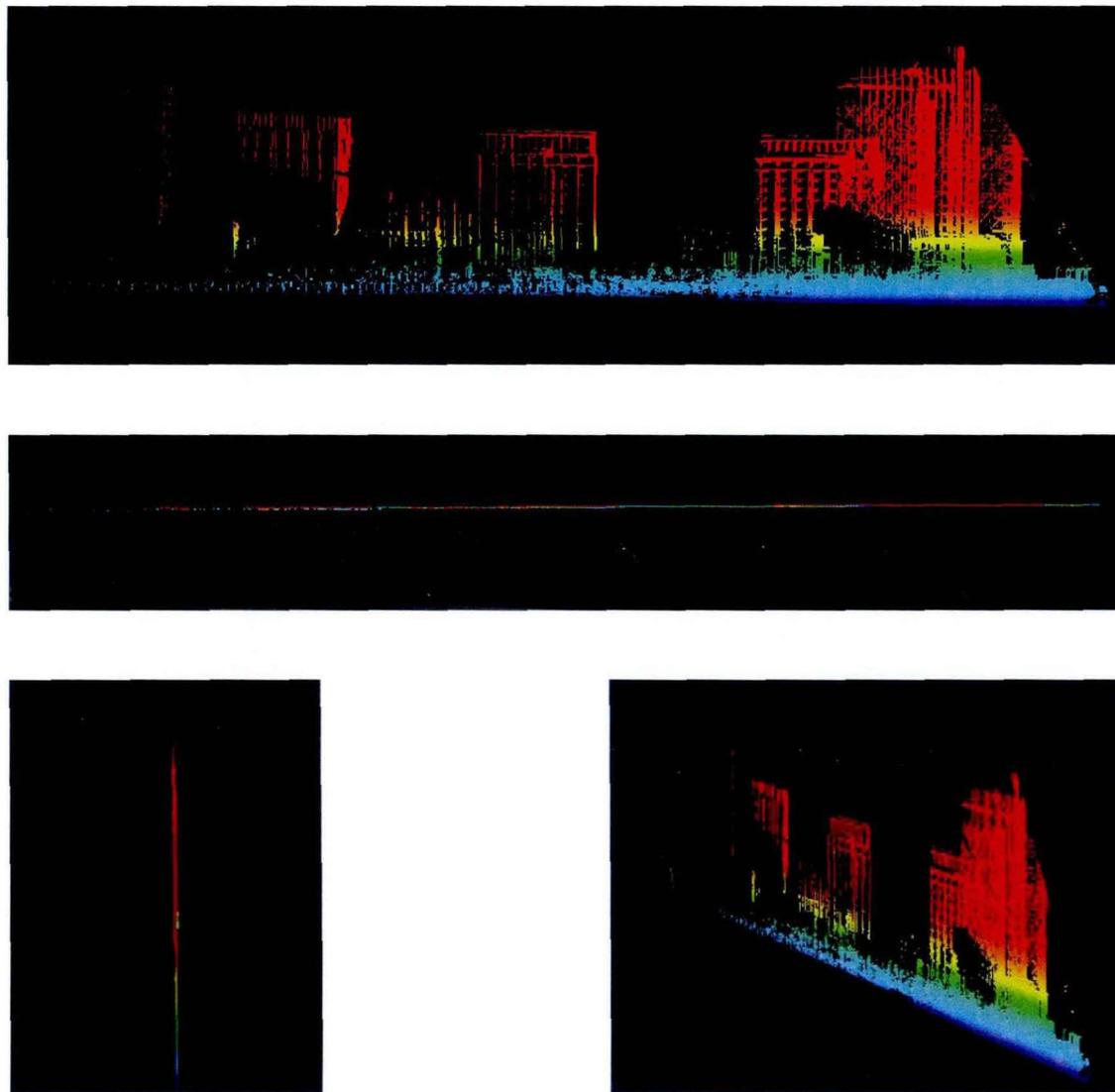


图 4.26 激光扫描仪坐标系下点云侧视、俯视、正视以及斜视图

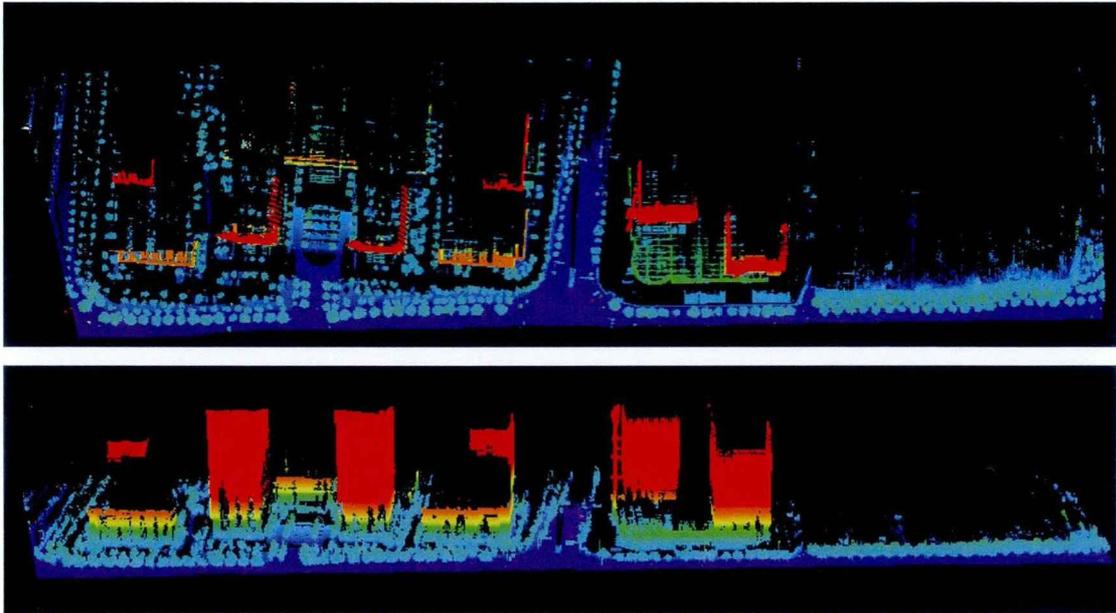


图 4.27 重建后激光点云的俯视以及侧视图

图 4.27 是激光扫描仪坐标系下的点云经过点云三维重建后得到的大地坐标系下的激光点云的俯视和侧视图，从图中能够清楚的看到房屋的立面以及道路旁边的树木。

#### 4.4 本章小结

本章主要论述了车载移动测量系统中的三维测量技术，包括 DGPS/INS 组合定位定姿技术、基于立体影像的三维测量技术和车载激光测量技术等。

通过实验分析了不同解算模式、不同精度等级惯性组合、不同的 GPS 信号失锁时间、基线长度对精度的影响，实验结果对车载移动测量系统的外业数据采集具有重要指导意义。

在分析近景摄影测量中立体影像相对测量和绝对定位原理的基础上，建立了车载立体像对的相对量测模型和绝对量测模型，基于此模型开发了车载立体影像量测软件。

本章还阐述了基于线扫描模式的车载激光扫描仪的工作原理，建立车载激光扫描绝对定位模型，为车载激光扫描仪的外标定及点云重建奠定基础。

## 第5章 全景成像相机集成

### 5.1 全景成像技术原理

全景影像是对于三维场景的一种超广角视野表达方式，与普通框幅式影像相比，它包含了更直观、更完整的场景信息。

#### 5.1.1 全景成像简介

全景成像技术可分为折反射系统和折射系统两大类[Jafar Amiri Parian, Armin Gruena 2010]，如图 5.1 所示。

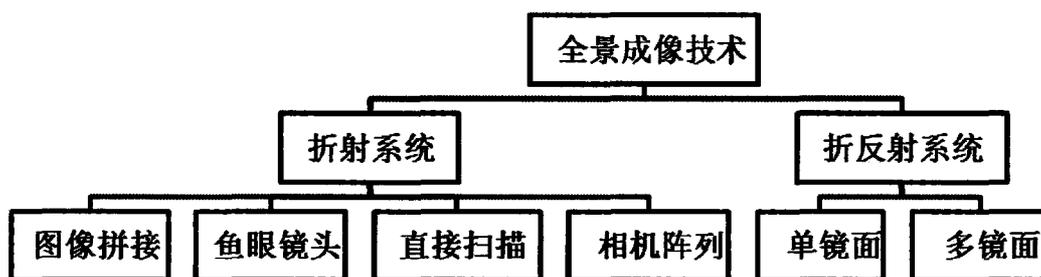


图 5.1 全景成像技术分类

折射系统由一个透镜（lenses）组成，它依据光学折射原理成像。该类全景成像系统只使用透镜进行成像，主要包含以下 4 种类型：

- 1) 图像拼接：对普通相机拍摄的多幅图像，通过图像拼接或缝合得到一幅新的图像[Shum 1999; Szeliski 1995]。其核心步骤是用图像匹配算法对多幅图像进行配准，并将其统一到同一坐标系下。
- 2) 鱼镜头：用视角超过  $180^\circ$  的鱼镜头相机[Herbert 1987]进行大视场范围内的影像采集[Coleord 1989; XiongYalin 1997;汪嘉业 2001;Slater 2010;邓松杰 2010]。该成像方式导致图像畸变较大，且图像分辨率不高。
- 3) 直接扫描：通过将一个数码相机或者 CCD 数字相机固定在绕轴旋转的支架上，旋转拍摄场景的多视角图像，生成无缝拼接图像[Hartlely 1993]。该类全景成像技术在传统的地面全景相机中得到广泛应用[刘帅 2011]。
- 4) 相机阵列：采用多个面阵 CCD 相机按照近似共投影中心安置，拍摄多幅框幅式图像并按照一定的投影模型拼接得到全景图像[Nielsen

2005))。该类全景相机具有 360° 全方位视角，帧率高，且在分辨率上占有绝对的优势，因此在移动测量领域被广泛应用。Google 公司用于街景数据采集的全景相机和 Ladybug5 全景相机等都属于该类型，两款全景相机如图 5.2 所示。



图 5.2 Google 全景相机和 Ladybug5 全景相机

折反射系统由一个透镜和一个反射镜面组成，其中反射镜面基于光学反射原理成像[Boult 1998; Baker, Nayar 1998; 苏连成 2006; 曾吉勇 2003; 王道义 1998]，它能够实时获取场景 360° 方向的全景图像。该类型全景相机结合反射镜与折射镜两种光学元件，通过拍摄目标在反射镜中虚像来扩大拍摄视场角。折反射全景成像系统根据反射镜的镜片数的不同，可以分为单镜面系统和多镜面系统两类。该类相机在设备价格上面具有优势，但成像设备的光学结构和成像模型过于复杂，造成后期的数据处理难度较大，且由于只采用一个成像面，成像分辨率较低。

考虑到以上各种全景成像技术的特点，本论文在车载移动测量系统集成研究中使用相机阵列式的全景成像系统。

### 5.1.2 全景成像模型

无论使用哪一种全景成像模型，全景相机在成像时，必须把拍照得到的系列实景图像投影到某一设定参数的规则曲面上（常用的曲面有圆柱面、球面、立方体等）。这样才能维持拍摄物体在实际场景中的空间对应关系。原图像经过投影后，仅保留了图像间的平移关系，而其旋转关系被消去了，这为图像的全景拼接做好了准备[李云伟 2007]。而获得的图像信息则以该曲面展开的形式保存在计算机上。对于全景成像系统来说，构造合适的投影模型及其相应的成像表达是非常重要的。

比较常见的全景投影方式有：柱面投影、球面投影和立方体投影，如图 5.3 所示。下面对这三种常用的全景投影方式进行简单介绍。



图 5.3 全景投影模型

1) 球面全景。球面全景图是由多张拼接图像投影到球体表面，并以球面图像的形式存储的实景图像。以球面模型的中心作为模拟摄像机的光心，它是描述一个场景的理想选择[苏莉 2010]。球面全景图在几何上表达为一个空间三维球体，而为了数据存储和平面显示的方便，球面全景图一般都是通过一定的投影函数将球面展开到二维平面，得到平面全景图，而本文中所展示的全景数据都是不同投影模型的展开图形式，这一点在下文中将不再说明。Ladybug3 全景相机获得的球面全景展开图如图 5.4 所示。



图 5.4 Ladybug3 球面全景图

2) 柱面全景。柱面模型是球面模型的一种简化形式，它将多张相机拍摄的实景图像拼接后投影到一个柱面上，以柱面全景图的形式存储，最常用的柱面是圆柱面[蒋晶，刘同明 2004；苏莉 2010]。柱面投影成像模型相对简单，而且对成像设备的要求不是很高，但是它只能提供水平方向上的 360° 的浏览，在全

景浏览等相关应用上具有一定的不足。Ladybug 3 全景相机获得的圆柱面全景如下图所示。



图 5.5 Ladybug 3 圆柱面全景

3) 立方体 (Cube) 全景。立方体全景图是将多张实景图像投影到一个立方体表面上，每一个表面由一幅上下、左右视场角都为  $90^\circ$  的图像构成。因此立方体全景相当于把全景图像重构为 6 个视场角为  $90^\circ$  的相机对上下、左右及前后分别无缝成像而获得的。立方体全景图具有存储方便的特点，同时它的每一个面与显示屏幕对应的重采样区域具有多边形边界，这为全景显示提供了方便，而且它能根据视角的变换将立方体全景图映射在视平面上，因此在场景的全方位展示上具有较大的优势，目前在互联网上发布的全景，几乎都采用立方体全景的方式。如图为 Ladybug 3 全景图像重构成立方体全景。

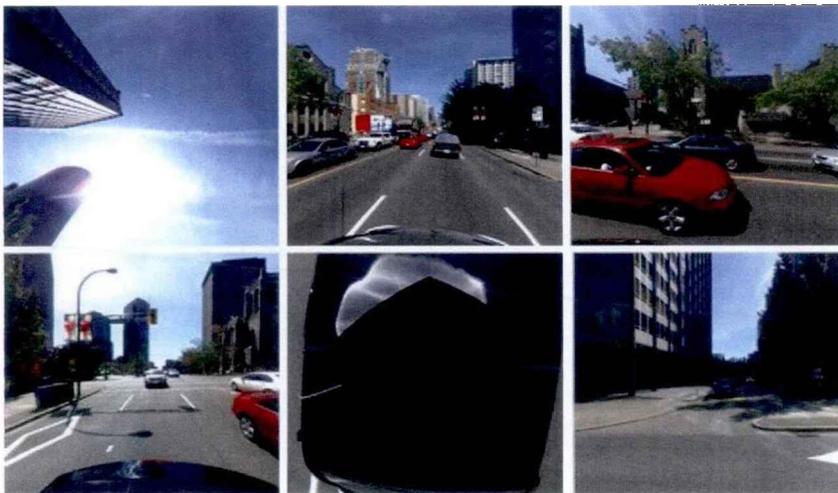


图 5.6 Ladybug3 立方体全景图

在以上的三种常见全景投影方式中，柱面和球面全景图由于其理论上是无缝的  $360^\circ$  成像模式，从而在现实中应用最为广泛。而考虑到柱面投影在竖直

方向上存在视角限制，因此本文的全景影像采用球面投影模型进行拼接成像。下面介绍球面模型的投影成像方程。

球面全景可以看做是观察点位于球心的一个球体模型，将相机获取的多视角场景序列数字影像通过一定的映射关系投影到一定半径的球体表面，从而形成视觉上360度无缝的场景[刘帅2011]。球面全景在几何上表达为一个空间三维球体，而为了数据存储和平面显示的方便，球面全景一般都是通过一定的投影函数将球面展开到二维平面，得到平面全景图，而全景展开最常用的投影模式为等矩形投影。等矩形投影采用类似经纬格网的方式表达全景球，如下图所示：

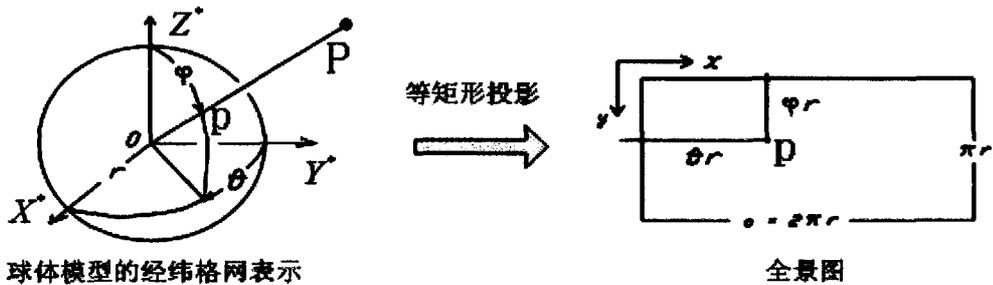


图 5.7 等矩形投影全景展开

设球体模型半径为  $r$ ，像点  $p$  在平面全景图上的坐标为  $p_1(x, y)$ ，其在全景球中的经纬坐标为  $p_s(\theta, \phi)$ 。以全景球中心  $O$ （即全景摄影中心）为坐标原点，构建球体坐标系  $O-X^*Y^*Z^*$ ， $P$  在球体坐标系下的坐标为  $P_s(X^*, Y^*, Z^*)$ 。则依据上图所示映射关系，有公式：

$$\begin{cases} x = R\theta \\ y = R\phi \\ R = a/2\pi \end{cases} \quad (5.1)$$

$$\begin{cases} X^* = R \sin \theta \sin \phi \\ Y^* = R \cos \theta \sin \phi \\ Z^* = R \cos \phi \end{cases} \quad (5.2)$$

由全景共线方程，考虑全景影像成像模型。设物方坐标系为  $O_1-XYZ$ ，地物点  $P$  在物方坐标系下的坐标为  $P(X, Y, Z)$ ，物方  $P$  在球体坐标系下的坐标为  $P_v(X^*, Y^*, Z^*)$ ，其在全景球中成像于点  $p$ ，如下图所示。设  $R$ 、 $T$  分别为全景影像外方位角元素和外方位线元素所组成的矩阵，则将  $P$  点的物方坐标转换为球体坐标的表达式如下[G.Fangi 2007, 2009]：

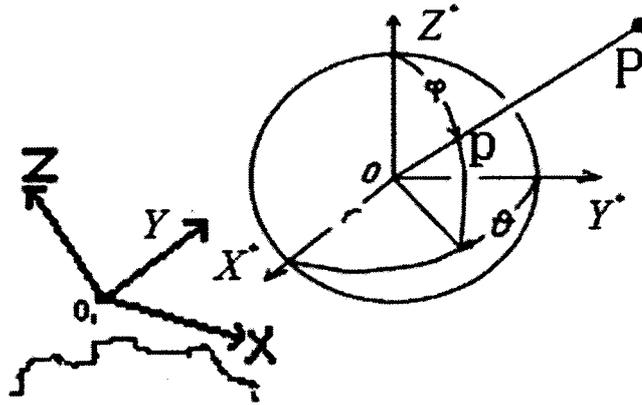


图 5.8 全景影像构像的几何表达

$$\begin{bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - T_x \\ Y - T_y \\ Z - T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d \sin \theta \sin \phi \\ d \cos \theta \sin \phi \\ d \cos \phi \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

其中,  $d = \sqrt{(X - T_x)^2 + (Y - T_y)^2 + (Z - T_z)^2} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$  表示物方点距离球心的距离,  $(T_x, T_y, T_z)$  为平移矩阵  $T$  在三个坐标轴方向上的分量 ( $r_1 \dots r_9$ ) 是旋转矩阵  $R$  的 9 个元素。结合式 5.2、5.3 则全景球投影公式:

$$\begin{cases} \theta = \text{atg} \frac{X^*}{Y^*} = \text{atg} \frac{r_1(X - T_x) + r_2(Y - T_y) + r_3(Z - T_z)}{r_4(X - T_x) + r_5(Y - T_y) + r_6(Z - T_z)} \\ \phi = \text{acos} \frac{Z^*}{d} = \text{acos} \frac{r_7(X - T_x) + r_8(Y - T_y) + r_9(Z - T_z)}{d} \end{cases} \quad (5.4)$$

另外, 由球面共线条件, 像点  $p$  及地物点  $P$  在球体坐标系下的坐标  $P_s(X', Y', Z')$ 、 $P_v(X^*, Y^*, Z^*)$  满足:

$$\begin{bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{bmatrix} = \frac{d}{r} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

## 5.2 全景相机集成

市场上的商业全景相机主要有 PointGrey 公司的 LadyBug 3[PointGrey 2012] 以及 IMC 公司的 Dodeca[ImmersiveMedia 2013]。LadyBug 3 由六个 Sony 的 CCD 相机组成(侧面五个加顶面一个), 单个 CCD 相机的像素为 200 万(1600\*1200); Dodeca 全景相机由十一个 CCD 相机集成, 单个相机的像素为 30 万(640\*480)。

LadyBug3 相机和 Dodeca 相机虽然是成熟的商业全景相机，但均存在分辨率不够高的问题。

### 5.2.1 基于工业彩色数字相机的全景相机研制

为实现目标场景的高同步性和高质量全景影像采集，在车载移动测量系统集成中自主研发了供电、同步和支撑硬件集成的多相机全景采集装置，该采集装置包含机盒、盖板、机盒底板、电路板、集线器、底部固定装置及 8 台相机，其特征就在于：

- 1) 机盒盖板和机盒底板为上下平行设置的板状构件，底部固定装置设置于机盒底板以将该采集装置固定于其它设备上；
- 2) 全景相机内部包含沿水平方向均匀分布的八台工业相机，各相机通过相机固定板固定在一块中空平板上，称为相机安装底板。相机安装底板通过 8 个等长铜柱固定在机盒底板上；
- 3) 全景相机外壳为截面为八边形的壳体，8 个侧面均开有圆孔供取景用。全景相机外壳上下各有 8 个螺纹孔，可分别与机盒底板、机盒顶板连接；
- 4) 相机固定板下方有环形电路板。电路板通过 4 个小铜柱固定在机盒底板上，作用是给 8 台工业相机供电并提供触发信号；
- 5) 该全景相机内部固定有两个 4 口 1394 集线器，可将 8 台工业相机的数据传输集中至 2 根 1394 线上。

全景相机的设计图如图 5.9 及图 5.10 所示。

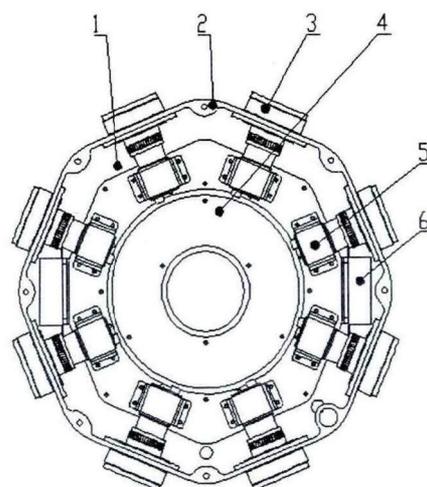


图 5.9 全景相机内部示意图

1-机盒底板 2-全景相机外壳 3-UV 镜装配 4-电路板

5-相机装配 6-1394 集线器

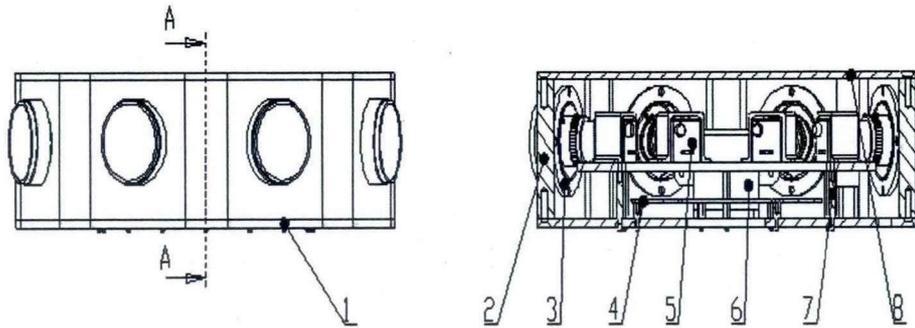


图 5.10 全景相机剖视图

- 1-机盒底板 2-全景相机外壳 3-UV 镜装配 4-电路板  
5-相机装配 6-1394HUB 7-支撑铜柱 8-机盒顶板

全景相机的具体指标参数如表 5.1 所示。

表 5.1 全景相机技术参数

指标	内容
CCD 传感器数量	8 个
布置方式	环形对称
型号	piA2400-17gc
成像方式	CCD
传感器大小	2454×2056
像素大小	3.45um
最大帧数	17fps
传输模式	100Mb/1000Mb
单相机焦距	5mm

与现有的商业全景相机相比，该全景相机具有以下优点和有益效果：

该全景相机采集的图像质量高；该全景相机由 8 台 CCD 相机构成，每台相机中 CCD 传感器的尺寸为 2456×2058，拼接后全景影像分辨率为 9173×2294，最大帧数可达 17fps，为高质量的图像获取提供了保证。

该全景相机结构简单，安装调试方便，运行稳定；合理的结构设计保证了装置安装、检修方便；在各种道路情况下均能稳定工作，保证了数据采集精度。

该全景相机结构紧凑，布局合理；与使用大体积单反相机的全景相机盒相比，此种相机盒具有较小的尺寸和质量，方便了设备运输、安装；内部相机均可单独调试，可根据不同采集情况为相机设定其最佳参数。

该全景相机可实时传输数据；其采集的画面可通过线缆实时传输到计算机上，保证了数据采集的直观性、有效性。

### 5.2.2 基于微单相机的分辨率全景相机研制

基于工业彩色数字相机的全景相机研制尽管取得了良好的效果，但是相机存在相机成本高、色彩不够鲜艳、全景成像不够完整等缺点。尤其是近来面向公众的网络全景服务的兴起，对全景的分辨率和色彩要求越来越高，基于工业彩色数字相机的全景已经不能满足此类要求。

为了满足高分辨率、高色彩还原性全景采集和发布的需要，在面向空间信息采集和发布的车载移动测量系统中，研制了一种集成 7 台微型单反相机的全景影像采集装置，该全景影像采集装置由高分辨率微型单反单相机组合、相机固定底板、侧板和筋板、同步触发电路板、散热装置及底部固定装置等部件组成。

下图为全景相机设计图，全景相机盒呈六面柱体，其中六台微单相机在水平方向均匀分布，顶部一台微单相机视角朝上。相机盒中间固定有同步触发电板，可为相机供电并发出同步触发信号，控制七台相机同时曝光并存储各自视角的照片。各相机连接有 USB 数据线至 USB 集线器，用以传输照片。相机盒底部有用于快速固定的零部件，可方便的将相机盒固定在车载平台上。

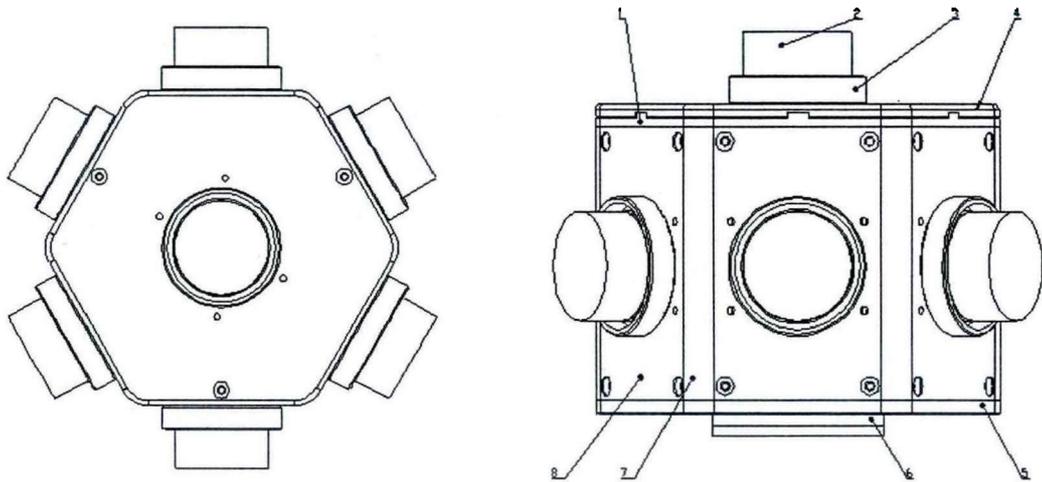


图 5.11 全景相机设计外观示意

- 1-顶部固定环、 2-单相机、3-镜头罩、4-机盒盖板
- 5-机盒底板、6-固定底板、7-侧板连接筋、8-相机侧板。

该全景相机的相关技术参数如表 5.2 所示。

表 5.2 全景相机技术参数

全景相机技术参数	
相机外形尺寸	287×290×215mm
相机重量	5Kg
单相机传感器规格	23.4*15.6mm Exmor APS
单相机传感器分辨率	4592*3056
最短拍照间隔	0.5s
最短拍照距离 (30Km/h)	5m
工作温度范围	-10°~ 50°
工作湿度范围	<95%RH
供电电压	8.4V
单相机内存	32GB
相机照片容量	≥5000
全景拼拍照片分辨率	≥(10000×5000)
数据传输端口	USB 接口

