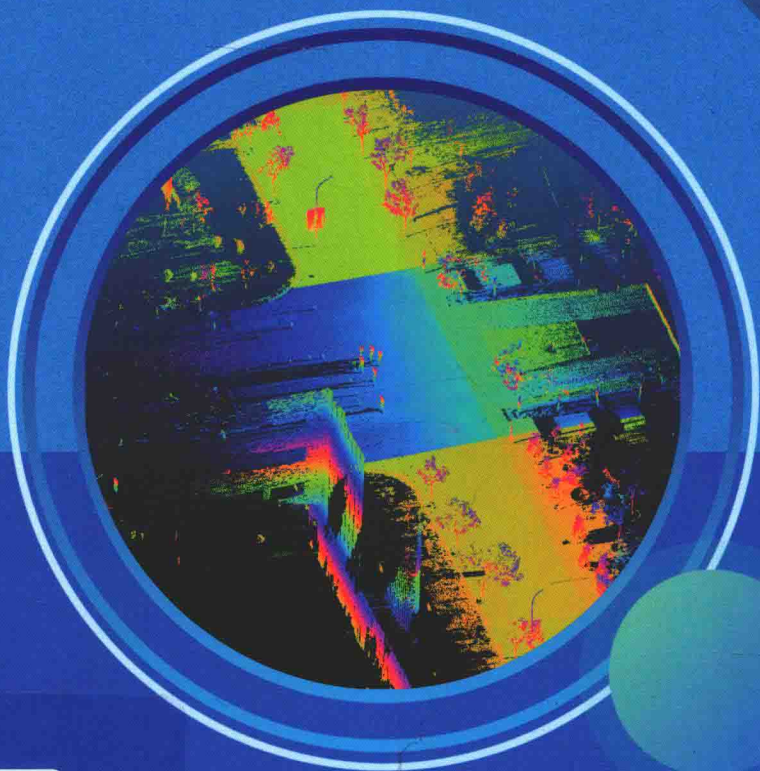




北京建筑大学学术著作出版基金资助出版

移动测量系统 设计原理与实现方法

郭 明 王 国 利
陈 才 黄 明 著



科学出版社

北京建筑大学学术著作出版基金资助出版

移动测量系统设计原理 与实现方法

郭 明 王国利 著
陈 才 黄 明



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书旨在阐述移动测量系统的设计原理与实现方法,以车载移动测量系统为例,首先介绍移动测量系统的理论基础,如数学模型、坐标系、坐标系之间的坐标转换和 GPS 时间系统,及其组成和工作原理;然后重点介绍 POS 数据处理、点云数据处理、车载移动测量系统的设计与集成、车载移动测量系统检校及测试。本书对移动测量系统的设计原理与实现方法做了详细的介绍,其实验过程及处理结果都较为具体,为移动测量系统的开发提供了较为有效的解决方案。

本书可作为地理信息工程、测绘工程、城市规划与管理、文化遗产与保护等学科领域的研究开发人员及相关专业教师、研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

移动测量系统设计原理与实现方法/郭明等著. —北京:科学出版社, 2018.1
ISBN 978-7-03-056128-2

I. ①移… II. ①郭… III. ①移动通信—应用—测量系统—系统设计
IV. ①P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 316156 号

责任编辑:王彦刚 杨 昕 / 责任校对:王万红
责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方人华平面设计部

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2018 年 1 月第一次印刷 印张: 8 1/4

字数: 166 000

定价: 56.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换《京华虎彩》)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135120-2021 (HF02)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

移动测量系统作为近几年来测绘行业领先的测量技术成为各行各业关注的对象，它以汽车、飞机、轮船作为遥感平台，在测区范围内无须控制点即可对整个测区进行