高分辨率全景相机在分辨率和色彩上具有较大的优势，该全景相机可用于在城市全景影像库构建、三维建模纹理采集、规划测量、城市部件采集等领域。

## 5.3 全景影像的生成

### 5.3.1 全景影像生成流程

本文全景影像的拼接流程概括如图 5.12 所示：

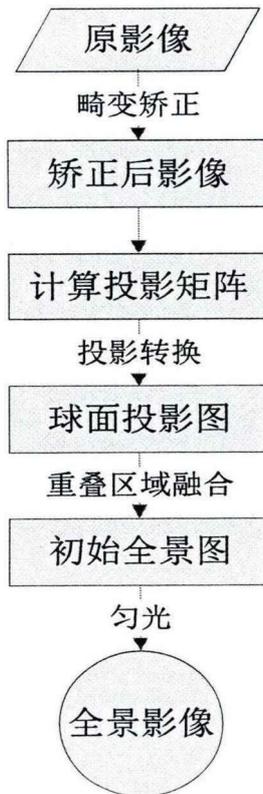


图 5.12 全景拼接流程

本论文相关的研究自主研制的高分辨率全景相机在每个采样时刻由时间同步控制系统控制 8 个 CCD 相机同时曝光，获取同一场景不同视角的 8 张面阵 CCD 影像。在进行全景拼接时，首先对 8 张 CCD 影像进行畸变矫正，去除由于镜头畸变引起的影像变形；然后根据 CCD 相机间的相对关系，求得单张 CCD 影像向球面全景影像映射的投影变换矩阵，根据此投影变换矩阵，可以把原始面阵 CCD 影像转换到球面投影模式；由于相邻相机视角的交叉，转换到球面投影模式的影像间存在重叠区域，需要对重叠区域的像素进行融合处理；最后，考虑到各个镜头采集影像时的光照情况可能存在较大的差异，导致拼接后的影像存在明显的色彩突兀变化，因此需要对整个拼接图像做匀光处理，使全景影像色彩均匀，明暗一致。经过以上步骤，即可得到场景 360° 的全景影像。

### 5.3.2 影像畸变矫正

由于本文全景成像系统的 8 台 CCD 相机为非量测工业相机，其成像存在较大的几何畸变，其主要包括径向畸变、切向畸变。根据相机畸变模型：

$$\begin{cases} x' = x + dx \\ dx = k_1x(x^2 + y^2) + k_2x(x^2 + y^2)^2 + p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2xy \\ y' = y + dy \\ dy = k_1y(x^2 + y^2) + k_2y(x^2 + y^2)^2 + 2p_1xy + p_2(x^2 + 3y^2) \end{cases} \quad (5.6)$$

其中， $(x',y)$ 为畸变矫正后的图像上点坐标， $(x,y)$ 为原图像上点坐标， $k_1,k_2$ 为径向畸变系数， $p_1,p_2$ 为切向畸变系数。通过单个相机的标定，获取相机的畸变参数，对拼接前的影像进行畸变矫正。

### 5.3.3 投影变换矩阵求解

投影变换矩阵表达了单张 CCD 影像上的像点与球体表面点的映射关系，如下图所示。根据以上全景影像拼接流程，投影变换矩阵的计算是整个影像拼接的关键步骤，其计算的精度直接影响到全景影像拼接的效果，而其计算的效率也直接决定了全景影像拼接是否具有实时性。本论文采用了两种方式计算投影变换矩阵，第一种方式依赖于原始拼接影像的内容，它通过提取相邻影像间的 SIFT[David G.Lowe 1999, 2004]特征点，然后由特征匹配获得的同名点对计算影像间的相对位姿关系，进而求得 CCD 影像到球面的投影变换矩阵[杨云涛等 2011;Matthew Brown, David G. Lowe 2007]；第二种方式依赖于 8 个 CCD 相机组装时的几何关系，通过相机标定可精确获得 8 台 CCD 相机的相对位姿关系（这一部分在 6.4 节中介绍），由此可以计算 CCD 影像的投影变换矩阵。由于全景相机各个镜头刚体连接、安装稳定，则可以认为全景相机采集数据时各个镜头的相对关系可以用标定的数据表示。基于相机几何关系的投影矩阵计算方法流程比较简单，只需要标定求得各个相机的相对关系即可计算得到，在次不再赘述，下面对基于特征匹配的投影矩阵计算方法进行介绍。

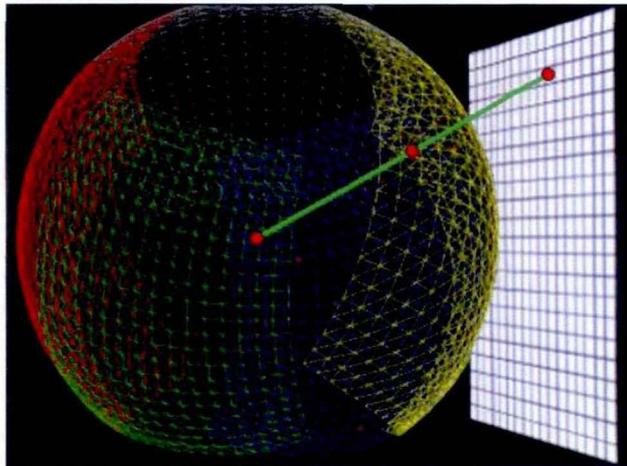


图 5.13 投影转换矩阵映射关系

首先利用 SIFT (Scale Invariance Feature Transform) 算子[David G.Lowe 1999,2004]对影像进行特征提取, 然后用 k-d tree[I.Wald and V.Havran 2006])快速搜索方法对相邻影像提取的特征库进行粗匹配。完全依靠特征的匹配不可避免的存在很多误匹配点, 因此需要使用 RANSAC (Random Sample Consensus) 稳健估计算法[M.A.Fischler and R.C.Bolles 1981]并附加几何约束对误匹配点进行剔除, 与此同时能获得影像间的位姿参数的线性解, 最后使用 LM (Levenberg-Marquart) 非线性优化算法[C.T. Kelley 1994;K.Madsen, H.B.Nielsen and O.Tingleff 2004]精确求得模型参数。图 5.14 给出了本文基于影像内容的的投影变换矩阵计算流程。

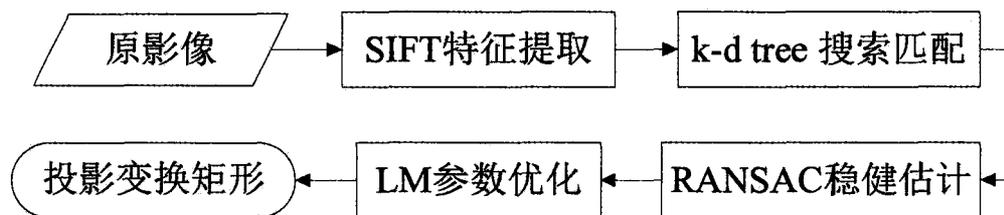


图 5.14 基于特征匹配的投影变换矩阵计算流程

关键步骤描述如下:

1) 面阵 CCD 影像 SIFT 特征提取。SIFT 算子是 David. G. Lowe 提出的一种尺度不变和特征变换算子, 它通过利用不同尺度的高斯差分方程对影像进行卷积, 将卷积图像中的极值点作为特征点。SITF 特征提取的一般流程如下所示:

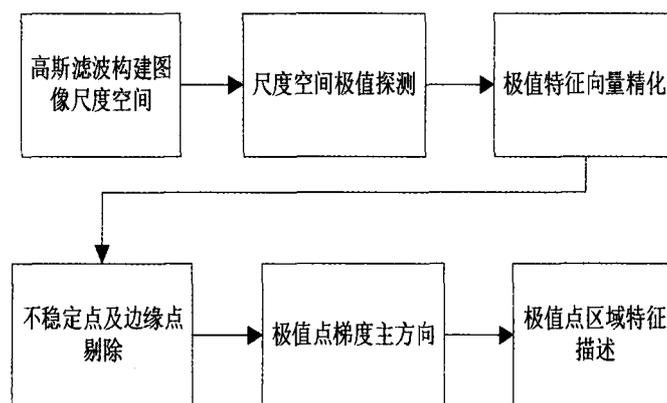


图 5.15 SIFT 特征提取流程

采用 k-d tree 搜索算法进行 SIFT 特征粗匹配。k-d tree 是一种分割 k 维数据空间的数据结构, 它能建立高维空间索引结构, 快速而准确地找到查询点的近邻。主要应用于多维空间关键数据的搜索(如: 范围搜索和最近邻搜索)。而特征点匹配实际上就是一个通过距离函数在高维矢量之间进行相似性检索的问题。其基本思想就是对搜索空间进行无重叠层次划分, 因为实际数据一般都会

呈现出簇状的聚类形态，该索引结构可以大大加快检索的速度。以一组二维数据的 k-d 树结构为例(wikipedia 2013)，假设有 6 个二维数据点 { (2,3), (5,4), (9,6), (4,7), (8,1), (7,2) }，数据点位于二维空间内（下图中黑点所示），则其组成的 k-d 结构为下图所示。k-d 树算法通过确定图中这些分割线（多维空间即为分割平面，一般为超平面）实现对数据的层次划分。

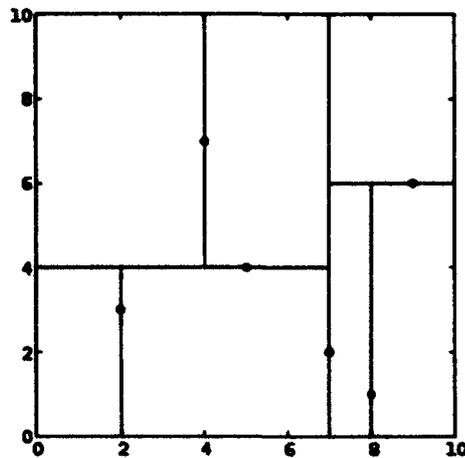


图 5.16 二维数据 k-d 树空间划分示意图

2) 基于 RANSAC 的配准模型稳健估计。RANSAC 算法是目前在计算机视觉领域应用非常广泛的稳健的模型参数估计算法，其最大的特点是能够从包含大量噪声点的样本中提取出精确的模型参数。同最小二乘回归法相似，RANSAC 算法是一个随机采样迭代的计算过程，其算法描述如图 5.17 所示。

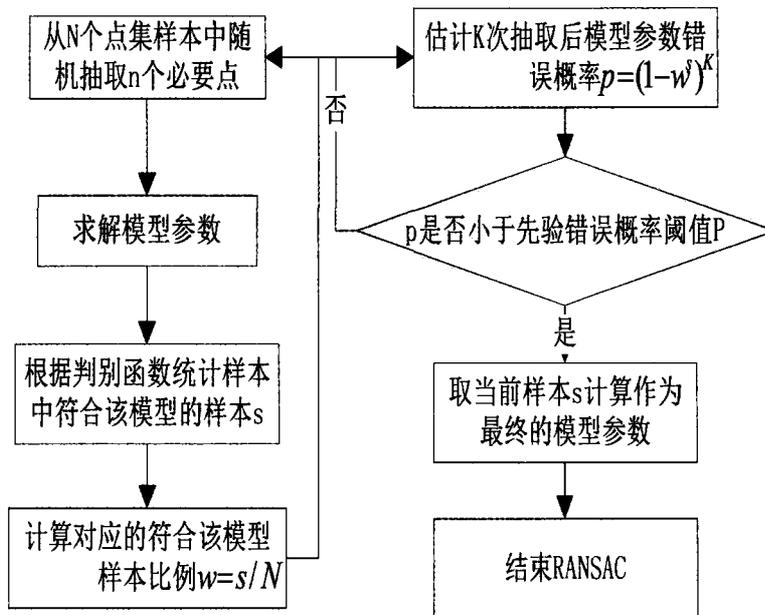


图 5.17 RANSAC 算法流程

3) 利用 LM (Levenberg-Marquart) 非线性估计算法优化配准模型的参数, 即得到 CCD 影像间稳定可靠的相对位姿参数。

4) 由 CCD 影像间的相对位姿参数, 计算影像的投影变换矩阵。

其中, 对于步骤 5), 在求得了 CCD 影像间的相对位姿参数后, 需要由此求得投影变换矩阵, 将所有源图像映射到全景图上去。在将 CCD 相机中心作为物方坐标系中心的情况下, 像方坐标  $p(x, y)$ 。与其三维坐标  $P(X, Y, Z)$  之间的映射关系如下:

$$p = TVRP \quad (5.7)$$

其中,

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & c_x \\ 0 & 1 & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$f$  为图像的焦距,  $R$  为旋转矩阵。当投影中心取在源图像的中心时, 对于所有的源图像而言, 它们皆为  $(c_x, c_y)$ , 则两幅图像  $l$  和  $k$  之间的对应关系为:

$$M \equiv V_k R_k R_l^{-1} V_l^{-1} \quad (5.8)$$

全景相机上的每个相机都有一个独立坐标系, 选定某一个相机独立坐标系作为参考坐标系, 将其它相机坐标系都归算到此参考坐标系上去, 坐标系之间的旋转由矩阵  $M$  来完成, 而它可以根据标定获得的相机内参及上述解算得到的相机相对位姿参数求得, 至此, 可以计算出所有待拼接影像到球面模型的投影变换矩阵。

### 5.3.4 影像融合

在图像拍摄的过程中, 由于视差效应、拍摄环境变化以及投影变换矩阵误差等因素的影响, 使全景影像接缝处有明显的明暗差异, 同时伴随着拼接缝隙, 因此要采用合适的融合策略, 使拼接后的图像具有视觉一致性, 即使拼接痕迹最小化。考虑到车载序列全景影像拼接的实时性和高效性, 本文采用加权融合 (影像平滑法) [张欣 2009]。

加权融合采用平滑的方法, 对影像重叠区域做平滑, 可以使颜色逐渐过渡, 以避免影像明显的边界和影像的模糊, 提高了全景影像的质量。该方法将两幅影像重叠区域的像素值, 按照每个像素的权重进行加权计算, 叠加合成新的影像, 这样就实现了在重叠区域内前一幅影像到第二幅影像的缓慢过渡。设

相邻两幅影像重叠部分的某像素点的  $RGB$  分量分别为  $r_1$ 、 $g_1$ 、 $b_1$  和  $r_2$ 、 $g_2$ 、 $b_2$ ，则两者融合后其对应的像素点的  $RGB$  分量值  $r$ 、 $g$ 、 $b$ ，可以由下式求得：

$$\begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} = d \begin{bmatrix} r_1 \\ g_1 \\ b_1 \end{bmatrix} + (1 - d) \begin{bmatrix} r_2 \\ g_2 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

其中： $d$  是像素的权重，用来调和相邻影像的颜色，是一个渐变因子，其取值范围在  $(0, 1)$  之间。

$$d = \begin{cases} \frac{\left(\frac{2t}{w}\right)^{15}}{2}, & 0 < t \leq \frac{w}{2} \\ \frac{\left(\frac{2t}{w} - 2\right)^{15} + 2}{2}, & \frac{w}{2} < t < w \end{cases} \quad (5.10)$$

在两幅影像的重叠区域中，参数  $d$  随着像素点的变化而变化，一般情况下是从重叠区域左边界起逐渐线性减小。

### 5.3.5 全景影像拼接实验与分析

本论文的研究中基于 Visual Studio C++ 的 MFC 编写了全景影像批量生成工具，其主要功能是将全景成像系统拍摄出的影像序列批量生成全景图，并结合 POS 数据将全景图的位置和姿态写入全景影像流文件 (\*.vrpano) 中。该全景影像批量生成工具的界面如图 5.18 所示。

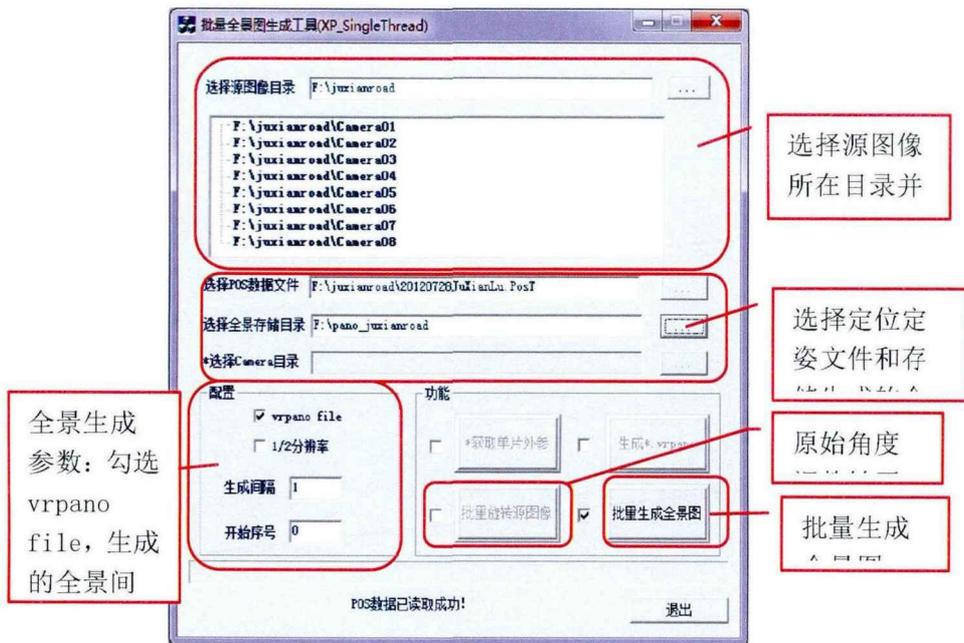


图 5.18 全景影像快速生成软件界面

实验用于拼接的原始 8 张影像如图 5.19 所示（图像已经经过矫正，去除了镜头畸变的影响）。



图 5.19 用于拼接的 8 张原图像

首先用基于特征匹配的投影变换矩阵计算方法来进行全景影像的拼接实验。如 5.20 为相邻两幅面阵 CCD 影像的 SIFT 同名特征点，由该图可以看出，两幅影像的匹配效果好，基本无误匹配点对。用该方法计算投影转换矩阵，将原图像做球面投影，效果如图 5.21。

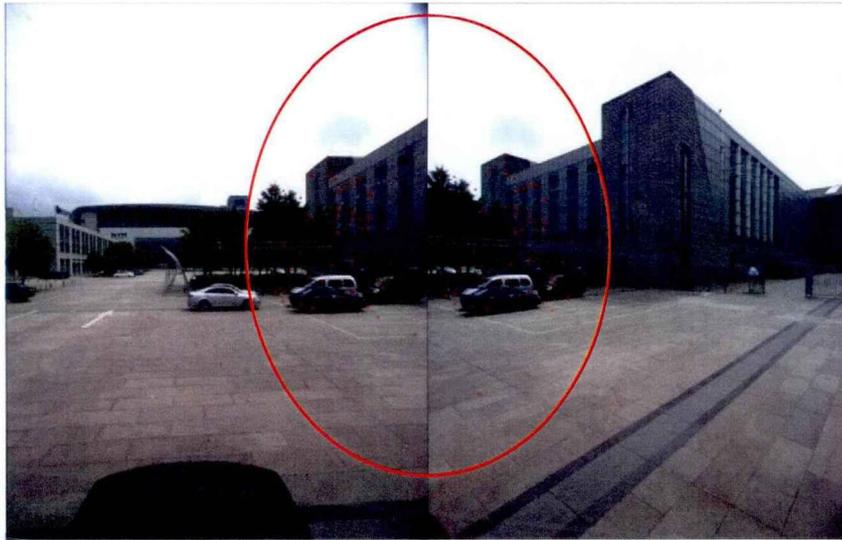


图 5.20 相邻两张影像的 SIFT 同名点匹配结果



图 5.21 球面投影后的效果

图 5.22 是做像素融合处理前的拼接全景，可以看到此时的全景影像拼缝处有很大的错位现象，经过了重叠区域像素的加权融合（如图 5.23），拼接错位现象得到了有效地减弱，大大优化了视觉效果。图 5.24 为融合后全景影像的局部放大图，其中红色圈中为拼接缝所在的区域，由此图可以看出影像的拼缝不明显，重叠区域融合效果好。



图 5.22 像素融合处理前的拼接全景



图 5.23 像素融合处理后的拼接全景



图 5.24 拼缝区域融合效果

由于 8 个 CCD 相机采集的影像具有整体的明暗、色调差异，使相邻两张拼接影像间的色彩变化突兀，如下图 5.25，中间区域与两边的影像存在较大的整体色调变化，这导致整个全景影像不具有视觉一致性，经过匀色处理，这种现象得到了明显的改善，最终的拼接全景效果图如图 5.26 所示。图 5.27 是采用高分辨率微型单反相机研制的全景相机拍摄的全景照片，图像分辨率可以达到 12000 x 6000，色彩良好。



图 5.25 影像间存在整体的色调差异



图 5.26 全景影像拼接效果图



图 5.27 基于微单相机的高分辨率全景效果图

另外，用基于相机几何关系的投影矩阵计算方法对相同的影像进行全景拼接，二种方法计算得到的投影转换矩阵基本无差异，同时从视觉上看，两种拼

接方案的效果也几乎相同。但是由于基于特征匹配的拼接方法在每次全景拼接是都需要计算 CCD 影像的相对位姿关系，这个过程额外增加了不少计算量，使全景影像的实时拼接变得非常困难；同时，特征匹配依赖于场景的结构，对于某些特征匹配困难的场景，该方法无法解算出精确的投影变换矩阵，进而导致拼接失败。因此，本论文在车载移动测量系统的全景相机集成中采用了基于相机几何关系的全景拼接方案。

## 5.4 本章小结

本章研究了面阵拼接全景影像生成的原理和算法流程，研究和分析了基于特征匹配的投影矩阵计算方法和基于相机几何的投影矩阵计算方法。实验验证了本文全景影像生成算法的可行性，并得到良好的全景拼接效果。

## 第6章 多传感器系统整体标定

在车载移动测量系统的集成中，完成了前期的硬件系统集成后，需要对车载移动测量系统多传感器进行整体标定，一方面对车载移动测量系统中的各系统误差进行建模并消除其影响，另一方面通过整体标定验证系统的整体性能和精度。车载移动测量系统的多传感器整体标定包括激光扫描仪内参数标定、组合定位定姿系统内参数标定、全景相机内参数标定、激光扫描系统外标定、全景相机外标定以及全景相机与激光扫描的相对关系标定。

### 6.1 车载立体测量系统相对标定和绝对标定

车载移动测量系统最终目标是从采集到的大量的不同来源的数据中提取需要的空间和属性数据。

车载测量系统的立体相机标定包括相对标定和绝对标定两个方面。相对标定是指立体相机内参数和相机之间的空间关系的求解，使立体相机具有相对于自身安装中心的相对测量能力。绝对标定则是指标定相机相对于惯性坐标系的位置和姿态，以使相机具有绝对定位目标的能力（测量的目标点具有大地坐标）。

#### 6.1.1 立体相机相对标定

立体相机的相对标定，是通过构建经典的针孔相机模型，并考虑导致影像产生变形的各种因素：径向畸变、偏轴畸变和薄棱镜畸变。其中，对构成立体相机的左右单个相机而言，标定的参数有：主点  $(r_o, c_o)$ ，等效焦距  $(f_u, f_v)$  和各种畸变系数  $(k_1, k_2, \dots, p_1, p_2, \dots, s_1, s_2, \dots)$ 。对于立体相机而言，还需标定左右相机之间的相对位置和姿态。但是，在标定单个相机时，已得到相机相对于控制场坐标系的位置和姿态  $(X_s, Y_s, Z_s, \varphi, \omega, \kappa)$ ，因此，可间接的得到两个相机相对的位置和姿态关系。

与传统的摄影测量传感器相比，考虑到系统设备的成本和要能满足车载移动测量的快速、易控性能，往往采用工业的非测量图像传感器作为图像获取设备。所以图像传感器本身的参数（内方位）未知，摄影镜头有非常大的畸变。因此，在标定方法上采用经典的后方交会方法的同时，也通过数字运算的方法，确定图像传感器的参数及镜头的畸变系数。实践表明，普通镜头的畸变必须采用复杂的数学模型来描述，否则会产生很大的测量误差，其中包括径向畸变采用高达 7 次方的描述，偏轴畸变和薄透镜畸变也需考虑。

根据针孔相机成像模型，并考虑径向畸变、切向畸变及薄透镜的相机成像模型为：

$$u + \delta_u(u, v) + \frac{l_1x + l_2y + l_3z + l_4}{l_9x + l_{10}y + l_{11}z + 1} = 0 \quad (6.1)$$

$$v + \delta_v(u, v) + \frac{l_5x + l_6y + l_7z + l_8}{l_9x + l_{10}y + l_{11}z + 1} = 0 \quad (6.2)$$

这里的  $\delta_u(u, v)$  和  $\delta_v(u, v)$  表示以上径向畸变、切向畸变及薄透镜在  $u$ 、 $v$  方向上引起的总的畸变误差。由于畸变描述公式是一个无限的多项式，不可能全部考虑进去，只考虑  $u$  和  $v$  的三次、五次和七次项以下的畸变，那么可以得到对这三种畸变的三种不同精度的近似表达式[刘勇 2004]：

三次以下：

$$\delta_{u3}(u, v) = k_1u(u^2 + v^2) + p_1(3u^2 + v^2) + 2p_2uv + s_1(u^2 + v^2) \quad (6.3)$$

$$\delta_{v3}(u, v) = k_1v(u^2 + v^2) + 2p_1uv + p_2(u^2 + 3v^2) + s_2(u^2 + v^2) \quad (6.4)$$

五次以下：

$$\begin{aligned} \delta_{u5}(u, v) = & k_1u(u^2 + v^2) + k_2u(u^2 + v^2)^2 \\ & + p_1(3u^2 + v^2) + 2p_2uv + p_3[2u^2(u^2 + v^2) + (u^2 + v^2)^2] + 2p_4uv(u^2 + v^2) \\ & + s_1(u^2 + v^2) + s_3(u^2 + v^2)^2 \end{aligned} \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned} \delta_{v5}(u, v) = & k_1v(u^2 + v^2) + k_2v(u^2 + v^2)^2 \\ & + 2p_1uv + p_2(u^2 + 3v^2) + 2p_3uv(u^2 + v^2) + p_4[(u^2 + v^2)^2 + 2(u^2 + v^2)v^2] \\ & + s_2(u^2 + v^2) + s_4(u^2 + v^2)^2 \end{aligned} \quad (6.6)$$

七次以下：

$$\begin{aligned} \delta_{u7}(u, v) = & k_1u(u^2 + v^2) + k_2u(u^2 + v^2)^2 + k_3u(u^2 + v^2)^3 \\ & + p_1(3u^2 + v^2) + 2p_2uv + p_3[2u^2(u^2 + v^2) + (u^2 + v^2)^2] + 2p_4uv(u^2 + v^2) \\ & + p_5[2u^2(u^2 + v^2)^2 + (u^2 + v^2)^3] + 2p_6uv(u^2 + v^2)^2 \\ & + s_1(u^2 + v^2) + s_3(u^2 + v^2)^2 + s_5(u^2 + v^2)^3 \end{aligned} \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} \delta_{v7}(u, v) = & k_1v(u^2 + v^2) + k_2v(u^2 + v^2)^2 + k_3v(u^2 + v^2)^3 \\ & + 2p_1uv + p_2(u^2 + 3v^2) + 2p_3uv(u^2 + v^2) + p_4[(u^2 + v^2)^2 + 2(u^2 + v^2)v^2] \\ & + 2p_5uv(u^2 + v^2)^2 + p_6[(u^2 + v^2)^3 + 2(u^2 + v^2)^2v^2] \\ & + s_2(u^2 + v^2) + s_4(u^2 + v^2)^2 + s_6(u^2 + v^2)^3 \end{aligned} \quad (6.8)$$

在本文的标定中，采用 7 次以下的相机畸变模型描述，对存在透镜畸变的相机进行标定时，可利用若干高精度控制点的物方空间坐标  $(X_i, Y_i, Z_i)$ ，以及这些控制点在图像上的图像量测平面坐标  $(r_i, c_i)$ ，通过(6.1)、(6.2)求解未知参数。这些参数分为相机的内部参数  $r_o, c_o, f_u, f_v$ ；和外部参数  $\varphi, \varpi, \kappa, X_s, Y_s, Z_s$ ，以及镜头的畸变系数（视取的项数多少而定） $k_1, k_2, k_3, \dots, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, \dots, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, \dots$ 。

建立式(6.8)中的透镜畸变模型方程至少需要 16 个控制点的坐标，并利用 Levenberg-Marquardt 算法对方程组进行求解。

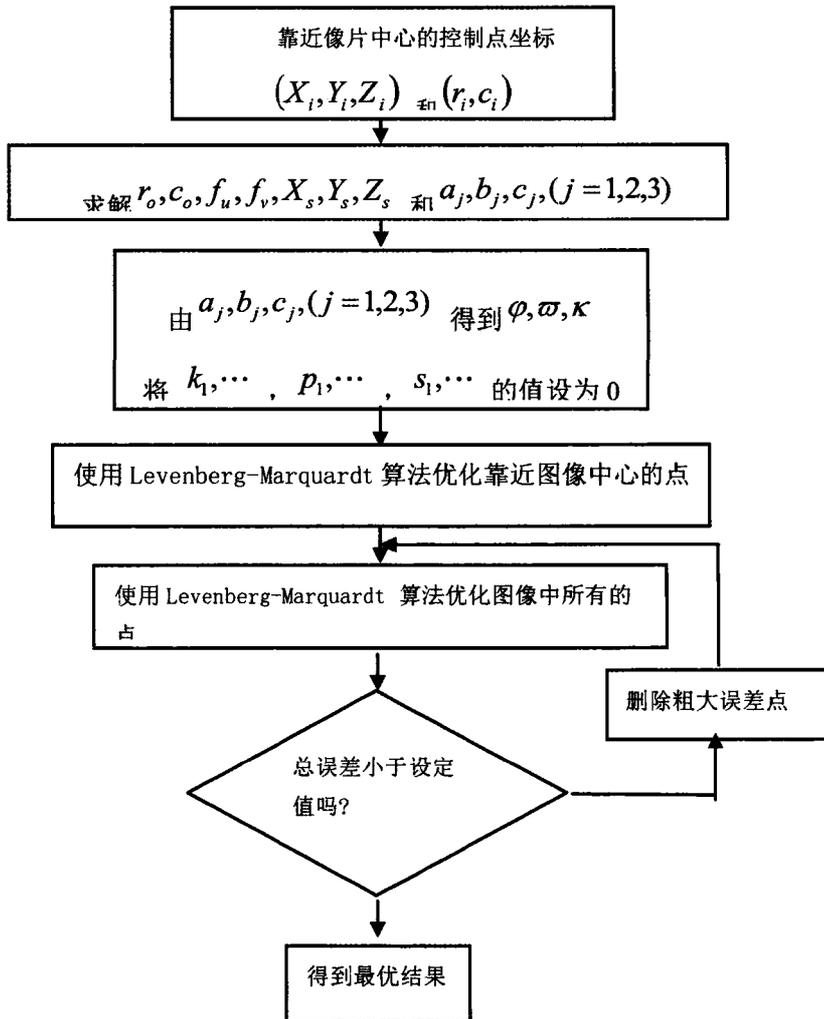


图 6.1 Levenberg-Marquardt 算法求解流程

得到这些参数后，车载立体摄影测量系统就具有了对于相机安装中心相对测量能力。

相对标定一般在室内比较高精度的控制场内完成。室内控制场便于安装和设置大量的控制点，且室内的环境易于维持控制场的精度。下图是一个室内控

制场，其中控制点的分布范围约为 6m\*3m\*3m（宽\*高\*深）。室内控制场的点位精度优于 0.2mm。

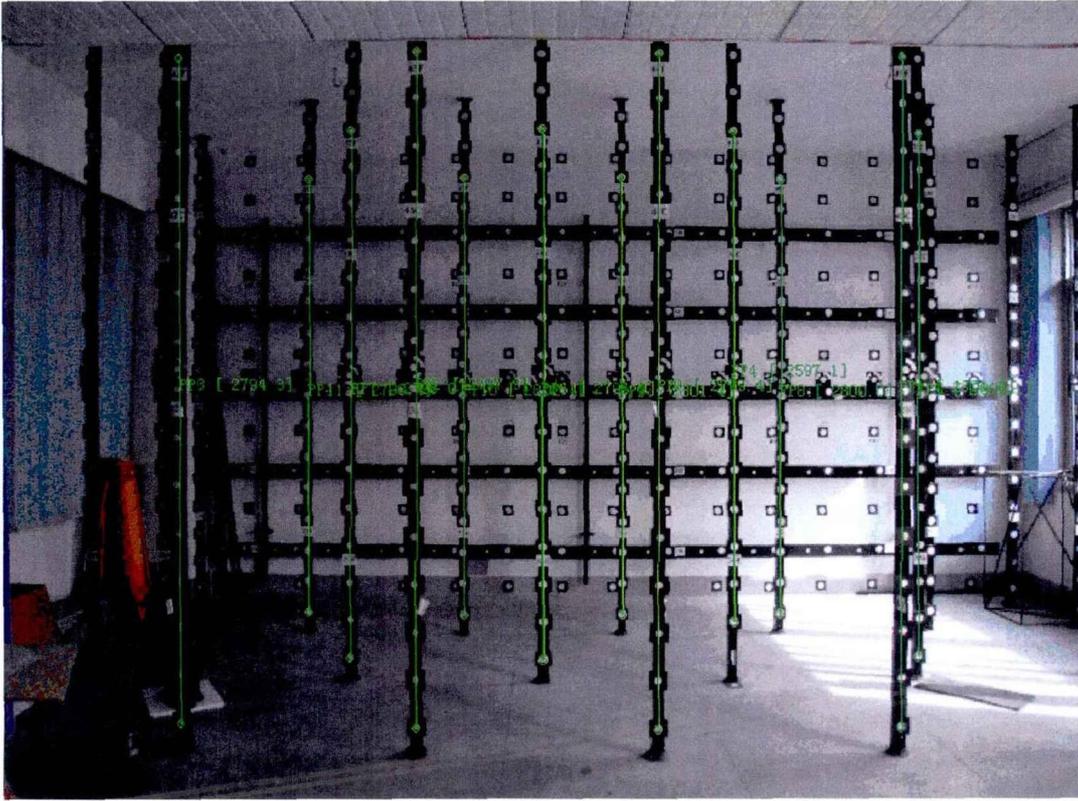


图 6.2 室内高精度的控制场

下表为通过相对标定得到的左右相机参数。

表 6.1 左右相机相对标定结果

参数	左相机	右相机
$r_0, c_0$ $f_u, f_v$	$r_0 = 824.1944$	$r_0 = 828.7551$
	$c_0 = 684.9655$	$c_0 = 665.18805$
	$f_u = -1883.9660$	$f_u = -1886.0890$
	$f_v = 1885.23936$	$f_v = 1885.73921$
$X_s, Y_s, Z_s$ $\varphi, \omega, \kappa$	$t_1 = 1003.5913$	$t_1 = 1001.9287$
	$t_2 = 102.2300$	$t_2 = 102.2329$
	$t_3 = 997.7487$	$t_3 = 998.1577$
	$om = -0.2430769$	$om = -0.2470141$
	$ph = -3.1301473$	$ph = -3.1256257$
	$kp = 0.0015389$	$kp = -0.0042765$
$k_1, k_2, k_3,$ $p_1, p_2, p_3,$ $p_4, p_5, p_6,$ $s_1, s_2, s_3, s_4,$	$k_1 = -0.0718613817$	$k_1 = -0.0691958228$
	$k_2 = 0.0737880167$	$k_2 = 0.0784191895$
	$k_3 = 0.1904313368$	$k_3 = 0.1986940607$
	$p_1 = -0.0002944402$	$p_1 = -0.0085335125$
	$p_2 = 0.0170986109$	$p_2 = 0.0056705684$
	$p_3 = -0.0068314279$	$p_3 = -0.0262916464$
	$p_4 = -0.0090563728$	$p_4 = 0.0205139156$
	$p_5 = 0.0134248210$	$p_5 = 0.0689817547$

$s_5, s_6$	p6= 0.0507308923	p6= -0.0407812522
	s1= 0.0001880242	s1= 0.0081985328
	s2= -0.0256899232	s2=-0.0011279496
	s3= -0.0013787629	s3= 0.0577595310
	s4= 0.0556131624	s4= -0.0555370954
	s5= 0.0090323315	s5= -0.1904071814
	s6= -0.1494162892	s6= 0.1123335871

### 6.1.2 立体相机绝对标定

绝对标定是指标定立体相机与惯导之间的相对关系。可用于把位于局部坐标系的点转换到绝对坐标系（车载系统使用的绝对坐标系为大地坐标系）。

通过车载立体影像对这些室外标志点的成像测量所得的相对坐标系中的坐标  $P_{camera}$ 、组合定位导航系统记录拍摄影像时的大地坐标位置  $(x_{POS}, y_{POS}, z_{POS})$  和姿态信息（Roll、Pitch、Heding）以及室外控制点的大地坐标  $(P_{WGS84})$ ，根据下面的转换关系解算绝对测量参数[ChenChangjun 2009]:

$$P_{local} = \left( R_{-Roll} \times \left( R_{-Pitch} \times \left( R_{90-Heading} \times \left( P_{WGS84} - T_{x_{GPS}, y_{GPS}, z_{GPS}} \right) \right) \right) \right) \quad (6.9)$$

上式为通过影像拍摄时的惯导位置和姿态，把控制点的大地坐标转换到惯导坐标系。

$$P_{camera} = R_p P_{local} + T_p \quad (6.10)$$

上式为相机坐标系下的点与惯导坐标系下的点的对应关系。其中的  $R_p$  和  $T_p$  即是所需要标定的参数。由于  $P_{camera}$  和  $P_{local}$  为两个三维坐标系中的对应点，因此，只需要 4 个对应点即可求解。但实际应用中通常提供尽可能多的点，以得到最小二乘的最优结果。采用的方法常为四元组法，该方法将坐标旋转等效于相对于一个空间轴  $a = [a_x, a_y, a_z]$  的旋转（ $a$  表示轴的方向，可令  $\|a\|=1$ ），旋转角度为  $\theta$  的四元组矢量  $q$ ，且：

$$q = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T = [\cos(\theta / 2), \sin(\theta / 2) \times a_x, \sin(\theta / 2) \times a_y, \sin(\theta / 2) \times a_z]^T \quad (6.11)$$

其中  $q_0 \geq 0$ ， $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$ 。得到四元组后，那么对应的旋转矩阵可由  $q$  表示为：

$$R(q) = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

四元组计算过程中能获得平移矢量的值。

绝对标定需要借助室外标定场来实现。室外标定场相对室内标定场而言，由于场景和地形限制，往往没有太多的标定点，虽然不足以充满视场以标定镜头的畸变，但足以完成立体相机的绝对标定。

室外标定场的特点是：每个控制点的坐标都是位于大地坐标的，且控制场的设置需方便车载系统的拍摄，能接收到 GPS 信号，通过 POS 系统精确定位车辆和位置和姿态。如下图为利用建筑的墙面和柱子建立的室外控制场。



图 6.3 车载系统室外控制场

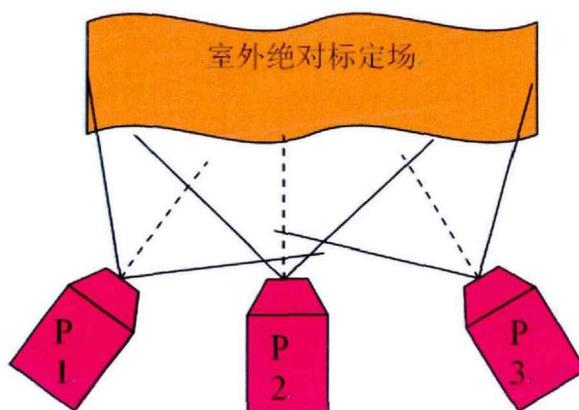


图 6.4 绝对标定拍摄方位示意图

绝对标定至少需要车载测量系统针对标定场拍摄两个方位的数据，需要提供的数据为每个拍摄位置的惯导位置和姿态、绝对标定点的大地坐标、绝对标定点在立体图像测量系统中的相对坐标，数据样例如表 6.2 所示。

表 6.2 POS 位置和姿态及控制点坐标值

POS 位置和姿态(位置一)						
	Xs	Ys	Zs	Roll	Pitch	Heading
	-29017.244	-50667.833	72.661	0.398	-2.497	80.961
控制点相对及绝对坐标						
点号	X <sub>Camera</sub>	Y <sub>Camera</sub>	Z <sub>Camera</sub>	X <sub>w</sub>	Y <sub>w</sub>	Z <sub>w</sub>
10	2.76826	-1.71461	9.05491	-50660.755	-29000.083	75.840
11	-2.62533	0.871491	11.1282	-50656.356	-28996.455	73.096
7	2.69344	2.81632	9.2033	-50660.84	-29000.014	71.311
n11	2.70155	1.68105	9.15075	-50660.800	-29000.031	72.465
16	2.74799	0.0445738	9.13452	-50660.811	-29000.044	74.088
22	1.34883	-0.859569	13.9441	-50660.974	-28994.984	74.904
4	-2.72853	2.0456	11.1699	-50656.345	-28996.488	71.931
15	-3.43087	0.125375	9.02166	-50654.878	-28998.144	73.838
12	-4.08667	1.39203	9.96995	-50654.565	-28997.026	72.594
POS 位置和姿态(位置二)						
	Xs	Ys	Zs	Roll	Pitch	Heading
	-29014.305	-50666.028	70.78	-0.91	-3.741	76.037
控制点相对及绝对坐标						
点号	X <sub>Camera</sub>	Y <sub>Camera</sub>	Z <sub>Camera</sub>	X <sub>w</sub>	Y <sub>w</sub>	Z <sub>w</sub>
7	6.37805	2.41944	7.48454	-50660.841	-29000.014	71.311
n11	6.4376	1.25633	7.40501	-50660.800	-29000.031	72.465
16	6.57009	-0.358436	7.3206	-50660.811	-29000.044	74.088
n10	6.66554	-2.09381	7.168	-50660.755	-29000.083	75.840
4	1.21782	1.42645	9.86622	-50656.345	-28996.488	71.931
11	1.29696	0.288996	9.87139	-50656.356	-28996.455	73.096
15	0.308513	-0.475433	7.86183	-50654.878	-28998.144	73.838
12	-0.356957	0.716665	8.92494	-50654.565	-28997.026	72.594

通过上述方法绝对标定结果为:

表 6.3 绝对标定结果

旋转矩阵			平移矩阵
-0.45538	-0.902489	0.032715	14.617039
0.882093	-0.447789	0.011852	-5.150324
0.040412	-0.021588	1.019386	-4.337131

表 6.4 为通过立体影像测得的目标点绝对坐标, 与通过全站仪测得的目标点绝对坐标进行对比的实验数据。

表 6.4 绝对标定精度检验结果

点号	三维坐标 (单位:米)						误差		
	全站仪实测			立体影像量测					
	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ
1	-29000.0311	-50660.7738	72.7650	-29000.0806	-50660.9018	73.0271	-0.0495	-0.128	0.2621
2	-28996.4880	-50656.3476	72.5310	-28996.5009	-50656.4279	72.7360	-0.0129	-0.0802	0.205
3	-28994.9839	-50660.974	76.9039	-28994.8709	-50661.0507	77.0452	0.113	-0.0767	0.1413
4	-29012.7814	-50676.0358	75.1979	-29012.6506	-50675.9148	75.4284	0.1308	0.1210	0.2305
5	-29010.4786	-50667.724	75.1639	-29010.3819	-50667.6409	75.3373	0.0967	0.0831	0.1734
6	-29007.8779	-50673.4045	78.1566	-29007.7519	-50673.2637	78.3465	0.126	0.1408	0.1899
7	-28971.3921	-50646.349	76.3270	-28971.2909	-50646.2179	76.5297	0.1012	0.1311	0.2026
9	-28973.0189	-50646.8681	76.1321	-28973.1119	-50647.0389	76.2076	-0.093	-0.1708	0.0755
10	-29033.9555	-50643.4955	74.9365	-29034.1362	-50643.5938	75.1271	-0.1807	-0.0983	0.1906

从表中可知，与全站仪数据相比，X轴方向最大误差为0.138米，Y轴最大误差为0.1708米，Z轴最大误差为0.262米。

该系统中使用的惯导IMU精度等级与以前研究中使用的惯导等级相同，但检验的精度比文献[ChenZhiyong 2004]中0.5m有比较大的提高，这主要得益于本论文采用了更复杂的镜头畸变模型来描述工业型相机镜头的畸变，并且GPS/INS惯导组合技术水平也有所提升。

## 6.2 2D/3D 一体化激光扫描仪的绝对标定

车载移动测量系统中原始激光扫描数据是基于扫描仪坐标系的，其工作原理如图4.23所示，车辆行驶过程中连续的扫描数据“聚集”于激光扫描仪坐标系下的一个平面中，如图4.24所示。因此从车载激光扫描仪中得到的原始激光扫描数据是无法直接使用的，只有将激光扫描数据统一到同一个坐标系统中，激光扫描仪的扫描结果才有现实意义，通常的做法是，将扫描数据统一到大地坐标系中[HuiJing Zhao 2008]，也即将车载激光扫描系统中的激光测量结果和定位定姿数据融合得到地物的大地坐标。将激光扫描数据转换到大地坐标，分两个步骤，第一步：将激光数据转换到惯导坐标系，第二步：将激光数据从惯导坐标系转换到大地坐标系，如下图6.5所示。

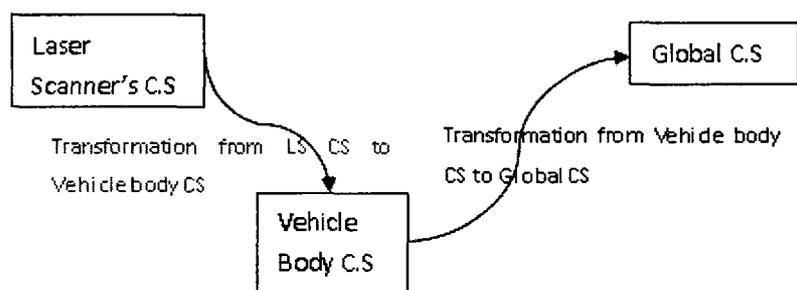


图 6.5 车载激光雷达标定示意图 (C.S.:Coordinate System)

激光扫描仪的绝对定位方程 4.14 中， $X_L$  由激光扫描仪测量得到， $X_{INS}^W$  以及  $R_{INS}^W$  由 GPS/IMU 组合定位定姿系统提供，由于各坐标系的尺度一致，因此  $\lambda=1$ ，为了得到地物点的绝对坐标  $X_W$ ，还需要求得  $X_L^{INS}$  以及  $R_L^{INS}$ 。求解  $X_L^{INS}$  以及  $R_L^{INS}$  的过程称为激光扫描仪的绝对标定。

对于车载系统而言，高精度的标定显得尤为重要，没有高精度的标定，即使激光扫描仪以及位姿系统能得到高精度的测量结果，车载激光扫描系统最终测量结果的精度也会受到限制，再加上激光扫描仪时常需要拆卸或者改装，拆卸或者改装后需要对激光扫描仪重新进行标定，因此寻找一种简便高效的激光扫描仪外标定方法具有重要意义。

激光扫描仪的外标定的主要工作在于寻找“同名点”，即地物点在大地坐标系中的三维坐标以及地物点在激光扫描仪坐标系中的坐标，通过“同名点”求定激光扫描仪坐标系与惯导坐标系之间的转换参数。对于 Riegl VZ400 激光扫描仪的标定，本文提出如下图 6.6 所示的标定流程。

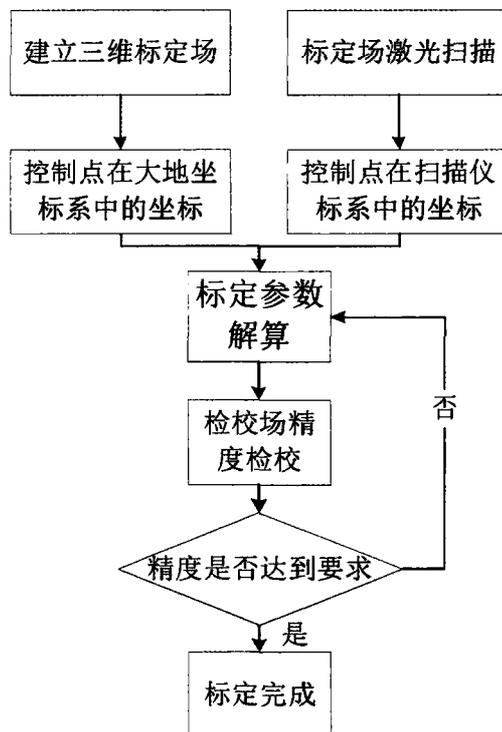


图 6.6 Riegl VZ-400 标定流程

图 6.6 中，进行标定参数解算的前提是寻找同一地物点在大地坐标系中的坐标以及在激光扫描仪坐标系下的坐标，然后采用合适的参数解算模型得到激光扫描仪坐标系以及惯导坐标系之间的转换参数，地物点在大地坐标系中的坐标可通过传统测量方法如 GPS、全站仪等方式获得，地物点在扫描仪坐标系中的坐标需在激光扫描仪的原始扫描数据中获得。

## 6.2.1 激光标定三维标定场的建立原则

RIEGL VZ400 扫描仪在远距模式下其扫描测程最大可达到 600m，而在高速模式下其扫描测程最大可达到 350m，竖直视场角为 100°。对于如此长的扫描距离以及如此大的扫描角度，其对应的标定场也必定是一个大型的标定场，因此在建立标定场时，充分利用现有建筑物的空间架构，并以建筑物的房角点以及窗户角点作为标定点。RIEGL VZ400 标定场的建设必须遵循如下原则：

- 1) 标定点选在规则房屋角点、窗户角点等在点云中具有明显特征的点位，以确保可以在激光点云中准确地提取“同名点”；
- 2) 标定点的布设避免位于同一高程平面内，即控制点保证一定的高程层次分布；
- 3) 对标定场位置及环境而言，选在四周空旷无遮挡、GPS 信号良好的区域，保证高精度 GPS/IMU 组合定位定姿数据的采集；
- 4) 建筑物的高度不宜过高，以不超过 15m 为宜，保证激光扫描仪能够采集到顶部的标定点；
- 5) 标定控制点的精度要求：首级控制测量时的地面控制点及相邻地面控制点间的点位中误差 $\leq 5\text{mm}$ ；标定点（碎部测量点）的点位中误差 $\leq 10\text{mm}$ 。

本文中所使用的三维标定控制场建立在宁波国际贸易展览中心 1 号楼、8 号楼及其周边区域，如图 6.7 所示。



图 6.7 标定场控制点（左图：一级控制点，右图：二级控制点）

宁波国际贸易展览中心的内部区域较为空旷，建筑物间距较大，可保证 GPS 信号良好；建筑物棱角分明，可保证充足的标定点选择和合理的空间分布，因此宁波国际贸易展览中心满足标定场建设原则。

## 6.2.2 激光扫描仪的标定模型及标定参数解算

标定的目的是求解激光扫描仪坐标系到惯导坐标系下的转换关系，可通过两种方法求解，一种为 LM 非线性优化，另一种为最小二乘迭代求解。

### 6.2.2.1 LM非线性优化求解

位置  $[T_x, T_y, T_z]^T$  表示在 X、Y 和 Z 轴方向的平移量，角度  $(\varphi, \varpi, \kappa)$  分别为绕 Y、X 和 Z 轴的旋转角。

设  $X_w = [X_w \ Y_w \ Z_w]^T$ ， $X_L = [X_L \ Y_L \ Z_L]^T$  分别为控制点的大地坐标和在激光扫描仪坐标系下的坐标。再设一过渡坐标  $X_I = [X_I \ Y_I \ Z_I]^T$ ，表示控制点在惯导坐标系里的坐标。

点  $(X_L, Y_L, Z_L)$  转换到点  $(X_I, Y_I, Z_I)$  的方程式为：

$$\begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{bmatrix} = R_{L-I} \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} + T_{L-I} \quad (6.13)$$

其中  $R_{L-I}$  和  $T_{L-I}$  表示从坐标系  $O_L - X_L Y_L Z_L$  到坐标系  $O_I - X_I Y_I Z_I$  的旋转矩阵和平移矢量，是需要通过标定得出的。

由组合定位导航系统提供的 6 个外部定向参数  $X_{POS}, Y_{POS}, Z_{POS}$ 、*roll, pitch, heading*，可以把惯导坐标系  $O_I - X_I Y_I Z_I$  里的一点  $(X_I, Y_I, Z_I)$  转换到大地坐标系  $O_w - X_w Y_w Z_w$  里的点  $(X_w, Y_w, Z_w)$ ，其转换方程为（式中的 r,p,h 分别表示 roll, pitch 和 heading 角）：

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-h) & \sin(-h) & 0 \\ -\sin(-h) & \cos(-h) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(r) & \sin(r) \\ 0 & -\sin(r) & \cos(r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(p) & 0 & -\sin(p) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(p) & 0 & \cos(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{POS} \\ Y_{POS} \\ Z_{POS} \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

理论上只需四点即可求解所需参数。但考虑到控制点误差、POS 的精度等影响，通常尽可能提供多的点以求最优解。建立目标方程如下：

$$E = \sum_{i=1}^N \|X_{I,i} - X'_{I,i}\| \quad (6.15)$$

其中  $X_{I,i}$  为利用惯导位置和姿态参数把控制点转换到惯导坐标系下的坐标， $X'_{I,i}$  为利用求得的  $R_{L-I}$  和  $T_{L-I}$  把相应的控制点坐标从激光坐标系下转换到惯导坐标系下的坐标。 $\|X_{I,i} - X'_{I,i}\|$  表示求两点的距离。

因此，激光扫描仪的标定可描述为：已知若干个控制点的大地坐标，和它们对应的激光坐标系下的坐标，以及激光在扫描该控制点时刻的汽车位置和姿

态(即 POS 系统的位置和姿态), 求解激光在惯导坐标系下的位置 $[T_x, T_y, T_z]^T$ 和姿态 $(\varphi, \varpi, \kappa)$ , 使得目标方程满足最小。

计算步骤是:

- 1) 预估激光扫描仪的安装参数: 包括 3 个轴向的平移和 3 个轴的旋转;
- 2) 利用当时的惯导位置和姿态, 把所有控制点转换到惯导坐标系下;
- 3) 利用预估参数把激光坐标系下的点转换到惯导坐标系下;
- 4) 利用 LM 优化算法, 使得目标方程的值最小。

### 6.2.2.2 最小二乘迭代求解

假设有  $n$  个标定点, 其 WGS-84 坐标和激光扫描仪坐标系下的坐标分别为  $X_w$  和  $X_L$ , 即  $X_w = [X_w \ Y_w \ Z_w]^T$ ,  $X_L = [X_L \ Y_L \ Z_L]^T$ , 为了计算方便, 采用重心化将标定点的 WGS-84 坐标和扫描仪坐标进行归一化处理。

$$\begin{aligned} X_{wg} &= \frac{\sum X_w}{n}, Y_{wg} = \frac{\sum Y_w}{n}, Z_{wg} = \frac{\sum Z_w}{n} \\ X_{lg} &= \frac{\sum X_L}{n}, Y_{lg} = \frac{\sum Y_L}{n}, Z_{lg} = \frac{\sum Z_L}{n} \end{aligned} \quad (6.16)$$

$$\begin{cases} \bar{X}_w = X_w - X_{wg}, \bar{Y}_w = Y_w - Y_{wg}, \bar{Z}_w = Z_w - Z_{wg} \\ \bar{X}_L = X_L - X_{lg}, \bar{Y}_L = Y_L - Y_{lg}, \bar{Z}_L = Z_L - Z_{lg} \end{cases} \quad (6.17)$$

标定点的 WGS-84 坐标和激光扫描仪坐标经过重心化处理后, 重心化后的两坐标系间平移量  $X_{INS} + R_{INS}^w \alpha_L^{INS} = 0$ ,  $\lambda = 1$ , 因此标定点的 WGS-84 坐标和激光扫描仪坐标间关系可用式(6.18)表示。

$$[\bar{X}_w \ \bar{Y}_w \ \bar{Z}_w]^T = R_{INS}^w R_L^{INS} [\bar{X}_L \ \bar{Y}_L \ \bar{Z}_L]^T \quad (6.18)$$

利用罗德里格矩阵形式实现快速转换计算, 即将  $R_L^{INS}$  表示成:

$$R_L^{INS} = (I - S)^{-1} (I + S) \quad (6.19)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -c & b \\ c & 0 & -a \\ -b & a & 0 \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

式中:  $I$  为单位矩阵,  $S$  为反对称矩阵,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为罗德里格参数。将式(6.19)和式(6.20)代入式(6.18)可得到式(6.21):

$$[\bar{X}_w - \bar{X}_l \quad \bar{Y}_w - \bar{Y}_l \quad \bar{Z}_w - \bar{Z}_l]^T = \begin{bmatrix} 0 & \bar{Z}_w + \bar{Z}_l & -(\bar{Y}_w + \bar{Y}_l) \\ -(\bar{Z}_w + \bar{Z}_l) & 0 & \bar{X}_w + \bar{X}_l \\ \bar{Y}_w + \bar{Y}_l & -(\bar{X}_w + \bar{X}_l) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

对于 n 个标定点，可列出如下的误差方程：

$$V_{3n \times 1}'' = A_{3n \times 3} X_{3 \times 1} - L_{3n \times 1} \quad (6.22)$$

根据式(6.22)分别列出每个标定点的误差方程，再根据最小二乘原理进行解算罗德里格参数。

求得罗德里格参数后，即可求出每个标定点对应的  $R_L'' = R_{INS}'' R_L^{INS}$ ，将每个标定点的 WGS-84 坐标系和激光扫描仪坐标系下的重心点坐标代入式(6.22)，可列出偏移向量  $a_L^{INS}$  的误差方程：

$$V_{3m \times 1}' = A_{3m \times 3}' a_L^{INS} - L_{3m \times 1}' \quad (6.23)$$

根据最小二乘原理，可求得偏移向量  $a_L^{INS}$ ：

$$a_L^{INS} = [T_x, T_y, T_z]^T = N'^{-1} Q' = (A'^T A')^{-1} (A'^T L') \quad (6.24)$$

### 6.2.3 激光扫描仪的标定实验及结果分析

根据 6.2.2 节的标定模型及标定参数解算方法，利用标定点的 WGS-84 坐标和激光扫描仪坐标进行平移参数和旋转参数的求解。解算过程中，首先应使用估计的标定参数初始值（由设计安装方位得到）进行标定，然后使用标定得到的结果作为第二次标定初始值，进行迭代，直到两次标定的平均残差变化量小于 1cm 为止。

VZ400 扫描仪标定所用控制点的点位中误差  $\leq 10\text{mm}$ ，具体点位分布如图 6.4 所示。





图 6.8 VZ-400 扫描仪标定所用控制点的点位分布图

在此次的标定实验中，共测量了 174 个高精度的标定控制点，部分点位如表 6.5 所示。

表 6.5 标定控制点

点名	东	北	大地高	点名	东	北	大地高
1	365715.013	3307213.93	37.247	26	365839.684	3307215.5	41.463
2	365719.411	3307212.411	37.246	27	365856.017	3307203.599	34.765
3	365717.046	3307213.208	30.108	28	365897.374	3307189.347	34.749
4	365718.836	3307212.595	30.101	29	365917.563	3307188.659	41.444
5	365726.759	3307210.038	35.502	30	365923.964	3307142.124	33.234
6	365728.154	3307209.56	35.499	31	365928.61	3307140.514	26.129
7	365717.044	3307213.215	16.573	32	365929.573	3307140.182	25.482
8	365718.832	3307212.604	16.569	33	365931.495	3307139.526	30.937
9	365726.01	3307210.127	21.496	34	365933.29	3307138.915	30.938
10	365730.164	3307208.723	21.488	35	365938.324	3307137.166	19.075
11	365733.169	3307207.802	19.704	36	365933.289	3307138.901	16.56
12	365734.54	3307207.301	17.024	37	365938.328	3307137.165	17.003
13	365763.539	3307197.315	19.093	38	365940.455	3307136.455	16.998
14	365757.491	3307199.467	35.5	39	365942.577	3307135.7	17.001
15	365776.12	3307192.98	19.098	40	365944.706	3307134.969	17.003
16	365730.071	3307208.898	35.487	41	365949.654	3307133.324	35.471
17	365730.068	3307208.903	22.428	42	365953.906	3307131.86	35.467
18	365754.629	3307200.449	22.421	43	365958.158	3307130.393	35.466
19	365995.433	3307117.486	19.078	44	365962.44	3307128.917	35.466
21	365780.351	3307191.601	35.501	45	365966.696	3307127.453	35.468
22	365791.008	3307187.855	19.099	46	365971.139	3307125.922	35.47
23	365796.697	3307185.915	30.963	48	365975.396	3307124.457	35.471
24	365798.481	3307185.305	30.962	49	59670.928	3257862.013	4.822
25	365806.04	3307182.711	33.259	50	365726.01	3307210.127	21.496

激光扫描数据是离散的点，某些测量的控制点在点云中不能很好的识别或选择，在实际的标定过程中，只使用部分的控制点进行标定，在此次的绝对标定中，使用了 27 个控制点，控制点数据及相对应的点云坐标、残差以及高程残差如下表所示。表中，“点云 X”指从车载激光点云中获取的控制点的 X 坐标，“点云 Y”指从车载激光点云中获取的控制点的 Y 坐标，“点云 Z”指从车载激光点云中获取的控制点的 Z 坐标，“控制 X”、“控制 Y”以及“控制 Z”指使用全站仪测量得到的控制点的 X、Y 以及 Z 坐标，“平面”指平面残差，“高程”指高程残差，其计算方法为：

$$\text{平面} = \sqrt{(\text{控制X}-\text{点云X})^2 + (\text{控制Y}-\text{点云Y})^2}$$

$$\text{高程} = \text{控制Z}-\text{点云Z}$$

表 6.6 VZ-400 激光扫描仪标定精度

点号	点云 X	点云 Y	点云 Z	控制 X	控制 Y	控制 Z	平面	高程
178	365797.814	3307431.476	37.196	365797.903	3307431.432	37.256	0.099	0.061
177	365801.487	3307430.215	22.293	365801.516	3307430.186	22.313	0.041	0.02
176	365801.385	3307430.256	20.652	365801.372	3307430.233	20.601	0.026	0.05
175	365805.862	3307428.715	20.625	365805.92	3307428.68	20.601	0.067	0.024
173	365823.795	3307422.436	34.129	365823.842	3307422.38	34.139	0.073	0.01
174	365823.847	3307422.428	22.413	365823.887	3307422.503	22.297	0.084	0.115
165	365904.777	3307404.901	40.049	365904.847	3307404.978	40.046	0.104	0.003
166	365904.712	3307404.747	36.457	365904.765	3307404.743	36.453	0.053	0.005
161	365921.719	3307394.465	34.125	365921.763	3307394.459	34.157	0.044	0.032
155	365982.898	3307378.11	40.079	365982.917	3307378.103	40.048	0.021	0.03
153	366002.765	3307371.236	40.043	366002.821	3307371.272	40.041	0.066	0.003
154	366002.671	3307371.05	37.828	366002.735	3307371.032	37.827	0.066	0.001
134	366090.669	3307330.72	37.29	366090.695	3307330.684	37.291	0.044	0
115	366071.144	3307250.048	37.838	366071.145	3307250.034	37.853	0.014	0.015
116	366071.147	3307250.049	36.472	366071.152	3307250.038	36.456	0.012	0.017
108	366059.611	3307215.88	41.449	366059.644	3307215.887	41.452	0.033	0.003
110	366062.853	3307225.976	37.847	366062.861	3307225.958	37.852	0.02	0.005
94	366040.747	3307185.641	37.258	366040.766	3307185.644	37.275	0.019	0.017
62	366014.907	3307110.755	37.252	366014.906	3307110.701	37.25	0.054	0.002
61	366010.505	3307112.215	37.233	366010.49	3307112.221	37.243	0.017	0.009
30	365923.962	3307142.138	33.225	365923.964	3307142.124	33.234	0.014	0.009
29	365917.509	3307188.65	41.447	365917.563	3307188.659	41.444	0.055	0.003
25	365805.991	3307182.687	33.325	365806.04	3307182.711	33.259	0.054	0.066
18	365754.638	3307200.425	22.418	365754.629	3307200.449	22.421	0.026	0.002
1	365715.024	3307213.913	37.252	365715.013	3307213.93	37.247	0.02	0.005
2	365719.407	3307212.401	37.231	365719.411	3307212.411	37.246	0.011	0.015
9	365726.013	3307210.11	21.519	365726.01	3307210.127	21.496	0.018	0.023

平面位置残差以及高程位置残差的折线图如下图所示。

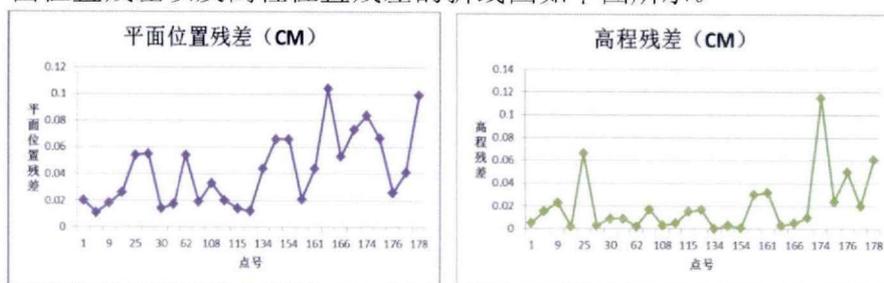


图 6.9 平面位置以及高程残差

从上表中可以看出，标定后，控制点的点云坐标与控制坐标平面误差最大为 10.4cm，平均为 4.3cm，高程最大误差为 11.5，平均为 2.0cm；在平面位置残

差以及高程位置残差的折线图中，残差的分布没有明显的规律，即不存在系统误差，主要受随机误差的影响。表 6.7 为 VZ-400 扫描仪的标定结果。

表 6.7 VZ-400 扫描仪的标定结果

偏移量 (m)			绕轴转角 (°)		
X	Y	Z	X	Y	Z
0.373547	-1.044195	0.368821	-0.402281	-0.204639	241.17559

上表中的标定误差为内符合精度，为了进一步验证激光扫描系统的性能和精度，在标定完成后，选择了两个远离标定场的实验场地进一步验证系统的性能和精度，在两个实验场地中，分别使用全站仪由控制点出发测量了 9 个和 6 个控制点。测量完成后，使用论文所研制的车载移动测量系统对两个区域进行激光扫描，并将点云中得到的控制点的坐标与使用全站仪测量得到的控制点的坐标进行比较，得到较差，如下表所示。

表 6.8 激光扫描精度检校

点名	点云 X	点云 Y	竣工 X	竣工 Y	X 较差	Y 较差	平面
G01	365391.327	3306661.763	365391.318	3306661.786	-0.009	0.023	0.025
G02	365386.132	3306646.732	365386.144	3306646.782	0.012	0.050	0.051
G03	365379.435	3306627.301	365379.438	3306627.340	0.003	0.039	0.039
G04	365376.762	3306619.551	365376.757	3306619.568	-0.005	0.017	0.018
G05	365370.358	3306600.893	365370.325	3306600.916	-0.033	0.023	0.040
G06	365352.837	3306690.606	365352.852	3306690.558	0.015	-0.048	0.050
G07	365348.677	3306678.014	365348.624	3306677.989	-0.053	-0.025	0.059
G08	365333.080	3306631.661	365333.013	3306631.585	-0.067	-0.076	0.101
G09	365327.489	3306615.142	365327.463	3306615.085	-0.026	-0.057	0.063
D01	364011.723	3307395.185	364011.707	3307395.137	-0.016	-0.048	0.051
D02	364017.890	3307416.578	364017.884	3307416.498	-0.006	-0.080	0.080
D03	364018.716	3307427.831	364018.710	3307427.804	-0.006	-0.027	0.028
D04	364023.854	3307449.262	364023.850	3307449.200	-0.004	-0.062	0.062
D05	363992.667	3307290.313	363992.620	3307290.248	-0.047	-0.065	0.080
D06	364006.582	3307361.864	364006.548	3307361.778	-0.034	-0.086	0.092

图 6.10 为上表的 X 残差、Y 残差以及平面残差的折线图。

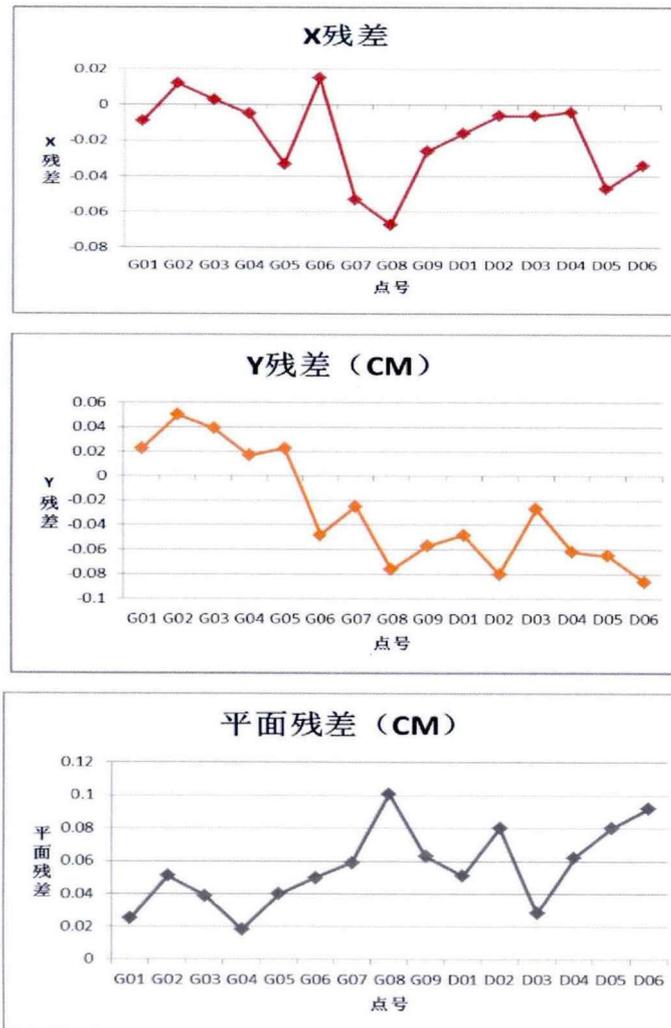
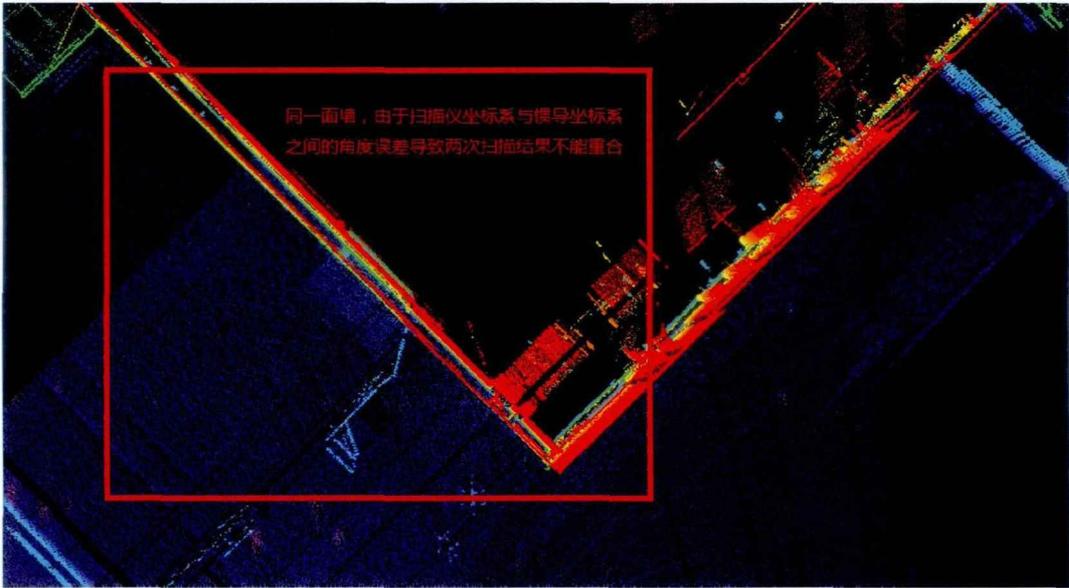
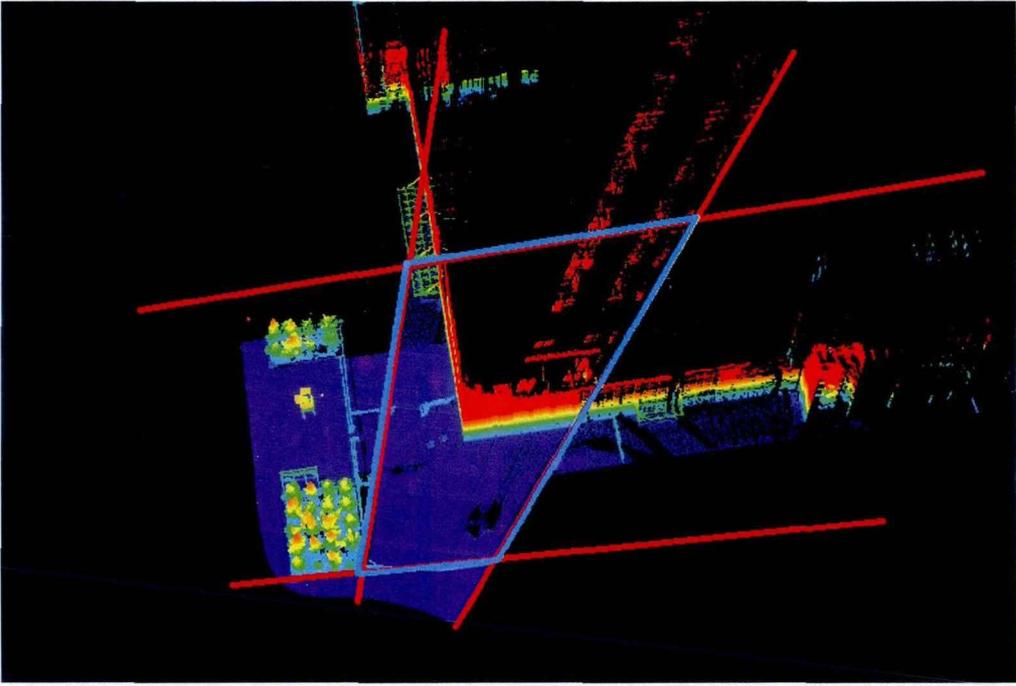


图 6.10 X、Y 以及平面位置残差

上表中可以看出，激光点云得到的点的平面坐标与全站仪测量得到的点的平面坐标的最大较差为 10.1cm，平均较差为 5.6cm，在 X 坐标较差折线图、Y 坐标较差折线图以及平面位置较差折线图中，较差没有明显的规律，说明不存在系统误差，主要受随机误差的影响。

激光点云可视化是检查激光点云质量的一种强有效的工具[Vosselman 2010]。在系统完成标定前，系统对同一地物的多次数据采集可视化后常造成墙面不能重合以及地物“重影”现象，如下图所示。



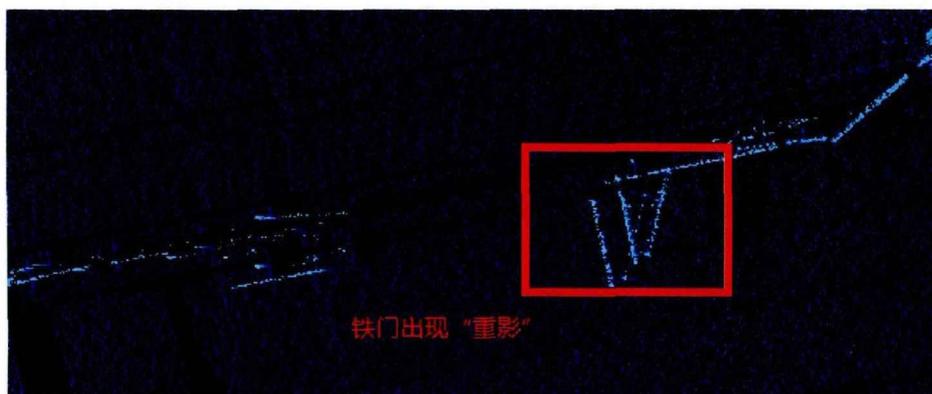
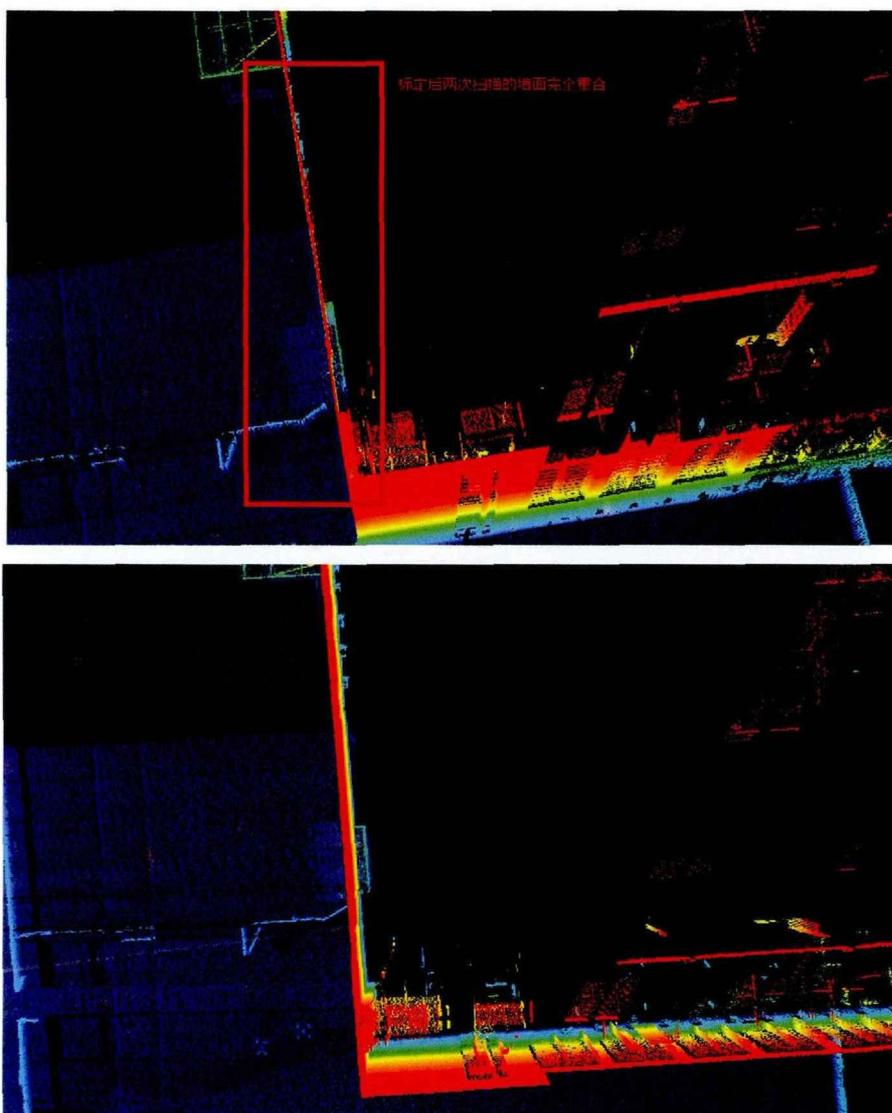


图 6.11 系统标定前激光点云的重影现象

在系统完成标定之后，墙面能够重合，“重影”现象也消失，如下图所示。



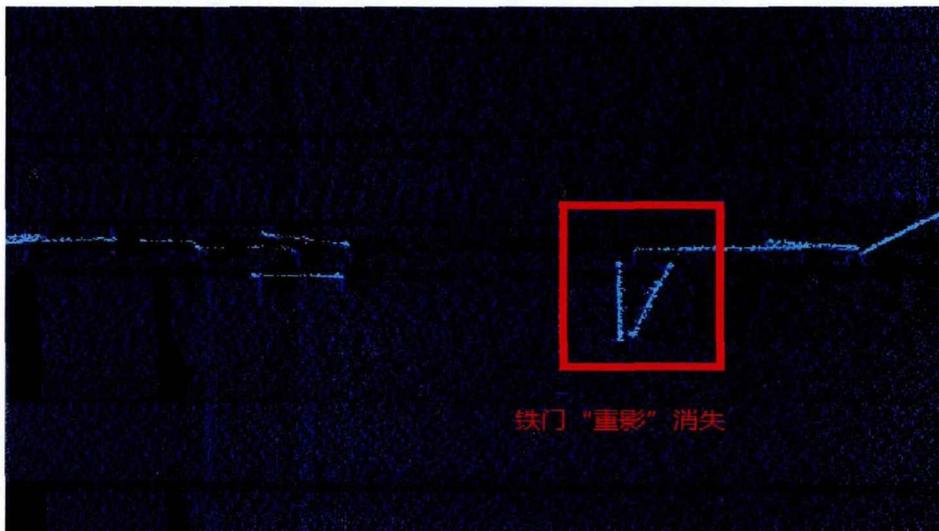


图 6.12 系统标定后激光点云重影消失

通过实际外业点检查和激光点云扫描重合度分析可知，对 Riegl VZ400 激光扫描仪进行的绝对标定方法是可行的，参数解算算法是正确的，标定后平面精度达到 5.6cm，高程精度达到 2cm。

### 6.3 2D 路面激光扫描仪的绝对标定

2D 路面激光扫描仪采用 Riegl LMSQ120i 激光扫描仪，激光扫描仪架设在移动车辆系统的车尾部位，主要负责道路面数据的采集。同样，Riegl LMSQ120i 激光扫描仪的外标定为求取 Riegl LMSQ120i 扫描仪坐标系到惯导坐标系的转换参数。

Riegl LMSQ120i 激光扫描仪扫描的是道路面数据，呈条带平面状，如下图 6.13 所示。

在该条带平面数据中，很难有足够的现存的控制点用于标定，因此刚开始，我们尝试在道路两旁布设人工控制点，如下图 6.14 所示；首先，使用全站仪通过控制测量的方式测量出各三角标角点的坐标，即控制点在大地坐标系下的坐标，再使用车载移动测量系统扫描这些三角标志，得到控制点在 Riegl LMSQ120i 坐标系下的坐标，最后通过参数解算算法解算 Riegl LMSQ120i 激光扫描仪的外标定参数。此方法理论上可行，但在实际的标定过程中发现，由于三角标志的大小的限制以及 Riegl LMSQ120i 激光扫描仪自身扫描精度的限制，很难在激光点云中准确的提取到三角标志的角点，因此标定效果较差。

鉴于 Riegl LMSQ120i 激光扫描仪的标定无法像 Riegl VZ400 的标定那样使用房屋的角点等特征点，使用人工的三角标志标定精度又难以达到要求，我们只能另辟蹊径，寻求更巧妙的标定方法。

由于在 Riegl LMSQ120i 扫描仪的机身上，存在 12 个控制点，仪器生产厂家提供这 12 个控制点在激光扫描仪坐标系下的精确坐标值，因此我们可以利用这些已知扫描仪坐标系下精确坐标值的控制点来完成 Riegl LMSQ120i 激光扫描仪的绝对标定。



图 6.13 Riegl LMSQ120i 条带状道路面数据



图 6.14 使用三角标志对 Riegl LMSQ120i 进行绝对标定

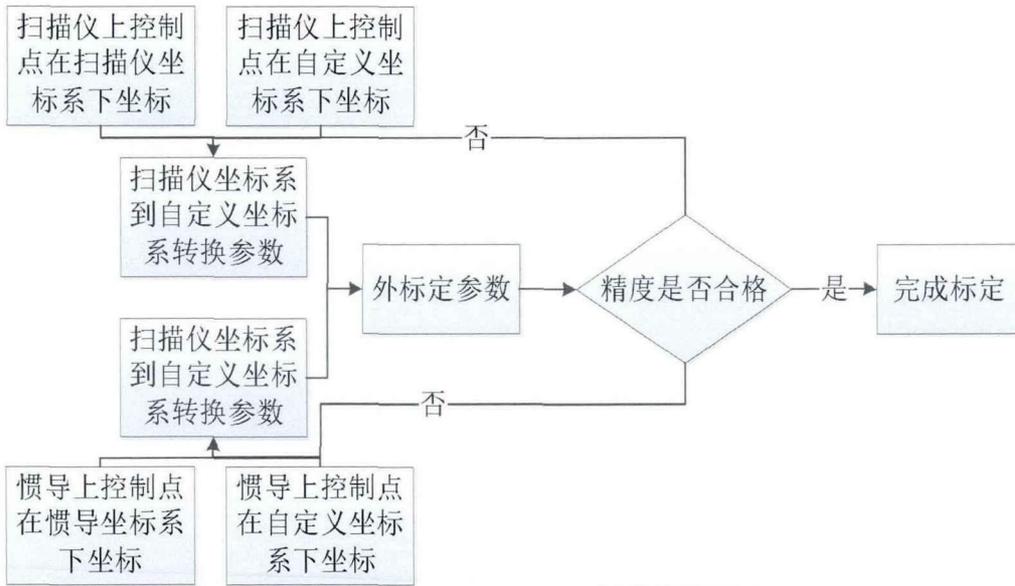


图 6.15 Riegl LMSQ120i 激光扫描仪绝对标定流程

按照前面所述的对 Riegl LMSQ120i 标定的思路，我们提出了一种 Riegl LMSQ120i 激光扫描仪的绝对标定流程，如上图 6.15 所示。

在标定过程中，可以利用自由设站的方式建立独立坐标系（以下称为自定义坐标系），测量 IMU 上控制点在该坐标系下的坐标，以及激光扫描仪上控制点在此坐标系下的坐标，如图 6.16 所示。通过特殊的控制点布设方式，IMU 上控制点在惯导坐标系下的坐标可通过 IMU 生产厂家提供的参数计算得到，又由于激光扫描仪上控制点在激光扫描仪坐标系下的精确坐标已知，通过这些控制点的坐标值即可求取标定参数。

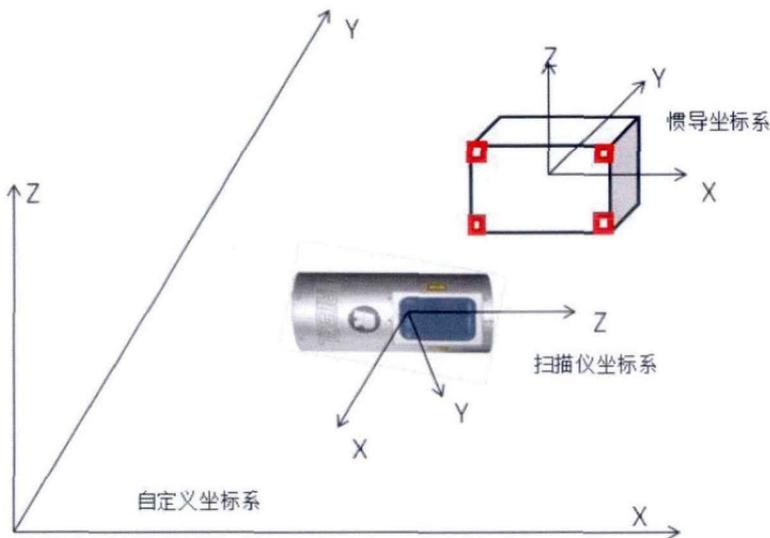


图 6.16 LMS-Q120i 扫描仪的标定原理

### 6.3.1 2D 路面激光扫描仪的标定原则

对于 Riegl LMSQ120i 激光扫描仪的标定，只需要测量激光扫描仪上控制点及 IMU 上控制点在自定义坐标系下的坐标，在自定义坐标系建立以及控制点的布设与测量过程中，应该遵循如下原则：

1) IMU 上布设的反射靶标点按图 6.17 所示进行布设，即在 IMU 的四个角点处布设靶标，靶标要尽量与其边缘进行对齐。

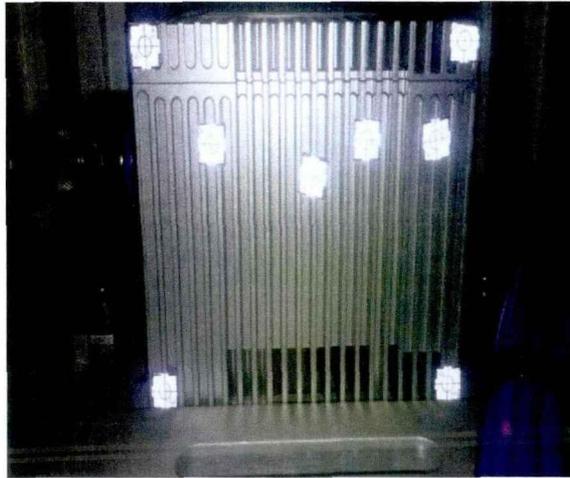


图 6.17 IMU 反射靶标示意图

2) 由于 IMU 以及 Riegl LMSQ120i 处于一个较小的车载平台中，在自定义坐标系时，一个测站可能无法测量到所有控制点的坐标，因此在自定义坐标系时，应考虑一站测量尽可能多的控制点，在一站无法测量所有控制点的情况下，换站的过程中需要严格遵守换站的相关操作规范。

3) 在控制点测量的过程中，尽量保证入射角为最小，同时尽量降低照准误差的影响。

4) 标定的精度要求较高，需保证全站仪及相关设备的测量精度，要求全站仪的测角精度优于  $1''$ ，测距精度优于  $1\text{mm}+1\text{ppm}$ 。

### 6.3.2 2D 路面激光扫描仪的标定原理及标定参数解算

利用全站仪测量得到图 6.16 标定模型中的各控制点坐标后，即可利用该模型解算激光扫描仪坐标系到惯导坐标系的转换参数。

测量得到的控制点数据分为两类，一类为激光扫描仪坐标系与自定义坐标系之间的“同名点”，用于解算激光扫描仪坐标系到自定义坐标系之间的转换参数；另一类为自定义坐标系与惯导坐标系之间的“同名点”，用于解算自定义坐标系到惯导坐标系的转换参数。

自定义坐标系与惯导坐标系的“同名点”如表 6.9 所示，由表 6.9 中的数据可求得自定义坐标系到惯导坐标系的转换参数。

表 6.9 自定义坐标系与惯导坐标系的“同名点”坐标

点名	自定义 X	自定义 Y	自定义 Z	惯导 X	惯导 Y	惯导 Z
IMU1	-0.77935	-2.41305	1.92755	-0.0752	-0.0498	0.05695
IMU2	-0.89295	-2.41415	1.9261	0.0428	-0.0498	0.05695
IMU3	-0.89174	-2.41481	1.83251	0.0428	-0.0498	-0.03665
IMU4	-0.77815	-2.41383	1.83396	-0.0752	-0.0498	-0.03665

自定义坐标系与激光扫描仪坐标系的“同名点”如表 6.10，由表 6.10 中的数据可求得激光扫描仪坐标系到自定义坐标系的转换参数。

表 6.10 激光扫描仪坐标系与自定义坐标系的“同名点”坐标

点名	扫描仪 X	扫描仪 Y	扫描仪 Z	自定义 X	自定义 Y	自定义 Z
Q-120i4	-0.077	0	-0.27072	-0.5806	-1.3965	2.11925
Q-120i5	0.0385	-0.06668	-0.27072	-0.58095	-1.26505	2.09835
Q-120i6	0.0385	0.06668	-0.27072	-0.5787	-1.34825	1.9946

利用 Riegl LMSQ120i 激光扫描仪的标定软件，导入自定义坐标系到惯导坐标系的转换同名点及激光扫描仪坐标系到自定义坐标系间的同名点坐标，可获得 Riegl LMSQ120i 扫描仪的标定参数解算结果，如图 6.18 所示：

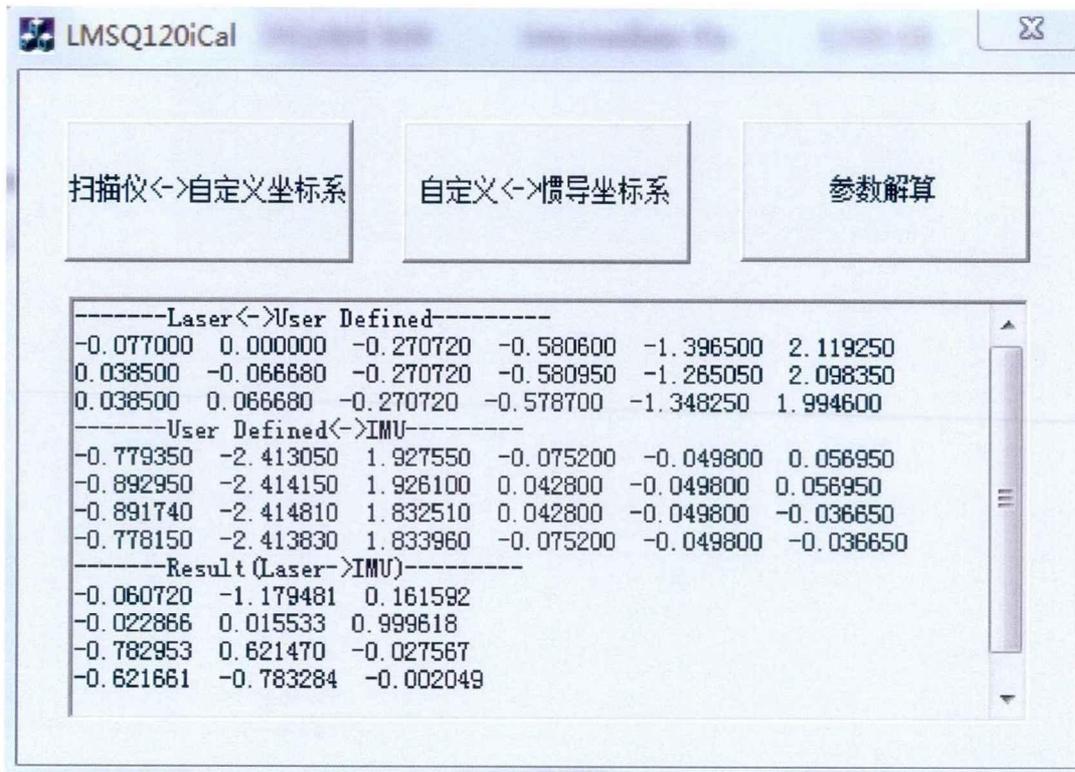


图 6.18 Riegl LMSQ120i 扫描仪的标定参数解算结果

### 6.3.3 2D 路面激光扫描仪标定实验与结果分析

Riegl LMSQ120i 激光扫描仪扫描的是道路面数据，对精度的要求不如 Riegl VZ400 高，另外 Riegl VZ400 激光扫描仪自身的扫描精度也比 Riegl LMSQ120i 要高[vz400 datasheet,Q120i datasheet]，如下表 8.11 所示。因此可将 Riegl VZ400 的激光点云作为控制点，采用 Riegl LMSQ120i 的点云数据与 Riegl VZ400 的点云数据比较的方法来检验 Riegl LMSQ120i 的标定精度。

表 6.11 Riegl VZ400 与 Riegl LMSQ120i 扫描精度对比

	Riegl VZ400	Riegl LMSQ120i
Accuracy	5mm	25mm
Precision	3mm	15mm

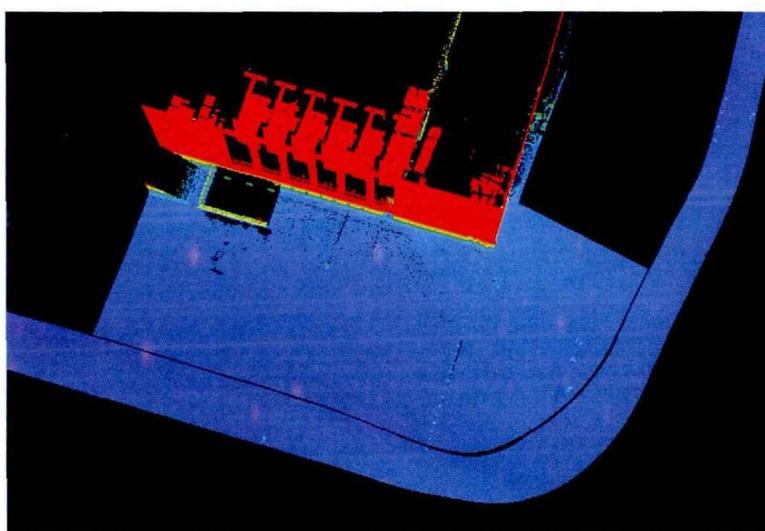


图 6.19 LMSQ120i 点云与 VZ400 点云

在平坦区域，通过比较 Riegl LMSQ120i 点云与 Riegl VZ400 点云是否处于同一平面可检验 Riegl LMSQ120i 点云数据的高程精度，从下图中可知，Riegl LMSQ120i 与 Riegl VZ400 同一水平面的点云基本处于同一个水平面上，因此 Riegl LMSQ120i 的激光点云精度与 Riegl VZ400 激光点云的精度相当。

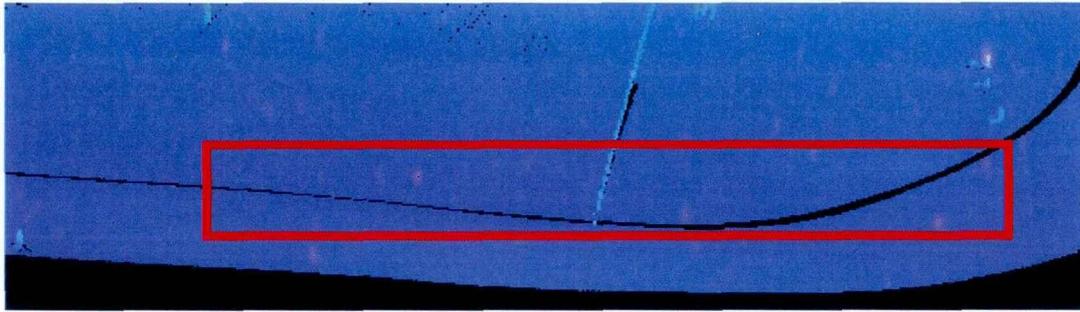


图 6.20 LMSQ120i 数据与 VZ400 数据高程吻合度

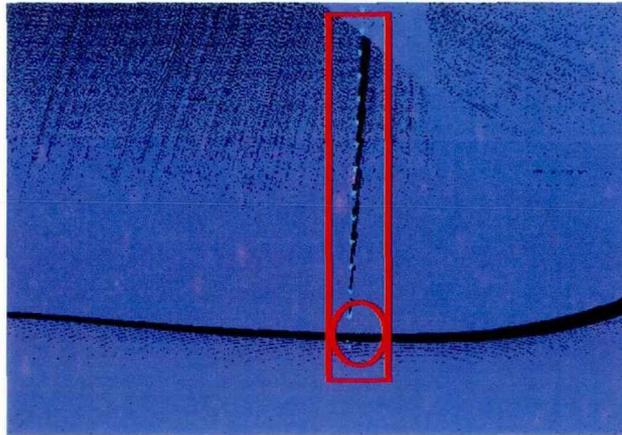


图 6.21 LMSQ120i 数据与 VZ400 数据平面吻合度

通过检查一条直线处于 Riegl VZ400 激光点云以及 Riegl LMSQ120i 激光点云中的两部分是否在同一条直线上能够验证 Riegl LMSQ120i 点云的平面精度。将 Riegl VZ400 激光点云与 Riegl LMSQ120i 激光点云可视化后，可看出实际地物中的一条直线在点云中的两部分仍然是一条直线，如上图所示，因此可知，Riegl LMSQ120i 激光点云的精度较好。

## 6.4 车载全景影像与激光点云联合标定

### 6.4.1 全景相机的内标定

车载激光扫描与全景成像城市测量系统的全景相机由 8 台面阵 CCD 相机构成，如图 5.9 所示。在每个采样时刻同步控制系统控制 8 个 CCD 相机同时曝光，获取同一场景不同视角的 8 张面阵 CCD 影像，然后通过全景拼接处理得到 360° 视场的全景影像。由于全景成像系统的 8 台 CCD 相机为非量测工业相机，其成像存在较大的成像畸变，而成像畸变会对影像与点云配准的精度以及影像量测建模的精度产生影响，需要使用畸变参数对影像进行畸变矫正；另外，相机的内方位元素（主点、焦距）也是影像解析处理的必要元素。因此需要对单台

面阵 CCD 相机进行内标定，以确定每个镜头的内方位元素和畸变系数。本文采用张正友提出的平面标定法[Zhengyou Zhang 2000]进行相机的内标定。

#### 6.4.1.1 平面标定原理和流程

张正友在文献[Zhengyou Zhang 2000]中提出一种介于传统标定方法和自标定方法之间的平面标定法。该方法采用平面标定装置，利用旋转矩阵的正交性，求出摄像机参数并通过投影误差最小准则进行优化。它既避免了传统标定方法设备要求高、操作繁琐等缺点又比自标定点的精度高、鲁棒性好[李云翔 2009]。该方法主要步骤如下：

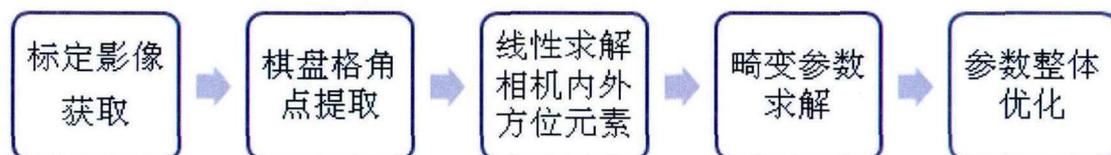


图 6.22 张正友算法流程图

下图 6.23 是平面标定法示意图，物方标定合作目标是平面的，因此可假设其  $Z$  坐标为 0，物方坐标的原点可以随意假设（一般取棋盘某个角点为坐标系原点）。利用光线相交，建立每个棋盘角点的物方坐标和平面图像坐标的约束关系。

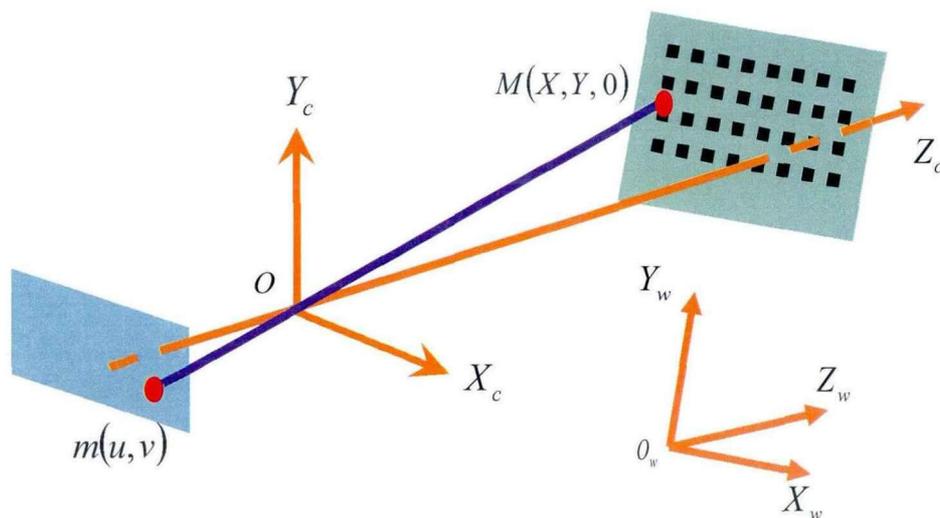


图 6.23 张正友平面标定法示意图

全景相机内标定的实验器材为平面棋盘格标定板，如图 6.24 所示。该标定板使用复合基材，表面呈漫反射，边长为 40cm×30cm。标定棋盘格阵列数目数为 12×9，每个棋盘格尺寸大小为 30mm×30mm，点位精度为 0.2mm。

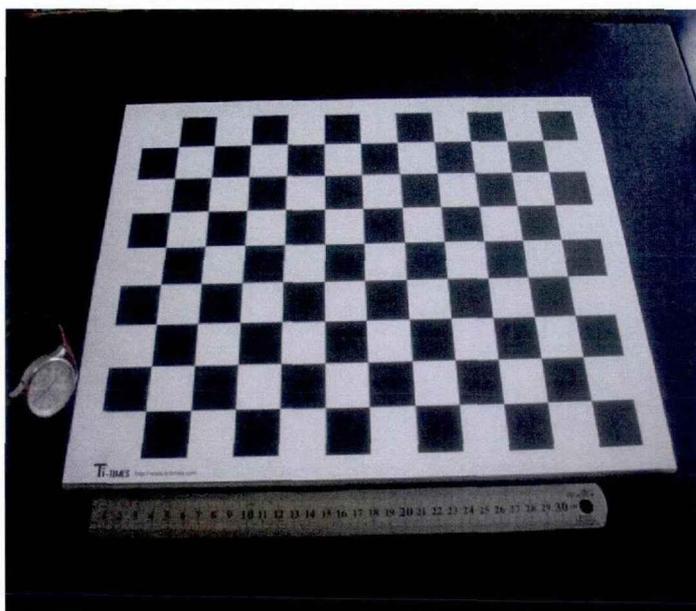


图 6.24 复合材料棋盘格标定板

采用车载全景影像系统管理软件，对每个镜头环绕拍摄棋盘影像。在采集标定影像时，需要满足以下条件：

1) 光照条件。拍摄过程中要保证光照均匀，尽量避免太阳直射所引起的逆光拍摄；

2) 图像几何条件。标定图像面之间不能平行，因为在平行的情况下，多视图提供的几何约束将变弱甚至消失，在实际操作中，要尽量以不同的视角来进行“环绕”拍摄；

3) 标定板成像大小。为了能够为图像的区域进行畸变建模，需要保证标定板在图像中所占像幅的大小，标定板至少需要占据图像的一半以上区域；

4) 标定图像张数。用于标定的图像一般以 8-12 张为宜，若当前标定使用的图像不能获得稳定、精确的标定参数，则需要删除质量不好的标定图像，并增加新的图像。

获取的影像图如图 6.25 所示。

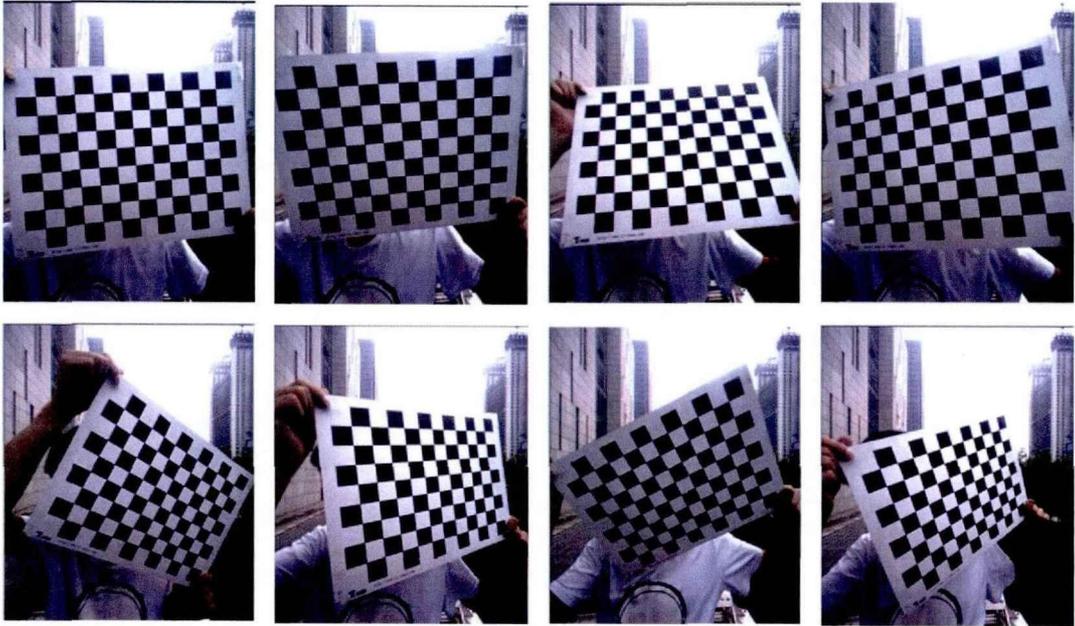


图 6.25 标定原图像

完成标定影像的采集后，将影像导入到自主开发的相机内参数标定软件进行标定。内标定软件的界面如图 6.26 所示，对标定影像进行棋盘格角点提取，角点提取的效果图如图 6.27。

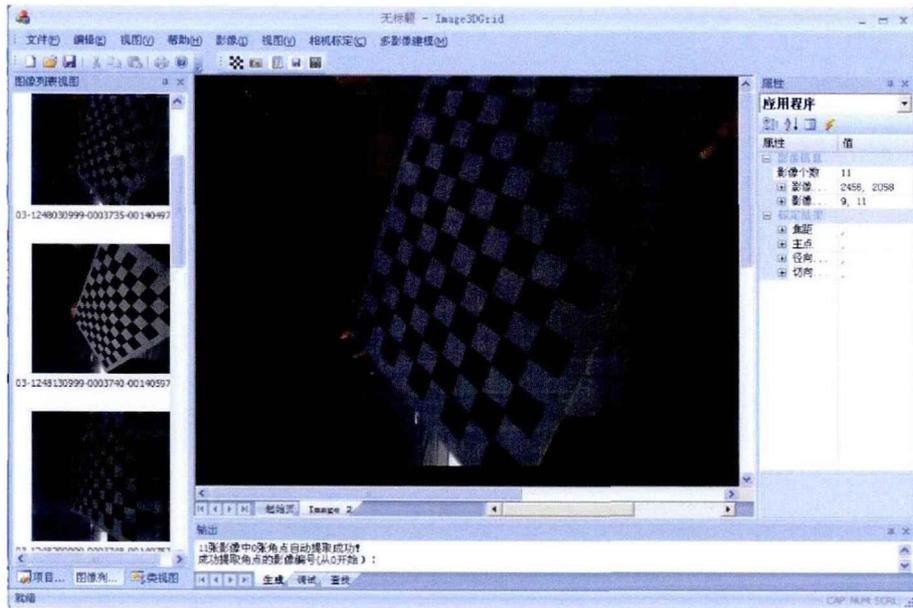


图 6.26 影像内标定软件主界面

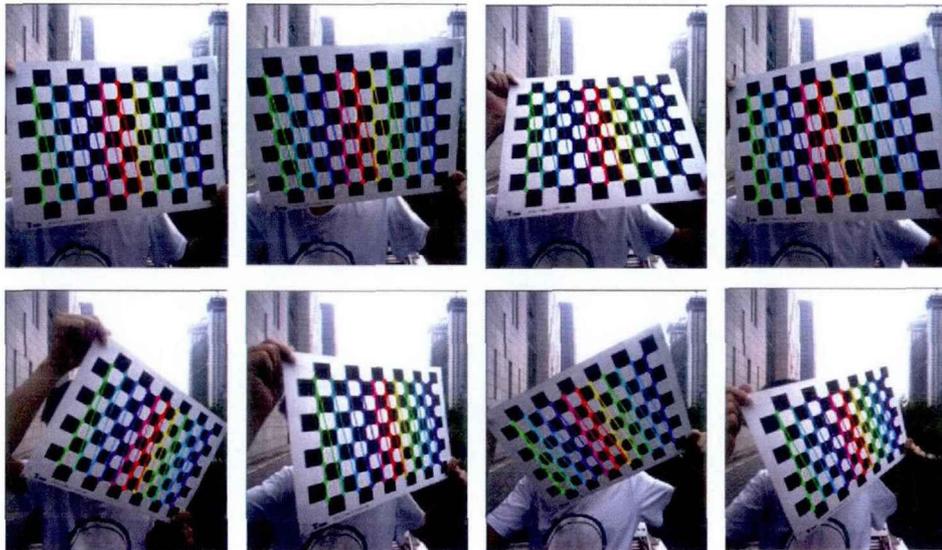


图 6.27 图像棋盘格角点提取

#### 6.4.1.2 内标定结果及精度分析

为了验证本文内标定算法的稳定性，在对每台 CCD 相机进行内标定时，选择不同张数的标定图像进行多次标定实验，以 6 号相机为例，多次标定实验标定结果的统计值如下表。

表 6.12 多次标定实验标定结果统计（单位：像素）

张数	焦距		主点		径向畸变( $\times 10^{-2}$ )		切向畸变( $\times 10^{-4}$ )		中误差
	fx	fy	x0	y0	k1	k2	p1	p2	
24	1461.30	1460.96	1211.58	1048.92	-3.62	5.80	-6.87	1.47	0.39
21	1460.96	1460.49	1211.54	1049.28	-4.03	6.29	-6.00	1.54	0.37
19	1460.87	1460.40	1211.39	1049.17	-4.03	6.26	-6.01	1.54	0.35
17	1460.49	1460.13	1211.6	1049.52	-4.07	6.35	-6.22	1.72	0.34
15	1460.42	1460.10	1211.67	1049.44	-4.11	6.43	-6.70	2.02	0.33
13	1461.08	1460.52	1211.53	1048.50	-4.51	7.35	-7.86	2.30	0.32
11	1460.73	1460.23	1211.38	1048.43	-4.47	7.27	-8.29	2.26	0.31
9	1459.91	1459.51	1211.49	1049.09	-4.60	7.52	-8.11	2.13	0.30
7	1459.84	1459.37	1211.02	1048.81	-4.62	7.31	-8.25	2.03	0.29

为描述标定结果的稳定性，统计各个参数在多次标定实验中的中误差，如下表所示。其中，多次标定实验焦距的中误差在 0.5 个像素左右，而主点的中误差也在 0.4 个像素以内，由此可以说明标定的参数稳定性较高，得到的结果较为可靠。

表 6.13 多次标定实验标定参数的中误差 (单位: 像素)

张数	焦距		主点		径向畸变 ( $\times 10^{-2}$ )		切向畸变 ( $\times 10^{-4}$ )	
	fx	fy	x0	y0	k1	k2	p1	p2
中误差	0.504	0.498	0.192	0.386	0.339	0.628	0.981	0.326

由表格 6.13 的最后一列可以看出, 各次标定的点位中误差都比较小, 多次实验的平均点位中误差为 0.33 个像素, 满足标定要求中精度内符合在 1 个像素内的设定。另外随着图像张数的变化, 标定精度在很小范围内波动, 这同样也说明了该标定算法稳定性强。

采用上述的标定算法依次对全景成像系统的 8 个 CCD 相机进行内标定, 其标定结果如表 6.14 所示。

表 6.14 单台面阵 CCD 相机的标定结果 (单位: 像素)

相机号	焦距		像主点		径向畸变 ( $\times 10^{-2}$ )		切向畸变 ( $\times 10^{-4}$ )	
	fx	fy	x0	y0	k1	k2	p1	p2
1	1459.11	1459.76	1000.27	1227.45	-3.02	4.49	6.19	-9.47
2	1460.74	1461.27	1019.71	1219.31	-4.32	6.69	-11.35	-1.23
3	1450.24	1453.64	1018.79	1230.42	-3.69	5.51	-9.17	1.99
4	1465.15	1468.08	1019.34	1221.15	-3.17	4.27	5.23	-2.21
5	1453.18	1454.59	1010.37	1223.92	-1.84	2.62	-8.63	-11.32
6	1458.30	1458.22	1006.09	1210.66	-3.69	5.00	4.03	3.80
7	1468.88	1471.16	1002.33	1216.16	-5.02	6.98	-3.08	-3.30
8	1459.36	1460.34	1002.63	1212.83	-3.74	6.19	-11.69	-3.46

## 6.4.2 激光点云与全景影像的高精度配准

### 6.4.2.1 配准方案

全景影像外标定是为了恢复影像拍摄瞬间相机在 WGS-84 坐标系下的位置与姿态, 经过外标定的全景影像能与 WGS-84 坐标系下同一场景的激光点云进行“套合”, 即实现全景影像和点云的配准。在全景拼接时, 全景影像与单张面阵 CCD 影像间的映射关系可精确得到; 激光扫描仪坐标系与惯导坐标系之间的转换关系可通过建立高精度标定控制场解算激光扫描传感器与惯导坐标系的相对位置得到, 而惯导坐标系与 WGS-84 坐标系间的转换关系可由 POS 数据插值。因此, 若能获取单张面阵 CCD 影像在激光扫描仪系统坐标系下外方位元素, 则可实现车载全景影像与 WGS-84 坐标系下激光点云的高精度配准。由于车载移动测量系统中, 车上的主要传感器——激光扫描仪、全景相机、POS 系统被固定在刚性平台, 其相对位置关系保持不变, 而且论文相关研究中车载系

统所采用的 VZ-400 扫描系统能够支持在同一扫描坐标系下的移动 2D 线扫描以及静态 3D 全景扫描两种工作模式，因此可利用 VZ-400 在车载系统保持静止状态下的 3D 全景扫描数据作为全景 CCD 标定的控制点。本文全景影像与激光点云的配准方案如下所示：

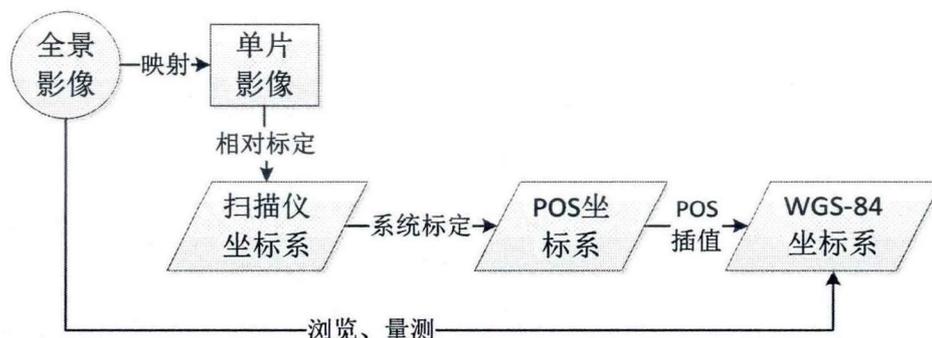


图 6.28 全景影像与激光点云的配准方案

#### 6.4.2.2 全景影像与单张 CCD 影像间的映射

设面阵 CCD 影像  $I_m (m=1,2,\dots,8)$  上任意像点  $A$  的像素坐标为  $(i, j)$ ，其对应于全景影像上的点的球面坐标坐标用  $(\theta, \varphi, r)$  表示，其中  $\theta$  为水平旋转角， $\varphi$  为俯仰角， $r$  为球体半径，则全景坐标和单张面阵 CCD 影像的像素坐标转换公式如下：

$$\begin{cases} i = \frac{W}{2} - r \cdot \text{ctg}(\beta - \theta) \\ j = \frac{H}{2} + r \cdot \frac{\sin \phi \cdot \sin(\beta - \theta)}{\cos \phi} \end{cases} \quad (6.25)$$

其中： $\beta$  为相机光轴绕垂直轴  $Y$  轴的旋转角度，对于相机  $I_m$  而言， $\beta = 45 \times (m-1)$ ； $W$  和  $H$  分别为面阵 CCD 影像  $I_m$  的长度和宽度。

根据全景影像上任意一点的球面坐标  $(\theta, \varphi, r)$ ，由式 6.25 可确定它所对应的单张面阵 CCD 影像上的像点坐标，进而可建立全景和单片像素间的映射关系。

#### 6.4.2.3 激光扫描坐标系下单片外标定

根据上述分析，为了达到车载点云与全景影像的高精度配准，其核心步骤在于将 8 个 CCD 相机与激光点云在激光扫描仪坐标系下进行配准，即获取相机在扫描仪坐标系下的外方位元素。

首先需要选择合适标定场景，在场景中布设靶标，靶标需分布均匀，且要在深度方向上有丰富的变化。调整车载系统至合适位置及方向，并在系统静止

条件下依次利用 8 个 CCD 相机获取标定场景影像，并且扫描获得标定场景的激光扫描数据。标定数据获取后，在每张影像和其对应的点云数据中，手动选取 4 个以上的控制点，得到其对应的图像坐标  $(x, y)$  以及激光扫描坐标系下的激光点坐标  $(X, Y, Z)$ ，结合内标定所获取的相机内方位元素  $(x_0, y_0, f)$  和畸变参数，由共线方程：

$$\begin{cases} x - x_0 - dx = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 - dy = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (6.26)$$

其中， $dx$ 、 $dy$  分别为像点在  $x$ 、 $y$  方向的畸变改正量， $X_s$ 、 $Y_s$ 、 $Z_s$  分别为 CCD 相机在扫描仪坐标系下的位置  $T_{CL}$  的三个分量，而  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  ( $i=1,2,3$ ) 则构

成旋转矩阵  $R_{CL}$  的 9 个元素，即：
$$R_{CL} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}。$$

由共线方程列出对应的误差方程，即可求得 CCD 相机与激光扫描仪的相对标定参数。

#### 6.4.2.4 全景影像和点云在WGS-84坐标系下的配准

设某物方点  $P$  在全景影像上成像并同时获得其激光点数据。由全景和单片的映射关系，可以获取该点在对应单片影像的像空间坐标系下的坐标  $[X_C \ Y_C \ Z_C]^T$ 。利用上文中标定获取的 8 个 CCD 相机与激光扫描仪相对位姿关系  $T_{CL}$ 、 $R_{CL}$ ，则该点在单片像空间坐标系与激光扫描仪坐标系的转换关系描述如下：

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = R_{CL} \left( \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} - T_{CL} \right) \quad (6.27)$$

式中， $(X_L \ Y_L \ Z_L)^T$  为该点在激光扫描仪坐标系下的坐标。通过系统标定，激光扫描仪坐标系与惯导坐标系的转换关系  $T_{LP}$ 、 $R_{LP}$  已知，若记惯导坐标系下点的坐标为  $(X_p \ Y_p \ Z_p)^T$ ，则由激光扫描仪坐标系到惯导坐标系转换关系为：

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = R_{LP} \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} + T_{LP} \quad (6.28)$$

惯导坐标系与 WGS-84 坐标系之间的转换关系  $T'_{PW}$ 、 $R'_{PW}$  是与时间相关的变量，可以根据影像获取的时间由 POS 数据插值得到。记点在 WGS-84 坐标系下的坐标为  $(X_w \ Y_w \ Z_w)^T$ ，则两坐标系之间的转换关系为：

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = R'_{PW} \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} + T'_{PW} \quad (6.29)$$

式 (6.27)、(6.28)、(6.29) 分别描述了激光扫描仪坐标系、惯导坐标系、WGS-84 坐标系之间的转换关系。将影像和激光点进行配准就是要获得二者在 WGS-84 坐标系下的转换关系。这里考虑的激光点云已经转换到了 WGS-84 坐标系下，若设单片的像空间坐标系与 WGS-84 坐标系的转换矩阵为  $R_{CW}$ 、 $T_{CW}$ ，则两坐标系下的点满足下式：

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = R_{CW} \left( \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} - T_{CW} \right) \quad (6.30)$$

根据矩阵推导可求得：

$$R_{CW} = R_{CL} R_{CW}^{-1} \quad (6.31)$$

$$T_{CW} = T_{LW} + R_{LW} T_{CL} \quad (6.32)$$

其中，

$$R_{LW} = R'_{PW} R_{LP} \quad (6.33)$$

$$T_{LW} = R'_{PW} T_{LP} + T'_{PW} \quad (6.34)$$

将式(6.33)、(6.34)代入式(6.31)、(6.32)，即可计算出  $R_{CW}$  和  $T_{CW}$ 。在已知单片与全景影像映射关系条件下，即可实现全景影像与激光点云的配准。

### 6.4.2.5 配准结果与分析

由前述标定原理和流程可知，全景影像和激光点云在 WGS-84 坐标系下的配准其最核心的环节是单个 CCD 相机与激光扫描仪的相对标定，这一步标定的精度对最终的基于配准的量测效果起到决定性影响。采用上一节中的方法获取标定数据，实验场景为某会展中心的选定建筑，8 台相机的标定结果如下表所示。

表 6.15 单台面阵 CCD 相机与 VZ-400 扫描仪间的转换关系

相机编号	平移矩阵		旋转矩阵			
1	$T_{CL}^1$	1.2045	$R_{CL}^1$	-0.551191580	-0.834348590	0.007090523
		-0.2532		-0.018165208	0.0035035712	-0.999828860
		0.5073		0.834180960	-0.551226050	-0.017087254
2	$T_{CL}^2$	1.1083	$R_{CL}^2$	-0.979561560	-0.200936640	0.009144764
		-0.3148		-0.010854810	0.0074101998	-0.999913630
		0.5250		0.200851520	-0.979576210	-0.009439876
3	$T_{CL}^3$	0.9554	$R_{CL}^3$	-0.837345120	0.546470660	0.014932317
		-0.3858		-0.017615365	0.0003291293	-0.999844780
		0.4704		-0.546390750	-0.837478190	0.0093506851
4	$T_{CL}^4$	0.9840	$R_{CL}^4$	-0.219785040	0.975509100	0.0087484136
		-0.2197		-0.015410830	0.005494744	-0.999866150
		0.5277		-0.975426590	-0.219890450	0.013825742
5	$T_{CL}^5$	0.9462	$R_{CL}^5$	0.550912070	0.834562350	0.0012547803
		-0.1234		-0.011866932	0.0093369576	-0.999885990
		0.5214		-0.834478920	0.550834370	0.015047537
6	$T_{CL}^6$	1.0574	$R_{CL}^6$	0.973944640	0.226405300	-0.013132850
		-0.0391		-0.014588434	0.0047570554	-0.999882270
		0.5602		-0.226316170	0.974021570	0.0079360073
7	$T_{CL}^7$	1.1056	$R_{CL}^7$	0.841880790	-0.539552810	-0.010931265
		-0.1097		-0.007805453	0.0080794939	-0.999936900
		0.5004		0.539607080	0.841912990	0.0025905165
8	$T_{CL}^8$	1.2588	$R_{CL}^8$	0.212925760	-0.977046780	-0.0064969707
		-0.1276		-0.011434456	0.004157221	-0.999925980
		0.5015		0.977001470	0.212984280	-0.010286819

以 3 号相机为例，对全景影像和点云在激光扫描仪坐标系下的配准参数进行精度检验。在该相机和激光点云的相对标定过程中，分别在影像和点云中提

取了对应的9个靶标点，其中7个靶标点作为控制点平差解算标定参数，将另外两个靶标点作为检核点检验标定精度，坐标残差统计如下表。

表 6.16 平差解算的残差（单位：像素）

点号	点类型	x 残差	y 残差	点位误差
tp001	控制点	-1.14	-1.76	2.10
tp002	控制点	-0.46	-1.09	1.18
tp003	控制点	0.83	0.59	1.02
tp004	控制点	0.39	1.74	1.78
tp005	控制点	0.64	-1.67	1.79
tp006	控制点	0.17	2.14	2.15
tp007	控制点	-0.11	0.30	0.32
tp008	检核点	-0.60	0.70	0.92
tp009	检核点	0.54	-1.44	1.54

由上表可知，平差解算后控制点的点位均方差 1.48 像素，检核点的点位残差也在 1.6 个像素以内，标定参数的精度高，能满足相关应用的要求。在激光扫描仪坐标系下，影像与激光点云的配准结果展示如下图所示。

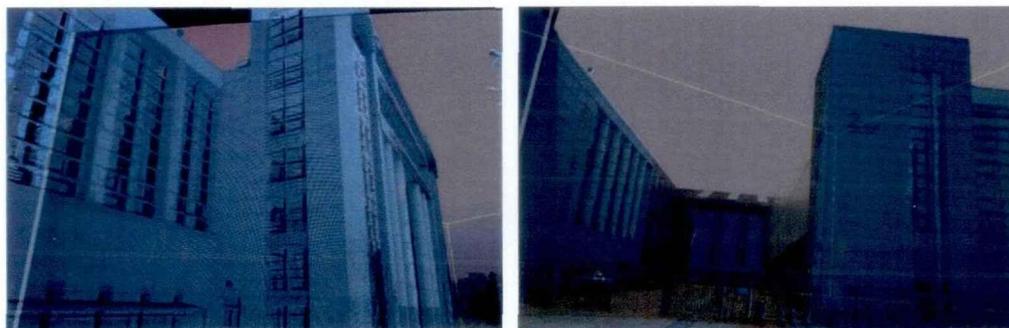


图 6.29 Cam03 相机影像与点云配准结果

获得单个 CCD 相机和激光扫描仪的标定参数后，在已知全景与单片的映射关系以及激光扫描仪坐标系与 POS 坐标系相对关系的情况下，经过 POS 数据插值，即可实现全景影像和激光点云在 WGS-84 坐标系的配准，配准效果如下图所示。通过实地布设地物标志点对本文的配准精度进行验证，测得在平均距离为 42 米时配准精度为 7.8cm。



图 6.30 车载点云与全景影像配准后的结果

配准参数精确标定后，通过将全景影像数据和三维激光点云数据进行融合处理，得到具有真实颜色信息的地物点云，效果如下图所示。

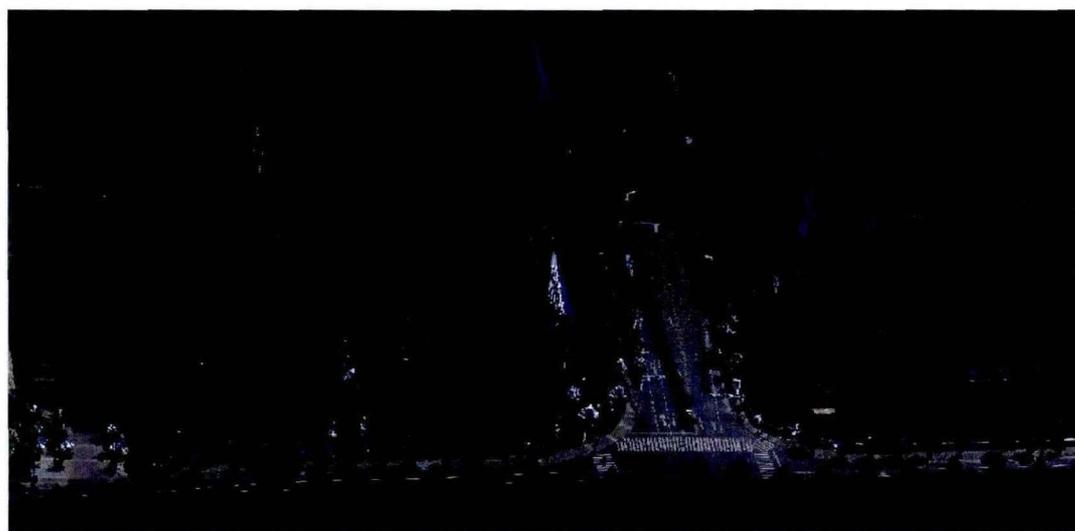


图 6.31 与影像融合后的激光点云数据



图 6.32 与影像融合后的激光点云数据局部放大图

由实验可以看出，融合数据在保留激光点云数据特性的前提下，道路边线、道路标识、路灯等清晰可辨，路旁绿化带的颜色逼真，建筑物墙面的纹理的真实感也非常强。

综上可得本文车载全景影像与激光点云联合标定方案是有效可行的，能使车载全景影像和激光点云数据进行高精度的配准，将两种数据进行有效的关联，充分结合激光扫描点的几何优势和全景影像的纹理细节优势，可使二者在城市目标量测、地物分类识别与三维建模等方面发挥更大的优势。

## 6.5 本章小结

本章完成了车载多传感器的联合标定，主要工作包括：对车载立体相机的内参数及其与惯导之间的空间关系进行了标定，评定了标定后的立体相机的量测精度；对激光扫描仪进行了绝对标定，求解了激光扫描仪的绝对标定参数，评定了激光扫描仪的绝对定位精度；对全景成像系统进行了内外参数标定，在标定的基础上将全景影像与激光点云进行了融合，得到了良好的效果。

## 第7章 研究成果及工程验证

### 7.1 车载移动测量系统研究成果

车载移动测量系统研究成果可分为硬件系统及软件系统，硬件系统是指集成了大量前沿仪器设备的车载数据采集系统，软件系统是指一系列硬件控制、数据管理和数据处理软件。

#### 7.1.1 硬件系统集成成果

根据车载移动测量系统的应用要求不同，可以有不同的设计及采用不同功能的传感器。车载移动平台集成不同类型和功能的多种传感器以适应不同测绘及信息采集目标的需要。

##### 7.1.1.1 面向城市测绘的移动测量系统

研究成果是车载三维激光与全景影像智能测量系统，如图 7.1 所示，该系统集成了高精度 IMU、双频 GPS、车轮编码器、8 摄像头全景相机、RIEGL VZ-400 和 LMS-Q120i 激光扫描仪等仪器设备，对作为移动平台的车辆进行了改装，并通过自主研发的集成控制系统，形成了完整、稳定、相互适应的硬件系统。



图 7.1 车载三维激光与全景影像智能测量系统

### 7.1.1.2 面向空间信息采集与发布的移动测量系统

研究成果是面向空间信息采集与发布的移动测量系统，该系统集成了SPAN-CPT 惯性定位定姿系统、车轮编码器、7 摄像头全景相机、三台激光扫描仪等仪器设备。该系统是一个系列，可以满足不同城市区域以及不同作业条件下城市空间信息采集的需求，包括不同车载平台(汽车、小型机动车辆、非机动车辆)空间信息采集系统以及背包空间信息采集系统。车载空间信息采集系统体系如图 7.2 所示。

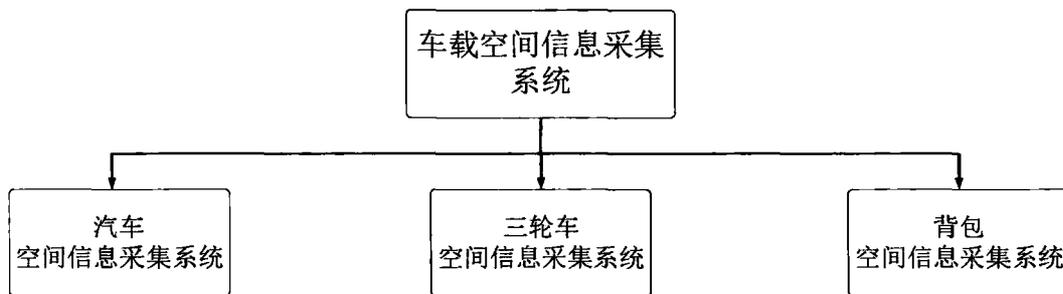


图 7.2 车载空间信息采集系统

机动车辆(汽车)空间信息采集系统可方便进入主干道进行作业，采集数据速度快、精度高、信息量大，如图 7.3 所示。



图 7.3 汽车空间信息采集系统

便捷的三轮车空间信息采集系统主要是适用于城市里的小巷、公园、自然风景区、学校、名胜古迹等汽车测量系统无法抵达的地方，如图 7.4 所示。



图 7.4 三轮车空间信息采集系统图



7.5 背包空间信息采集系统

如图 7.5，所示背包空间信息采集系统主要为在未通行车辆的环境下采集空间数据，如步行街、商业街、景区及室内数据采集。

### 7.1.1.3 基于立体测量的移动测量系统

研究成果是立体摄影测量采集车，该系统集成了 3 对立体测量相机、3 台激光扫描仪、一台摄像机、GPS/INS 惯性定位定姿系统。



图 7.6 立体摄影测量采集车

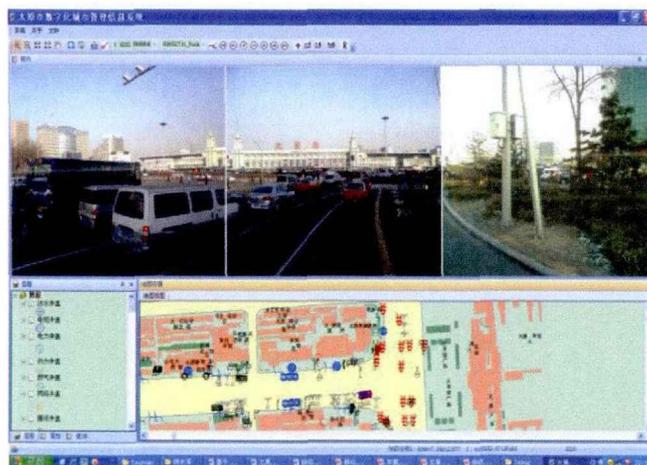




图 7.7 数字城市管理系统及数字部件普查

基于立体摄影测量移动采集车主要用于道路资产管理、数字部件普查及数字城市管理系统构建。

### 7.1.2 软件研发成果

软件系统主要可分为五个部分：车载系统标定软件、车载系统控制软件、激光点云数据预处理软件、全景影像数据预处理软件 and 数据处理成图软件。这五个部分软件融合于车载立体影像采集系统的应用过程中，是硬件系统和数据成果能够用于测绘生产实践的的必要工具和重要支撑。

#### 7.1.2.1 车载系统标定软件

标定软件是用于求取车载系统上各传感器自身坐标系到大地坐标系之间转换参数的一系列工具软件。该系列软件的内部算法是 6.2 节和 6.3 节标定原理的直接体现，包含 VZ-400 扫描仪自身自定义坐标系到大地坐标系之间的转换参数计算，LMS-Q120i 直接标定转换参数计算、全景相机中单个相机归算到 VZ-400 激光扫描仪自身坐标系和全景相机进一步整体归算到大地坐标系的转换参数计算等几个部分。

由于硬件系统受作业环境、气候、温度，甚至生产特殊需要，各设备在车载平台上的位置会发生改变，每隔一段时间或有项目需求时，需要重新进行标定，确保点云的精度。通过开发该套软件，将复杂艰深的标定技术和标定运算过程简化，直接输入在标定场测得的标定点高精度坐标，即可获得实际生产所需的一整套坐标转换参数，实现流程化作业。项目实施过程中，进行了多次标定实验，并利用标定结果进行了测图实验，结果表明，该软件采用算法合理，计算结果可靠，使用简易方便，可以用于日常测绘作业。

#### 7.1.2.2 车载系统标定软件

硬件控制软件是专门为了操作员在车辆内部操控车载系统各仪器设备，使其符合测绘作业需要所研发的一系列软件。它包括 IMU+GPS 控制软件、VZ-400 和 LMS-Q120i 激光扫描仪控制软件、全景相机控制软件。

IMU+GPS 控制软件主要负责查看和管理 GPS 信号、IMU 初始化和采集时的状态和数据记录情况。VZ-400 控制软件主要负责数据采集时的扫描仪配置集设定，如扫描模式、扫描角度、扫描状态、数据存储路径和命名等。LMS-Q120i 控制软件主要负责数据记录、数据存储路径和命名、扫描状态等。全景相机控制软件主要负责相机配置集的设置、相机影像的预览、色调调整、亮度调整、白平衡设置、采集时的同步触发控制、数据的存储路径、数据记录等。

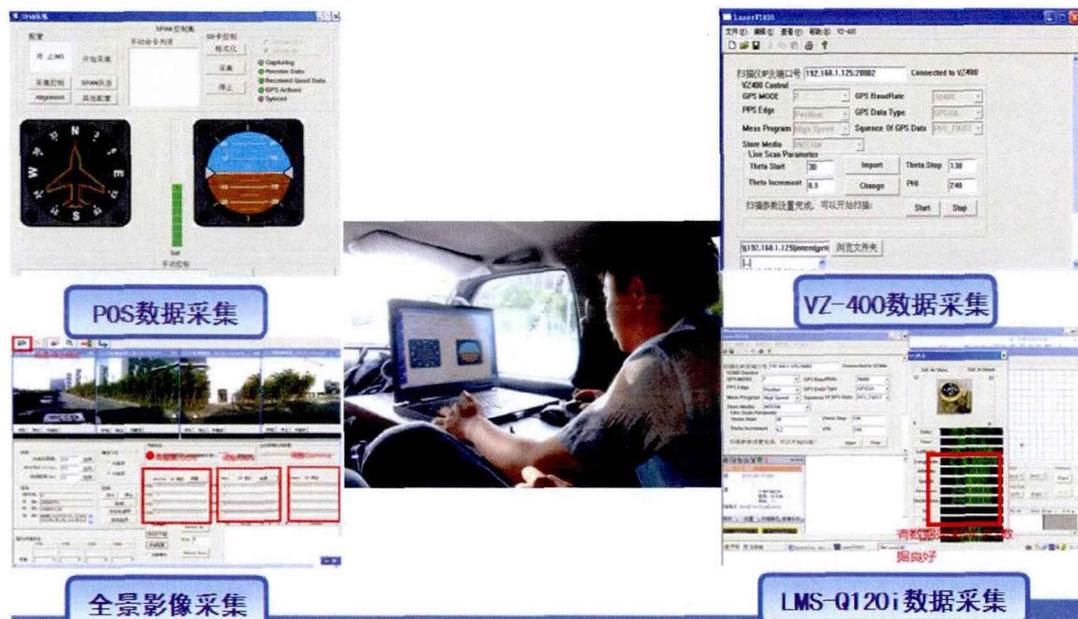


图 7.8 车载系统数据采集及控制软件

这些软件为硬件设备的使用和维护保养提供可视化的人机交互界面，是操作员进行测绘作业时的基本工具。它既避免了部分车载系统过于“傻瓜”的操作界面，导致设备的适应性和应用性下降，又防止了车载系统仅有少数研发人员或专业人员才能掌握复杂的参数设置，导致系统难以推广生产。从项目实验和实际生产来看，该部分软件能够顺利地完成人机交互，可以满足操作员的各类需求。

### 7.1.2.3 激光点云数据预处理软件

在点云进入生产之前，需要进行 POS 数据解算、点云坐标赋值、拼接合并、分割分块、点云抽稀等预处理工作，以保证点云可以实现“所见即所得”的功能，这部分功能就需要一系列预处理软件来实现。

GPS 提供车载系统的位置信息，IMU 提供车载系统的姿态信息，加入车轮编码器辅助信息，三者联合解算出很高精度的车辆行迹线。根据 GPS 对激光扫描仪和全景相机进行授时，确定任一时刻激光扫描仪和全景相机相对于 GPS 和 IMU 的位置关系，根据标定参数，对每一个激光点进行坐标赋值。由于计算机软硬件性能限制，数据文件不可过大；为方便实际测绘成图和三维建模需要，原本某些不同数据文件下的点云必须合并到一起，原本同一文件下的点云必须进行单独操作，需要提供点云分割、合并和抽稀功能。在车载系统“走停”模式下，不同测站之间利用对靶标球高精度扫描来进行点云的相对定向和绝对定向，形成整体数据，这是点云用于生产之前最为重要的预处理内容。

数据预处理是为了将最原始的外业记录数据处理成可以进行测绘生产的点云数据，是内外业之间的桥梁。简单易用、满足需要的预处理软件是项目成果进行生产应用的重要组成部分。

#### 7.1.2.4 全景影像数据处理软件

全景影像的主要作用是提供真实可靠的纹理、色彩信息，辅助激光点云进行测绘成图。全景影像数据处理软件是将单个相机拍摄的影像进行拼接，并与激光点云进行高精度匹配。

全景影像实际由 8 张单个相机采集的影像拼接而成，8 个相机各自有不同的标定参数来建立与激光扫描仪之间的联系，继而定位到绝对坐标系中，但拼接时需要归化到统一的投影中心，投影到同一个球面坐标系中。同时拼接时需要进行同名点匹配和平差计算。为使每个全景影像能以便于操作和易于理解的方式与激光点云在数据处理软件中进行展示和辅助测图，还需要将之转换到“全景球”的形式。这些数据处理工作，均需要由全景影像数据处理软件完成。

全景影像为激光点云的高效成图和三维建模提供了充分的参考信息，是人机交互激光点云处理时必要的辅助数据，为此开发软件也具有重要的实践意义和实用价值。

#### 7.1.2.5 点云数据处理成图软件

点云数据处理成图软件 VR\_CityScene 是本论文相关项目要求而开发的一套基于三维激光扫描点云数据进行城市测绘工作的点云数据处理系统，它是激光点云测绘作业最核心最重要的应用软件。VR\_CityScene 吸取了目前流行的各类

商用激光点云处理软件的优点，在此基础上进行了充分的研发，主要分为数据管理功能区和数据处理功能区，能够浏览和管理海量激光点云数据，具备与现有 CAD 平台测绘软件对接的二三维绘图、三维建模功能，是目前国内唯一特别为城市测绘工作定制的可以投入实践测绘生产的具有自主知识产权的激光点云数据处理软件。

VR\_CityScene 软件目前已能够应用于城市部件普查、城市规划竣工测量、土方量测量、公路检验、三维建模等领域，并且还在不断进行新功能新模块的开发研制，以期能够适用多领域的需求。

## 7.2 车载移动测量系统工程化应用

在系统工程应用和验证环节中，协同生产单位对车载激光扫描与全景成像城市测量系统的技术指标、产品标准化、应用拓展、设备保养维护等问题进行了研究和实践，充分分析车载系统的误差来源和生产效率，明确了车载系统在静态和动态两种模式以及不同观测条件下的测量精度等级和生产作业效率，建立车载系统用于城市测绘的规范的工艺流程，完成了车载激光扫描与全景成像城市测量系统应用体系建设，推进基于激光点云和全景影像的“办公室测绘”(Office Surveying) 技术的实施。

车载移动测量系统开发成功以后，已经在测绘、勘测部门、智能交通领域以及城市规划中城市地图、规划图等的更新中得到广泛应用，利用三维激光扫描点云结合影像数据可以进行城市测绘中的道路竣工、建筑竣工、城市部件采集以及全景和激光点云网路发布等工作。

### 7.2.1 城市部件采集案例

利用车载移动测量系统，对宁波市东钱湖旅游度假区进行了城市部件普查测绘生产，对沿道路两侧的 7 大类 105 小类城市部件进行了空间坐标采集和属性调查，总面积 10.7 个平方公里，共采集城市部件 28000 余个。



图 7.9 东钱湖普查范围图

表 7.1 各类城市部件数量统计

大类划分	小类划分	小类普查数量	大类普查数量
公用设施	上水井盖	663	10603
	污水井盖	768	
	雨水箅子	1738	
	电力设施	1774	
	路灯	2164	
	监控电子眼	312	
	.....	.....	
道路交通设施	停车场	7	1876
	公交站亭	92	
	路名牌	113	
	交通标志牌	886	
	.....	.....	
市容环境	公共厕所	9	633
	垃圾箱	581	
	行道树	11499	
	.....	.....	
房屋土地	宣传栏	50	50
	人防工事		
	.....	.....	
其他设施	重大危险源	3	12
	工地	6	
	.....	.....	
扩展部件	公交站牌	117	3786
	沿街经营户	898	

外业采集的点云及全景影像数据经过预处理，利用点云数据处理成图软件，通过全景影像辅助，利用点云调查了大多数部件规格、材质、面积、内容等属性。

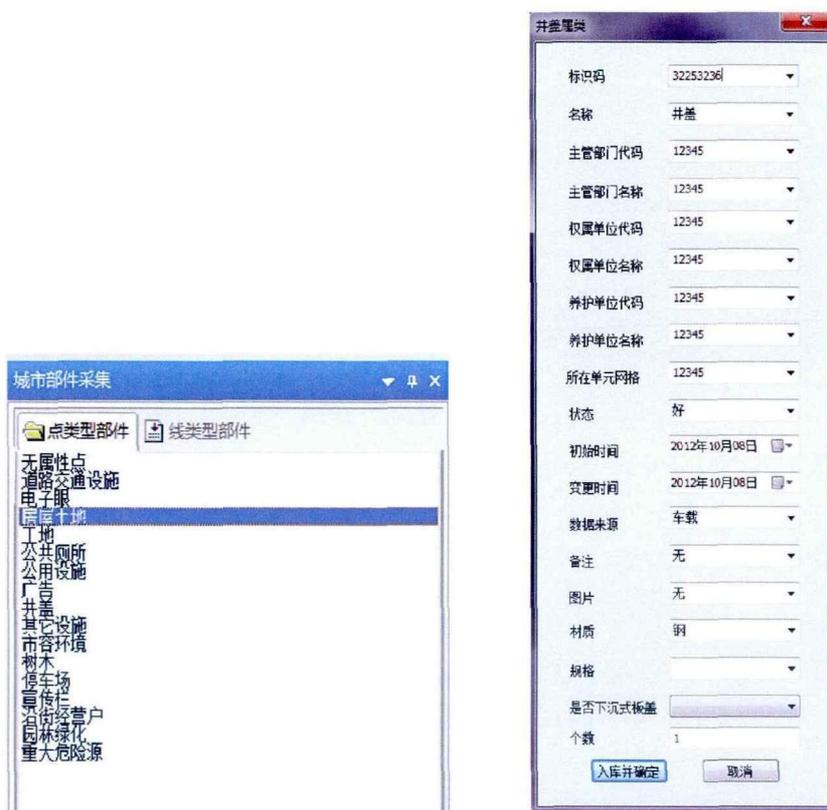


图 7.10 城市部件属性



图 7.11 坐标查询

按国家相关标准规范以及宁波市实际情况，城市部件的数学精度级别分为 3 类，即 A 类、B 类和 C 类，各精度级别的中误差及部件说明如表 7.2 所示：

表 7.2 城市部件数学精度级别

序号	精度级别	中误差	说明
1	A	$\leq \pm 0.5\text{m}$	空间位置或边界明确的部件，如井盖、路灯等
2	B	$\leq \pm 1.0\text{m}$	空间位置或边界较明确的部件，如果皮箱、绿地、亭、广告牌等
3	C	$\leq \pm 10.0\text{m}$	空间位置概略表达的部件，如桥梁、停车场等

全景影像清晰，色调、对比度和亮度等符合人的观看习惯，影像质量好，无明显的拼接误差或层次感。数据真实可靠，能够展现采集路段的风貌和特点，如图 7.12 所示。



图 7.12 全景影像

本项目总投入工作人员 4 人，外业工作时间 4 天，内业工作时间 15 天，项目劳动强度远远低于传统作业方式，工作效率则提升了至少 100%。

经项目检查，数学精度符合建设部城市部件管理要求，属性完整可靠，顺利通过项目验收。

基于车载移动测量系统的城市部件信息采集方案能快速、高效、高精度地采集城市部件的几何信息及纹理信息，同时使内业的属性数据录入等工作方便、快捷。

### 7.2.2 建筑竣工测量案例

利用车载移动测量系统，针对宁波市海曙区银润豪园商住楼盘进行了建筑竣工验收测量。本项目位于滨江大道以东，江东北路以西，民安路以北，通途路以南，南北长约 550 米，东西长约 200 米，总用地面积约 8.54 万平方米，总建筑面积约 34 万平方米（其中地上面积约 23 万平方米），容积率为 2.7，绿化率为 20%，建筑高度为 83.5 米。

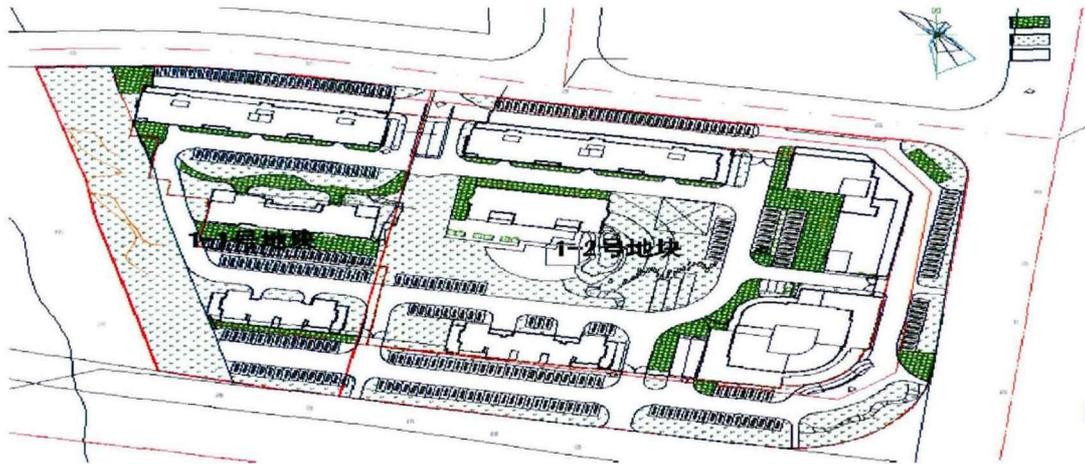


图 7.13 测区范围图

外业采集的点云及全景影像数据经过预处理，利用点云数据处理成图软件，通过全景影像辅助，直接在点云上进行建筑尺寸的测量、建筑竣工图绘制等，并结合 CAD 成图软件编制建筑竣工图。

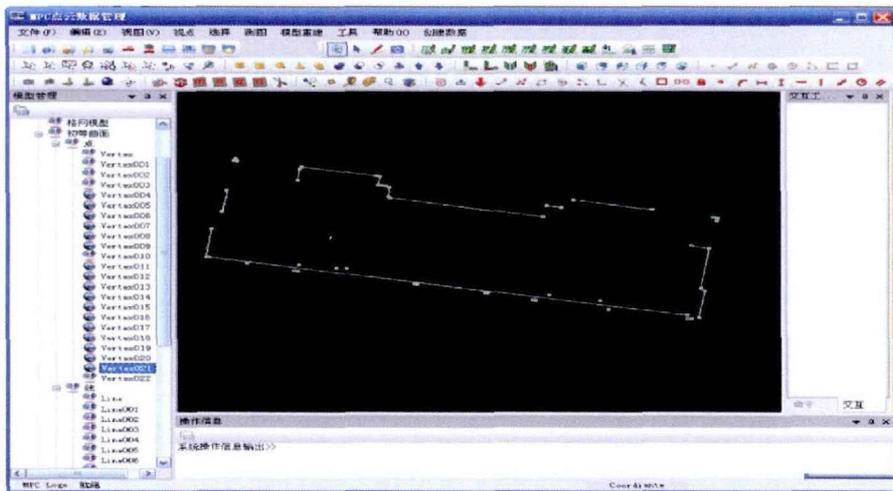


图 7.14 建筑轮廓线提取



图 7.15 建筑竣工原始点云与竣工图

本项目一级检查的内业抽检比例为 100%。平面坐标检测一类地物点 21 个，点位中误差为 $\pm 2.1\text{cm}$  ( $\leq \pm 5\text{cm}$ )；二类地物点 16 个，点位中误差为 $\pm 2.0\text{cm}$  ( $\leq \pm 7.5\text{cm}$ )；三类地物点 30 个，点位中误差为 $\pm 7.2\text{cm}$  ( $\leq \pm 20.0\text{cm}$ )其精度统计详见表 7.3~表 7.5。检查结果符合设计要求，并对检查发现的问题进行了整改。

表 7.3 平面坐标误差分布统计

地物点类别	检测点数	误差分布区间及比例						中误差 (cm)
		$0 \sim m_{\text{中}}$	%	$m_{\text{中}} \sim 2m_{\text{中}}$	%	$> 2m_{\text{中}}$	%	
一类	21	8	38.1	11	52.4	2	9.5	$\pm 2.1$

表 7.4 平面坐标误差分布统计

地物点类别	检测点数	误差分布区间及比例						中误差 (cm)
		$0 \sim m_{\text{中}}$	%	$m_{\text{中}} \sim 2m_{\text{中}}$	%	$> 2m_{\text{中}}$	%	
二类	16	6	37.5	8	50.0	2	12.5	$\pm 2.0$

表 7.5 平面坐标误差分布统计

地物点类别	检测点数	误差分布区间及比例						中误差 (cm)
		$0 \sim m_{\text{中}}$	%	$m_{\text{中}} \sim 2m_{\text{中}}$	%	$> 2m_{\text{中}}$	%	
三类	30	7	23.3	20	66.7	3	12.5	$\pm 7.2$

注：以上中误差按公式 $m_{\text{中}} = \pm \sqrt{[\Delta\Delta]/2n}$ 计算，其中 $\Delta$ 为成果数据与检测数据的较差， $n$ 为抽样点数。

针对宁波市海曙区银润豪园商住楼盘进行的建筑竣工验收测量，项目共计作业人员 4 人，外业耗时 1.5 个工作日，内业成图约 3 个工作日，数学精度与常规测量方式相近，规划指标量算更新准确直观，作业效果十分良好。

### 7.2.3 道路竣工测量案例

利用车载移动测量系统，针对宁波市海曙区中心的环城西路约 8 公里城市道路进行了道路竣工验收测量。本项目道路总长约 6.8KM，最窄处约为 44m，最宽处约为 54m，竣工测量面积约为 665000m<sup>2</sup>。

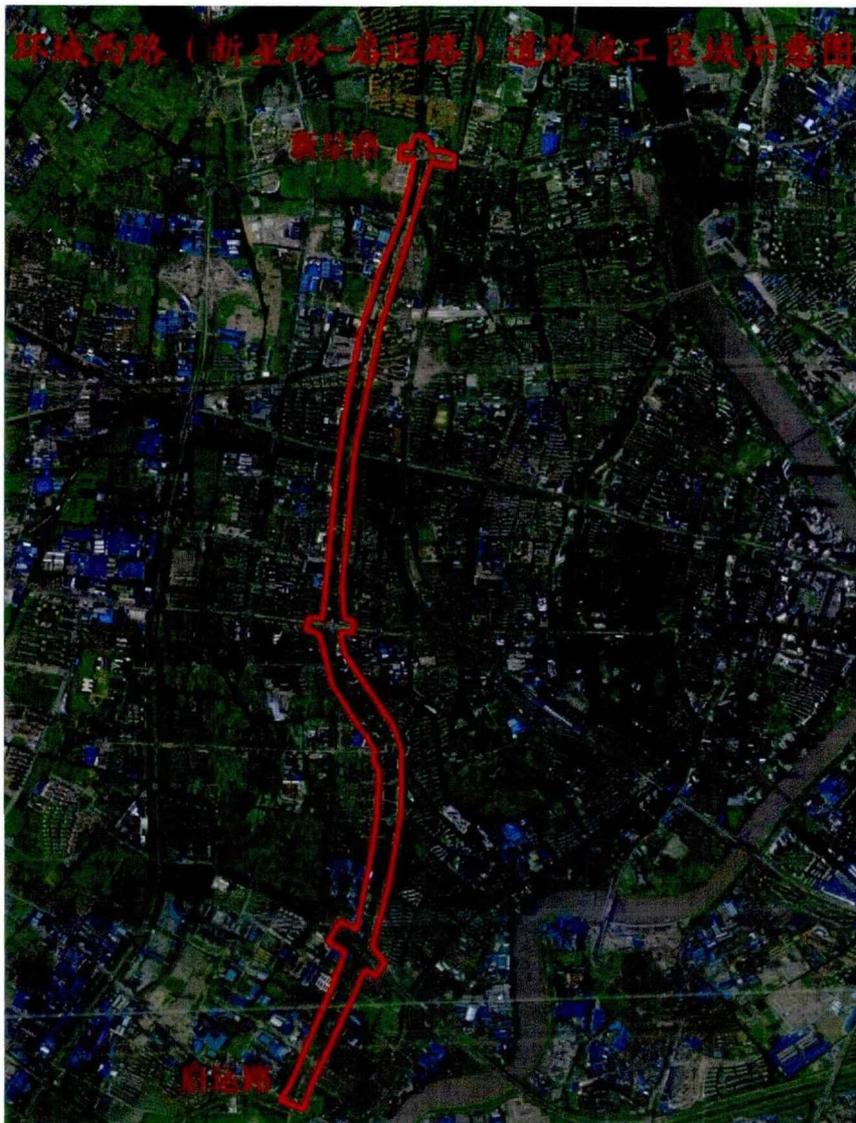


图 7.16 道路竣工测量测区范围图

外业采集的点云及全景影像数据经过预处理，利用点云数据处理成图软件，通过全景影像辅助，直接在点云上进行道路边线测量、道路竣工图绘制等，并结合 CAD 成图软件编制道路竣工图。

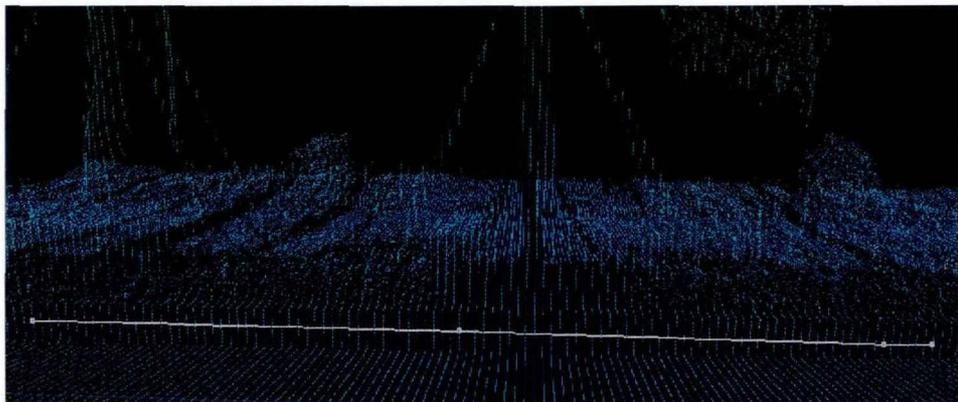


图 7.17 道路边线绘制

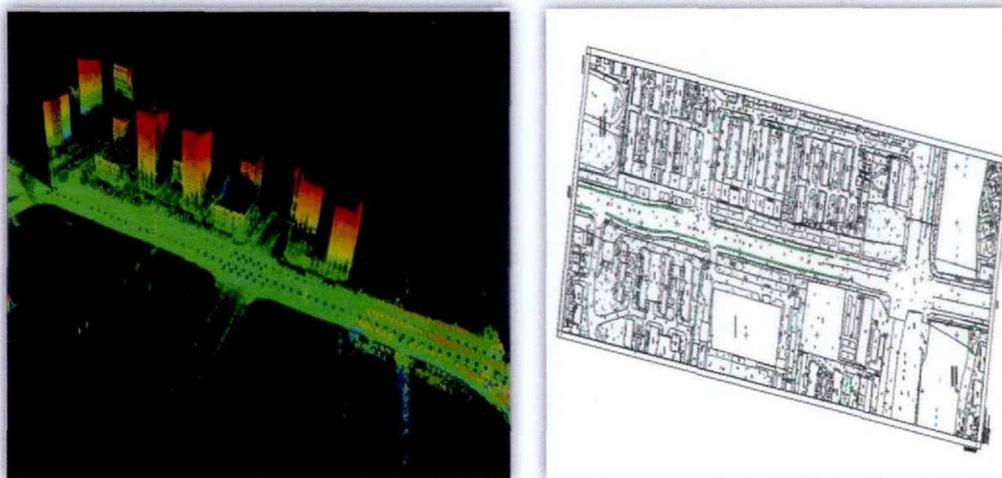


图 7.18 道路竣工原始点云与竣工图

本项目一级检查的内业抽检比例为 100%。平面坐标检测的道路长度为 1.5km，占比 22%，计 159 个三类地物点，依此计算的点位中误差为±11.0cm（≤±25cm）；高程检测的道路长度为 1.5km，占比 22%，计 78 个高程点，依此计算的高程中误差为±6.6cm（≤±15cm）。其精度统计详见表 7.6～表 7.7。检查结果符合设计要求，并对检查发现的问题进行了整改。

表 7.6 平面坐标误差分布统计

地物点类别	检测点数	误差分布区间及比例						
		$0 \sim m_{\text{中}}$	%	$m_{\text{中}} \sim 2m_{\text{中}}$	%	$> 2m_{\text{中}}$	%	中误差 (cm)

地物点类别	检测点数	误差分布区间及比例						中误差 (cm)
		$0 \sim m_{\text{中}}$	%	$m_{\text{中}} \sim 2m_{\text{中}}$	%	$>2m_{\text{中}}$	%	
三类	159	147	92.5	11	6.9	1	0.6	$\pm 11.0$

表 7.7 高程误差分布统计表

高程类别	检测点数	误差分布区间及比例						中误差 (cm)
		$0 \sim m_{\text{中}}$	%	$m_{\text{中}} \sim 2m_{\text{中}}$	%	$>2m_{\text{中}}$	%	
平地	78	73	93.6	5	6.4	0	0	$\pm 6.6$

注：以上中误差按公式  $m_{\text{中}} = \pm \sqrt{[\Delta\Delta]/2n}$  计算，其中  $\Delta$  为成果数据与检测数据的较差， $n$  为抽样点数。

相对于传统全站仪—棱镜杆的测量模式，车载方式没有控制测量阶段，参与人数仅 3 人，外业时间 2 小时，总体工作时间节省 65%，可以避免大多数遮挡情形，并检查了路面裂痕和坑洼情况，获得了良好效果。

针对宁波市海曙区中心的环城西路约 8 公里城市道路进行的道路竣工验收测量，数学精度和数据质量良好，能够在一定程度上解决传统方法野外采集点位稀少、点位精度差的问题。

### 7.2.4 城市三维建模案例

利用车载激光扫描与全景成像城市测量系统对某化工园和某宁波小区进行了三维数据采集和三维模型重建工作。

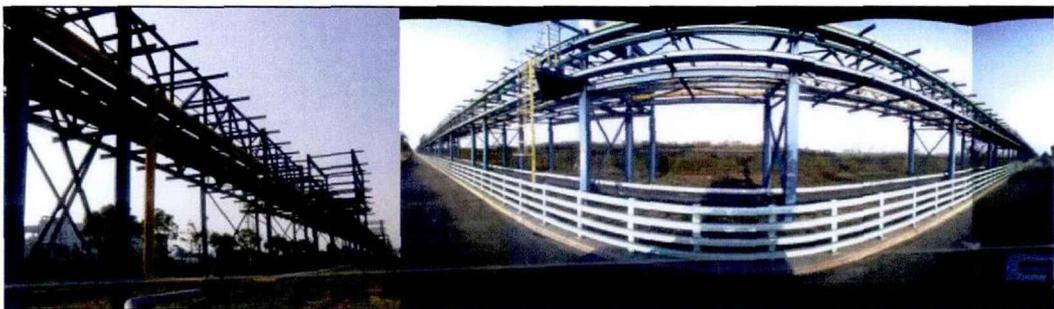


图 7.19 化工园内管线设备的数据采集（左：现场图，右：全景图像）

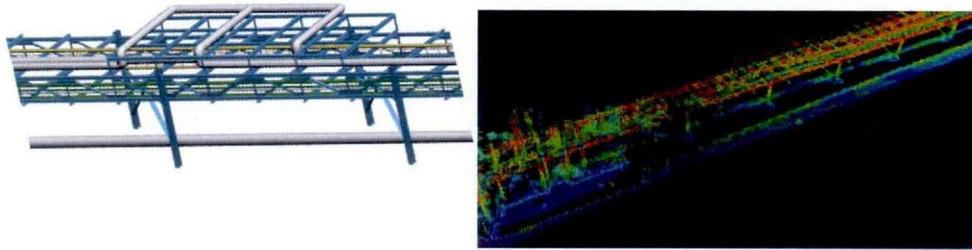


图 7.20 化工园内管线设备三维建模（左：管线三维模型，右：管线点云）

在建筑三维建模中，采用的流程是：导入点云->对点云切片绘制墙体轮廓->建立每层的建筑单层白模->绘制窗户阳台等突出形体->模型导入 3DSMax->在 3DSMax 中修饰模型->导入纠正后的纹理影像->模型贴图->完成建模。

由于三维建模和贴图过程非常复杂，需要把握的细节和技巧非常多，因此点云和全景处理软件所提供的建模功能是建筑主要框架和主要结构的构建。后续的工作还需要在专业软件中完成。如下图：



图 7.21 建筑的带颜色渲染的点云

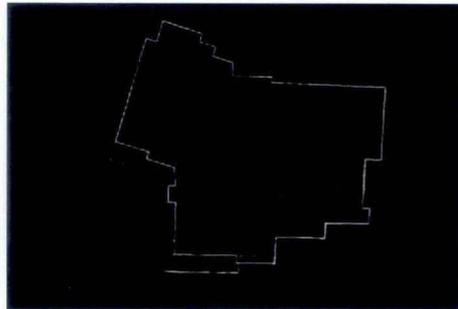


图 7.22 建筑楼层切片点云

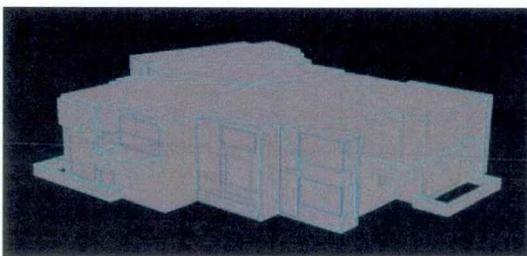


图 7.23 白模导入 3DSMAX

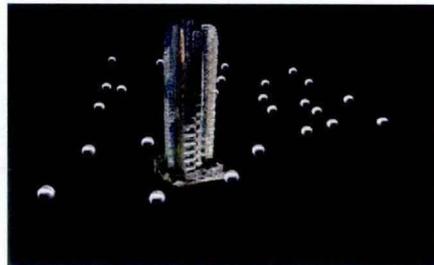


图 7.24 导入全景影像纠正纹理

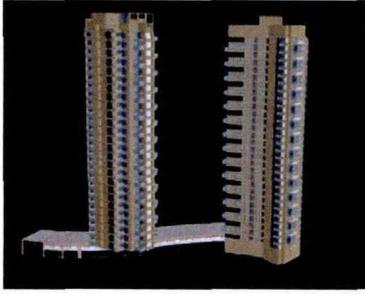


图 7.25 完成的三维模型

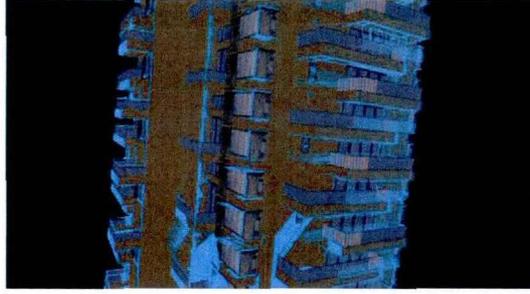


图 7.26 点云与模型套合

即便如此在用点云建立建筑的框架和结构也是非常重要的，能保证模型的精确性，如图 7.26 中，基于点云建立的三维模型具有良好的精度，与原始点云套合很好。

### 7.2.5 全景网络发布案例

利用车载移动测量系统，完成西安市全景影像及三维激光数据采集，为全景在线发布提供高分辨率、高色彩还原性的全景影像及高精度的激光点云。本项目采集范围为三环以内，全长约 3235 千米，其中，二环内道路街景数据（包含二环）约 85.18 千米，包含面积约为 86.3 平方千米，二环至三环之间街景数据（包含三环）约 2384 千米。

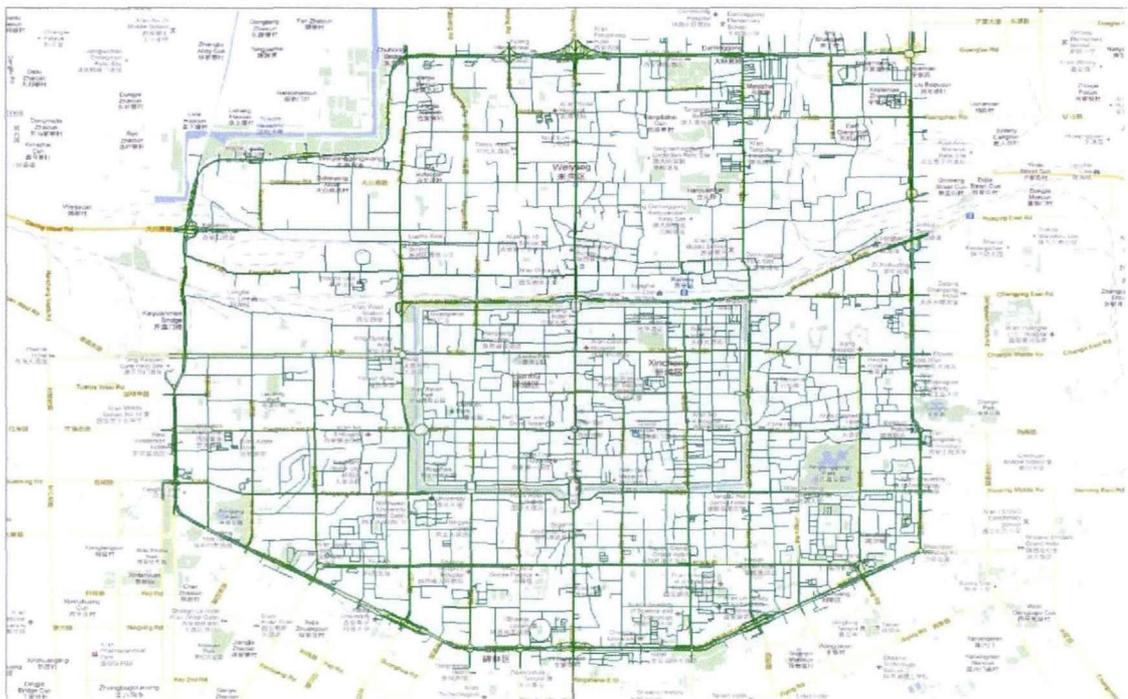


图 7.27 二环内道路采集范围

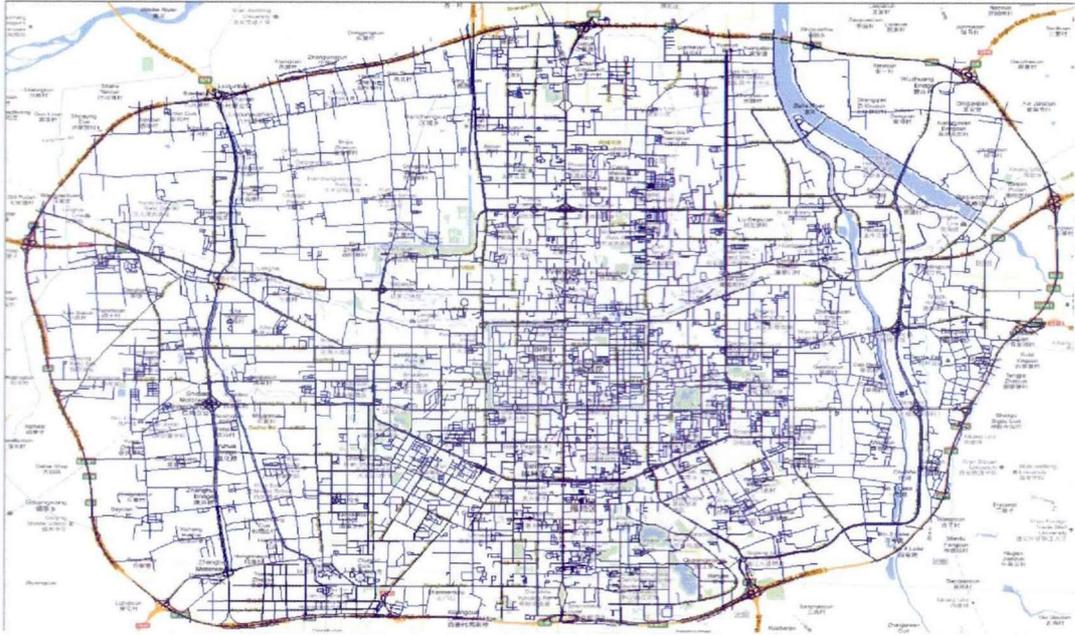


图 7.28 二环至三环内道路采集范围

全景在线发布能够为用户提供准确、清晰、逼真的在线地图服务，人的环境视角在地图浏览中真正实现相同体验的再现，为用户提供更加真实准确、更富画面细节的虚拟地理环境服务，在网络上发布与共享的全景数据效果如下：



图 7.29 高分辨率全景发布的界面

从图 7.29 可以看出，全景影像清晰，色调、对比度和亮度等符合人的观看习惯，影像质量良好，无明显的拼接误差或层次感。数据真实可靠，能够展现采集路段的风貌和特点。

车载移动测量系统能够采集丰富的地理信息，并能在网络上发布与共享全景数据（融合激光数据），提升了基于激光扫描仪与影像的地理信息的价值。

### 7.3 本章小结

本章介绍了车载移动测量系统的软、硬件研究成果以及集成不同类型和功能传感器的车载移动测量系统的工程化应用案例，并给出了案例项目的检查验收结果。工程实践证明，车载激光扫描与全景成像城市测量系统测量精度达到城市测量要求，具有极高的生产效率和良好的实用性。

## 第8章 总结与展望

### 8.1 研究工作总结

本论文从理论到实践对车载移动测量系统进行了深入研究，重点阐述了三维激光扫描技术、全景成像技术、GPS/IMU 组合定位定姿技术、车载多传感器实时同步数据采集技术、车载移动测量系统整体标定技术等集成关键技术，然后通过项目实践验证了系统的工程实用性。本论文是本人近年来的车载移动测量技术研究的归纳，研究工作总结如下：

(1) 调查研究了国内外车载移动测量系统的发展现状，分析了车载移动测量系统的技术支撑和系统模式，提出了构建面向城市测量和面向空间信息采集与发布的车载系统集成研究目标。

(2) 在分析车载移动测量系统的体系构架的基础上，本论文对车载系统的核心支撑设备和关键技术进行了论述，设计了面向城市测量、面向空间信息采集与发布及基于立体影像的移动测量系统硬件集成方案和软件集成方案，并在研究中完成了对应系统的构建，实际系统的有效运行证明本论文中系统的软硬件设计方案确实可行。

(3) 多传感器实时同步的数据获取是车载系统核心问题，本论文详细分析了 GPS 时空特性、多传感器的时空特性和各种传感器同步控制方法，提出了同步 GPS 同步时钟控制原理，并基于此设计了车载同步控制器硬件，设计并实施了整个系统的时空同步控制及同步数据采集方案。

(4) DGPS/INS 组合定位定姿系统是车载系统中的关键设备，本论文介绍了 DGPS/INS 组合定位定姿的基本原理，并就 DGPS/INS 不同解算方法、不同精度惯性测量单元和不同基线距离下定位定姿精度做了深入的实验和分析，实验结果对车载移动测量系统中 DGPS/INS 的应用有重要的指导作用。

(5) 车载移动测量的核心功能是三维测量，本文分析并给出了基于立体影像的三维相对测量和绝对测量模型；研究了基于线扫描模式的车载激光扫描的工作原理、定位原理及点云重建模型。开发了立体图像测量软件和激光点云处理软件，应用证明了论文中的立体图像和激光扫描三维测量模型正确有效。

(6) 全景成像技术的出现，改变了真实世界在计算机中的展示方式。目前商业的全景成像设备不能完全满足城市测量研究的要求，本论文阐述了全景采集系统的成像原理，重点研究了面阵拼接全景影像生成的原理和算法流程，研发了具有自主知识产权的全景成像系统，为面向空间信息采集与发布系统提供了高分辨率和高色彩真实性的全景影像。

(7) 多传感器系统整体标定技术研究是移动测量系统获得良好测量精度的重要保证, 本论文研究并提出了立体影像测量系统标定模型、2D/3D 一体化扫描仪标定模型、2D 道路面扫描仪标定模型及全景影像采集系统和激光扫描系统的内外标定模型。利用建立的室内外高精度的标定场, 按照本论文提出的标定流程, 实现了车载三维测量系统的高精度标定和全景影像与车载点云的高精度配准。系统精度经第三方检验, 动态测量精度满足国家城市测量规范精度要求, 动静态测量精度达到了浙江省 1:500 及以上数字地形图测量规范精度要求。

基于上面的专题研究和实践, 本论文及相关的研究项目构建了面向城市测量的移动测量系统、面向空间信息采集与发布的移动测量系统和基于立体影像的移动测量系统, 研究并解决了车载移动测量系统硬件集成、车载多传感器实时同步数据采集、DGPS/INS 组合定位定姿、车载立体影像三维测量模型、车载激光扫描测量模型、全景成像集成及车载系统的整体标定等关键技术。

论文研究的面向城市测量的移动测量系统和面向空间信息采集与发布的移动测量系统及应用成果已经分别通过宁波市规划局和国家测绘地理信息局的科技成果鉴定。通过上述移动测量实际工程中的应用也证明, 本论文研究成果达到了预期目标。

## 8.2 未来研究展望

车载多传感器集成移动测量系统是数字图像传感技术、惯性组合定位定姿技术、激光扫描技术和全景成像技术等发展与结合的产物, 它所涉及的理论、技术、方法与装备都是当前信息技术发展的同步。它不仅需要已有的理论和实践作为支撑, 同时还需从更高层次来研究一体化系统集成和应用最新的理论、技术和装备, 从而全面推进城市测绘技术变革和生产方式转型, 促进测绘科技进步。从地理空间信息服务的国际发展趋势来看, 其服务应用的深度和广度在不断扩大, 对地理空间信息服务数据的采集、生产和更新提出越来越高的要求。事实上, 包含更多信息的、可高精度测量的近景影像资料是未来 GIS 所不可或缺的[李德仁 2006]。

本论文在研究过程中尽管解决了车载移动测量系统硬件及软件集成、车载多传感器实时同步数据采集、DGPS/INS 组合定位定姿、车载立体影像三维测量模型、车载激光扫描测量模型、全景成像集成及车载系统的整体标定等关键技术, 并且研究的系列移动测量系统实际生产中得到良好的应用, 但还存在一些需要进一步研究的问题。

(1) DGPS/INS 的定位与定姿精度直接决定了系统的最终精度。为提高系统精度, 选用更高性能的 DGPS/INS 是一个最直接的选择。然而高性能的定位

定姿系统会导致构建成本高昂，从而影响车载移动测量系统的普及。本论文在研究过程中已经注意到：可以通过外部控制点提高 DGPS/INS 在卫星信号不太好的地区提高定位定姿精度的可能性，但由于时间和条件的限制，论文没有针对此问题做深入的研究和试验。在下一步工作中，将研究进一步提高系统精度的方法。

(2) 提高集成数据处理自动化水平。在论文的研究过程中，尽管已经开发完成一套以激光点云与全景影像综合数据处理为核心的移动城市测量工程化应用软件，但软件在测量和成图过程中数据处理的自动化水平还有待进一步提高，尤其是城市三维建模模块。在以后的开发研究工作中，将激光点云与全景影像综合数据处理软件同商业的三维建模软件相结合，提高三维建模的效率。

(3) 激光点云和全景影像的网络发布。在面向空间信息采集与发布的已从移动测量系统研究中，初步建立了海量车载移动测量数据的发布系统，并在西安和苏州两个城市实验区取得了成功。但目前来看，还需要进一步研讨激光点云和全景图像数据在网络中数据融合发布方法和面向公众/行业数据利用模式，提高数据发布的一体化程度，向公众和专业用户提供便捷的数据挖掘手段。

(4) 车载移动测量系统能够发挥巨大的作用和提升生产效率，还在于是否具有一套完善的激光点云与全景影像综合处理软件，该综合处理软件用于数据处理、管理、展示、测量成图等。本论文只涉及到车载移动测量系统的集成、同步控制、全景生成、系统标定和数据的预处理等，激光点云与全景影像综合处理软件由团队的其他成员研究、开发并撰写相关的文献。

本论文研究成果中的车载激光扫描与全景成像城市测量系统是国内首款基于激光扫描和全景成像的动静态一体化城市空间信息快速获取系统，实现了集二、三维地理信息和影像于一体的测绘新服务模式，为测绘作业提供了一整套便捷高效的静动态一体化解决方案，突破了常规城市测绘的人力与设备框架，领先于国内绝大多数城市测量技术手段，达到了国外同类产品的先进水平。

本论文的车载城市测量系统建设成果，是形成新的测绘高端技术装备的基础。在车载城市测绘测量软硬件系统的基础上，将以系统中单独软件、硬件模块（如全景相机、同步控制单元、激光点云与全景综合处理软件）或高端集成成套的装备的形式提供给行业内外用户，测绘高端技术装备推广应用将带来良好的经济效益。

## 参考文献

1. [3D Laser Mapping 2012] 3D Laser Mapping, 2012, <http://www.3dlasermapping.com>.
2. [Baker 1998] Baker S., Nayar S.K(1998). A theory of catadioptric image formation.IEEE Proceedings of ICCV. 35-42 2000. 506~513.
3. [Boulton 1998] Remote reality via omnidirectional imaging[C]. In:Proceedings of DARPA Image Understanding Workshop. 1049-1052.
4. [C T Kelley 1999] C.T. Kelley (1999). Iterative Methods for Optimization. SIAM Press, Philadelphia.
5. [Chatfield 1997] Chatfield.Foundmental of high accuracy inertial navigation[M]. 1997. USA: The American Institute of Aeronautics and Astronautics.
6. [Chen,Changjun 2009] Chen Changjun , Liu Yong, Mao Qingzhou, Wang Gang. Stereo cameras calibration for vehicle based multi-sensors integrated system. Yichang,China: 6th International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition, 2009, 74961P1-P8.
7. [ChenZhiyong 2004] ChenZhiyong, HuQingwu, SunHongxing, ChenChangjun. Accuracy Analysis of LD2000-RH.MMT2004, Kunming,2004,131(1-7) 304~312.
8. [Coleord 1989] Coleord(1989).Using fisheye lens for GPS site reconnaissance[J]. Journal of Surveying Engineering. 115(3):347-352.
9. [ConleyR 2000] ConleyR, LavrakasJW. Global Implicationson the Removalof Selective Availability. Proceedings of the 2000 IEEE Position Location and Navigation Symposium. SanDie(USA): The Institution of Navigation, Vol.45, No.4, pp.275-285.
10. [Crossley 1994] Crossley P. Futureof the Global Positioning System in Power Systems. IEE Colloquiumon Developments in the Use ofGlobal Positioning Systems. London (UK): 1994. 7?1~7?5.
11. [David G.Lowe 2009] David G.Lowe (2009). Object recognition from local scale-invariant features.International Conference on Computer Vision, 3(1):1150-1157.
12. [David Lowe 2004] David Lowe(2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 60(2): 91-110.

13. [Earthmine 2009] Earthmine, 2009, <http://www.earthmine.com>.
14. [El-Sheimy 1999] El-Sheimy, N., Schwarz, K.P.(1999). Navigation Urban Areas by VISAT-A Mobile Mapping System Integrating GPS/INS/Digital Cameras for GIS Applications. *Navigation:Journal*.
15. [FARO 2011] Faro focus 3D Automation interface manual. [www.faro.com](http://www.faro.com),2011].
16. [G.Fangi 2007] G.Fangi(2007). The Multi-image spherical Panoramas as a tool for Architectural Survey[C]. *s of the ACM*, 24(6): 381-395.
17. [G.Fangi 2009] G.Fangi(2009). Further developments of the Spherical Photogrammetry for cultural heritage[C]. 22nd CIPA SymPosiuxn, October 11-15,Kyoto, Japan.1-6.
18. [George V 2010] George V, Hans G M. Airborne and Terrestrial Laser Scanning[M]. 2010, UK:CRC Press.
19. [Herbert 1987] Area Projections of fisheye Photographic lenses[J]. *Agricultural and Forest Metrology*.39(2-3):25-223.
20. [HeSaixian 2004] HeSaixian, LiDeren, ZhongSidong, HeDuiyana, ChenChangjun. A PORTABLE 3D MEASURING SYSTEM. MMT2004, Kunming, 2004, 131(1-3).
21. [Huijing Zhao 2008] Huijing Zhao An efficient extrinsic calibration of a multiple laser scanners and cameras' sensor system on a mobile platform.
22. [I.Wald 2006] I.Wald and V.Havran (2006). On building fast kd-trees for ray tracing, and on doing that in  $O(N\log N)$ . *IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing*, pp.61-69.
23. [ImmersiveMedia 2013] Dodeca.<http://immersivemedia.com/products/#cameras>. 2013-01-12.
24. [Jafar Amiri Parian 2010] Jafar Amiri Parian, Annin Gruena(2010). Sensor modeling, self-calibration and accuracy testing of Panoramic cameras and laser scanners[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry*.
25. [John Ristevski 2010] John Ristevski, Jaechoon Chon, Michael Prados, Ching Ming Wang, earthmine MARS Technology White Paper.
26. [K.Madsen 2004] K.Madsen, H.B.Nielsen and O.Tingleff(2004). Methods for Non-Linear Least Squares Problems. Technical University of Denmark.
27. [Kukko 2007] Kukko A, Andrei C.-O,Salminen V.-M,Kaartinen H,Chen Y, Rönholm P. Hyypä H, Hyypä J, Chen R,Haggrén H, Kosonen I, Çapek K. (2007) Road environment mapping system of the Finnish Geodetic Institute – FGI

- Roamer, Proc. Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, IAPRS Vol. 36 Part 3/W52, pp. 241–247..
28. [Leador 2013]Leador, 2013, <http://www.leador.com.cn/>.
  29. [LewandowskiW 1993] LewandowskiW, Petit G, ThomasC. Precision and Accuracy of GPS Time Transfer. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1993, 42(2): 474~479.
  30. [M.A.Fischler 1981] M.A.Fischler and R.C.Bolles (1981). Random sample consensus: A paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography [J].Communication.
  31. [Matthew Brown 2007] Matthew Brown, David G. Lowe(2007). Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features [J]. International Journal of Computer Vision. 74 (1): 59-73.
  32. [MOTOROLA 2002]] MOTOROLA. M12 +TIMING ONCORE RECEIVER. [www.motorola.com/gps,2002](http://www.motorola.com/gps,2002).
  33. [Nielsen 2005] Surround video:Amultihead camera appraoeh[J]. The visual computer.21(1-2): 92-103.
  34. [NovAtel 2009] NovAtel. DL-V3 User Manual. [www.novatel.com](http://www.novatel.com), 2009.
  35. [NovAtel 2010] NovAtel. SPAN-CPT Integrated GPS/INS Receiver. [www.novatel.com](http://www.novatel.com), 2010.
  36. [NovAtel 2011]NovAtel.SpanSE/FSAS User Manual. [www.novatel.com](http://www.novatel.com), 2011.
  37. [PointGrey 2012] PointGrey(2012). Ladybug3 360°Video Camera , [http://www.ptgrey.com/products/ladybug3/ladybug3\\_360\\_video\\_camera.asp](http://www.ptgrey.com/products/ladybug3/ladybug3_360_video_camera.asp), 2012-09-12.
  38. [R.Szeliski 1993] R.Szeliski(1993). Rapid Octree Construction from Image Sequences. Computer Vision, Graphics and Image Proeessing. 58(1): 23-32 and Remote Sensing, 65(1):60-76.
  39. [Rauch 1965] Rauch,H.E.; Tung,F.; Striebel, C.T.Maximum likelihood estimatesof linear dynamic systems.AIAAJ. 1965, 3, 1445-1450.
  40. [Riegl 2009] Riegl. 2D Laser scanner LMS-Q120i General Description and data interface. [www.riegl.com](http://www.riegl.com), 2009.
  41. [Riegl 2010] Riegl. 3D Terrestrial Laser Scanner RIEGL VZ-400 General Description and data interface. [www.riegl.com](http://www.riegl.com), 2010.

42. [Schwarz,K.P 1993] Schwarz,K.P., El-Sheimy, Naser.(1993). VISAT-A mobile high-way survey system of high accuracy. Proceedings of 93'VNIS Conference, Ottawa, Oct.1993.
43. [Shum H Y.He LW 1999] Shum H Y.He LW(1999) .Rendering with concentric mosaics[C]. Computer Graphics, ACM Siggraph.299-236 ition(CVPR 1997), Puem Rioo.237-243.
44. [Slater Dan 2010] Slater Dan(2010). Using the 6mm Nikon fisheye lens with the Nikon DI camera[EB/OL]. <http://www.nearfield-com/dall/Photo/Wide/fish/>.
45. [Szeliski R 1995] Szeliski R, Kang S B(1995). Direct Methods for Visual Scene Reconstruction[C]. IEEE Workshop on Representation of Visual Scenes, Cambridge, MA.26-33.
46. [Sandy Kennedy 2008] Sandy Kennedy . GPS/INS Integration with the iMAR-FSAS IMU.
47. [u-blox 2009] u-blox. LEA -6 u- blox 6 GPS Modules Data Sheet. [www.u-blox.com](http://www.u-blox.com), 2009.
48. [u-blox 2008]u-blox. LEA-4R / TIM-4R ANTARIS 4 GPS Receiver Modules with Dead Reckoning. [www.u-blox.com](http://www.u-blox.com), 2008.
49. [u-blox 2010]u-blox. LEA-6T u-blox GPS receiver with Precision Timing. [www.u-blox.com](http://www.u-blox.com), 2010.
50. [WeissM 1997] WeissM, ZhangV, NelsonL, et al. Delay Variations in Some GPS Timing Receivers. Proceedings of the 1997 IEEE International Frequency Control Symposium. Orlando (USA):1997.
51. [Wikipedia 2013] Wikipedia (2013). K-d\_tree. [http://en.wikipedia.org/wiki/K-d\\_tree](http://en.wikipedia.org/wiki/K-d_tree). 2012-06-14.
52. [Xiong Yalin 1997] Xiong Yalin, TurkowskiKen(1997). Creating image-based VR using a self-calibrating fisheye lens[C]. In:Proceedings of 1997 Conference on Computer Vision and Patern Recogn.
53. [Zhengyou Zhang 2000] Zhengyou Zhang (2000). A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11): 1330-1334.
54. [Admin 2013]Admin.CCD 成像技术的发展趋势 [EB/OL]. [http://www.csn-tech.com/News\\_View.asp?id=195](http://www.csn-tech.com/News_View.asp?id=195), 2013-4-10.
55. [陈世同 2005] 陈世同.基于光纤陀螺的 SINS/GPS 组合导航系统研究及工程实现[D] 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2005,硕士论文.

56. [曹月玲 2008] 曹月玲.应用 SLR 对 LAGEOS 卫星精密定轨及测定地心运动 [D].上海: 同济大学土木工程学院, 2008: 9-12, 40-41.
57. [曾吉勇 2003] 曾吉勇,苏显渝.双曲面折反射全景成像系统[J].光学学报.2003,23(9):1138-1142.
58. [曾祥君,2003] 曾祥君,尹项根,林干,周延龄.晶振信号同步 GPS 信号产生高精度时钟的方法及实现 [J] .电力系统自动化,2003,27(8):49-54.
59. [程开富 2000] 程开富.CCD 图像传感器的市场及发展[J].国外电子元器件,2000,7: 3-4.
60. [邓松杰 2010] 邓松杰,周松斌,程韬波.利用鱼眼镜头生成全景图像的方法[J].工程图学学报.2010,31(1): 135-138.
61. [方鹏 2008] 方鹏.GPS/INS 组合导航与定位系统研究[D].上海:同济大学电子与信息工程学院,2008: 3,5.
62. [高厚磊 1995] 高厚磊,贺家李,江世芳.基于 GPS 的同步采样及在保护与控制中的应用 [J] .电网技术, 1995, 19(7): 30~32.
63. [高文武 2004] 高文武,贺赛先.基于 GPS 的 CCD 相机同步控制器 [J] . 武汉大学学报信息科学版,2004,29(8):744-746.
64. [关凤英 2006] 关凤英.差分 GPS 定位精度研究[J].林业资源管理, 2006,12(6).
65. [胡琳 2010] 胡琳.CCD 图像传感器的现状及未来发展[J].电子科技,2010,23 (6) :82.
66. [韩友美 2011] 韩友美.车载移动测量系统激光扫描仪和线阵相机的检校技术研究[D].济南:山东科技大学, 2011, 博士论文。
67. [蒋晶 22004] 蒋晶,刘同明.-种柱面全景图的生成算法[J].华东船舶工业学院学报.2004,18(4)PP:62-66.
68. [金婷婷 2012] 金婷婷.CCD 图像传感器的技术及发展[J].科学时代, 2012, (19) :3.
69. [寇玉民 2008] 寇玉民,盛宏,金祎,陈辉东. CCD 图像传感器发展与应用[J].器件与应用,2008,32 (4) :39.
70. [李德仁 2006] 李德仁.移动测量技术及其应用[J].地理空间信息,2006,4(4):2.
71. [李德仁 1992] 李德仁,郑肇葆. 解析摄影测量学[M].北京:测绘出版社,1992.
72. [李冠 2010] 李冠.VLBI 技术用于火星探测器定位的数学模型及参数研究[D].武汉:武汉大学, 2010:9-14, 16-19.
73. [刘帅 2011] 刘帅.面向陆地边界场景的三维建模方法研究[D].长沙:中南大学, 2011 博士论文.

74. [李学蓄 2004] 李学蓄.基于 GPS 授时的数据同步技术应用研究[J].信息技术, 2004 年 10 月(28).
75. [刘勇 2004] 刘勇.基于图像的空间三维数据获取及建模[D].武汉:武汉大学,2004,硕士论文.
76. [刘亚琼 2010] 刘亚琼.基于 IGS 系统的导航卫星自主定轨仿真计算[D].西安:中国科学院研究生院(国家授时中心), 2010, 硕士论文.
77. [李玉广 2009] 李玉广,朱福祥.获取舰船液舱数字表面模型的数字立体摄影测量方法[J].船舶设计通讯,2009(1):49-53.
78. [李云翔 2009] 李云翔.相机标定与三维重建技术研究[D].青岛.青岛大学.2009,硕士论文.
79. [李云伟 2007] 李云伟.全景图技术的研究[D].武汉, 华中科技大学, 2007, 硕士论文.
80. [李征航 2005] 李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理[A].武汉:武汉大学出版社, 2005.
81. [李征航 2010] 李征航, 魏二虎,王正涛,彭碧波.空间大地测量学[M].第一版. 武昌:武汉大学出版社, 2010 年 3 月:67-84, 104-154.
82. [马力广 2005] 马力广.地面三维激光扫描测量技术研究[D].武汉:武汉大学, 2005.
83. [宋爱群 2007] 宋爱群,黄元庆.CCD 图像传感器的应用技术与发展趋势[J]. 电子测量与仪器学报, 2007:301.
84. [苏连成 2006] 苏连成, 朱枫.一种新的全向立体视觉系统的设计[J].自动化学报.2006,32(1):67-72.
85. [苏莉 2010] 苏莉.立方体全景图的自标定及浏览算法[D].北京, 北京化工大学, 2010, 硕士论文.
86. [孙红星 2004] 孙红星.差分 GPS/INS 组合定位定姿及其在 MMS 中的应用 [D].武汉:武汉大学, 2004.
87. [孙苙 2007] 孙苙,杨金波.全景成像技术在地理信息数据集中的应用[C].// 中国全球定位系统技术应用协会第九次年会论文汇编.2007:241.
88. [孙树侠 1992] 孙树侠,张静.捷联式惯性导航系统[M].1992 年 10 月.第一版. 北京:国防工业出版社.
89. [汪嘉业 2001] 汪嘉业, 杨兴强, 张彩明.基于鱼镜头拍摄的图像生成漫游模型[J].系统仿真学报.2001,13(增刊):66-68.
90. [王潜心 2011] 王潜心,徐天河,许国昌.自适应换站算法及其在长距离机载 GPS 动态相对定位中的应用[J].测绘学报, 2011,40(4):429-434.

91. [王峥 2002] 王峥. 基于 GPS 的变电站内部时间同步方法 [J]. 电力系统自动化, 2002(4):36~40.
92. [王道义 1998] 王道义, 黄大为. 全景环形透镜原理与特点剖析[J]. 光学技术. 1998,(1):10-12.
93. [王潜心 2011] 王潜心. 自适应换站算法及其在长距离机载 GPS 动态相对定位中的应用[J]. 测绘学报, 2011,4(40): 429-434.
94. [王元虎 1998] 王元虎, 周东明. 卫星时钟在电网中应用的若干技术问题[J]. 中国电力, 1998, 31(2): 10~13.
95. [夏熙梅 2002] 夏熙梅. 差分 GPS 技术及其应用[J]. 情报科学, 2002(3):99-100.
96. [肖进丽 2007] 肖进丽, 潘正风, 黄声享. GPS/INS 组合导航系统时间同步方法研究. 测绘通报, 2007 (4) :27-30.
97. [徐胜 2007] 徐胜. 双 CPU 结构捷联导航数据处理系统硬件设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007, 硕士论文.
98. [肖潇 2007] 肖潇, 杨国光. 全景成像技术的现状和进展[J]. 光学仪器, 2007, 4 (29) :84-85.
99. [谢媛媛 2012] 谢媛媛. 三维激光扫描技术及其在测量领域的应用[J]. 价值工程, 2012, 31 (15) :209.
100. [杨云涛 2010] 杨云涛, 冯莹, 曹毓等. 基于 SURF 的序列图像快速拼接方法[J]. 计算机技术与发展. 2010, 21 (3):6-9.
101. [张欣 2009] 张欣. 全景拼接的关键技术研究. 哈尔滨工业大学. 2009. 硕士论文.
102. [朱智勤 2012] 朱智勤. COMPASS/INS 组合测量系统数据后处理技术研究 [D]. 武汉: 武汉大学测绘学院, 2012.
103. [张永军 2002] 张永军 张祖勋 等. 利用二维 DLT 及光束法平差进行数字摄像机标定[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2002, (6):566-572.
104. [张祖勋 2000] 张祖勋 张剑清. 数字摄影测量学[M] 武汉: 武汉大学出版社, 2000.

## 攻读博士学位期间发表的主要论文及成果

- [ 1]Chen,Changjun; Liu,Yong; Mao,Qingzhou;Wang,Gang. Stereo cameras calibration for vehicle based multi-sensors integrated system. MIPPR 2009 - Pattern Recognition and Computer Vision: 6th International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition(Yichang, China), 74961P, 2009.11 (EI 检索).
- [ 2]陈长军, 何耀华, 刘勇, 王刚, 车辆行驶跑偏在线数字图像测量方法[J],测绘科学, [已录用].
- [ 3]毛庆洲, 贺赛先, 陈长军, 然光环境下目标的快速提取方法研究[J], 武汉大学学报(信息科学版), 2006年1月, 第31卷, 第1期:63-65 (EI ).
- [ 4]毛庆洲, 李清泉, 陈长军, 刘勇, 铁路货车装载尺寸超限自动测量技术研究 [J], 光学仪器, 2007年10月, 第29卷, 第5期.
- [ 5]科技成果, 闫利, 陈长军, 关鸿亮, 车载空间信息采集系统及发布平台, 国家测绘地理信息局, 测科鉴字[2013]第1号, 2013年1月28日.(武汉大学/北京天下图数据技术有限公司).
- [ 6] 科技成果, 闫利, 陈长军, 陈为民, 车载激光扫描与全景成像城市测量系统, 宁波市规划局, 2013年3月29日.(武汉大学/宁波市测绘设计研究院).
- [ 7]实用新型专利, 陈长军 王刚 陈小宇, 一种车载同步控制器, 专利号:ZL 2013 2 0116050.7,2013.03.14.
- [ 8]实用新型专利, 陈长军 王刚 刘勇, 一种移动测量车顶平台, 专利号:ZL 2013 2 0130772.8,2013.03.14.
- [ 9]实用新型专利, 陈长军, 王刚, 关鸿亮, 基于激光扫描与全景测量的车载集成测量系统, 专利号:ZL 2012 2 0486578.9,2012.09.21; ZL 201 32 0116036.7, 2013.03.14.
- [10]实用新型专利, 陈长军, 王刚, 关鸿亮, 刘勇, 陈小宇, 全景图像采集装置, 专利号:ZL 2012 2 0492886.2,2012.09.21; ZL 2013 2 0130692.2, 2013.03.14.
- [11]实用新型专利, 王刚, 陈长军, 刘勇, 陈小宇, 汽车车轮脉冲采集装置, 专利号:ZL 2012 2 0486576.X,2012.09.21.

## 致谢

毕业论文的完成，代表了博士生涯的告一段落，回顾攻读博士期间的日子，有苦有甜，其中最让我铭记的是师友的关心和帮助。

首先我要感谢张祖勋院士、张剑清教授，能够成为他们门下的学生是我的荣幸，他们治学严谨、学识渊博、品德高尚、平易近人，在我的博士学习期间和科学研究过程中给予了无私的指导，让我受益终生，借此机会，我向两位张老师表示衷心的感谢。

其次我要感谢我的第二导师龚健雅院士，龚老师在我博士研究方向的确定，博士论文的选题、资料查询、开题、开展研究过程中，给予了悉心指导和帮助，在此，我向龚老师表示衷心的感谢。

感谢测绘学院的闫利教授在我博士期间和工作过程中所给予的无私帮助、鼓励和指导，闫老师广博的知识、忘我的工作精神和精益求精的科研态度让我感到由衷的敬佩，激励我在科学研究的道路上不断前进。

感谢南京师范大学的盛业华教授，盛老师的不断支持和专业上的指导让我在车载移动测量技术方面的研究不断深入并取得现在成果。

感谢宁波市测绘设计研究院的陈为民院长、聂倩博士、文学东所长和林昀等，他们在车载激光扫描与全景成像城市测量系统开发过程中，提供了大量的帮助，并在车载移动测量系统工程应用体系建设中做了大量重要的工作。

感谢北京天下图数据技术有限公司的董事长关鸿亮博士，他从我2004年在日本东京进行车载移动测量项目的开发开始，就给予大量的帮助。

感谢电子信息学院同事王刚老师、刘勇老师和陈晓宇博士，他们在我所参与或主持科研项目中，一直作为一个团队重要成员，并在不同的技术领域做了大量的重要的工作。

感谢测绘学院的同事邓非老师、詹总谦老师、刘异老师、张毅老师、朱惠萍老师、李妍老师、徐芳老师、郑莉老师、乔俊军老师和袁强强老师在我工作中给予的帮助。

最后感谢我的家人，多年来他们一直关心和照顾我的生活和健康。我常常忙于工作，几乎没有时间照顾家庭，是她们任劳任怨、默默奉献为我的工作和学习提供了动力和良好的环境。

毕业是新的开始，我将既有的工作和学习成果为基础，努力开拓进取，争取更大的成绩。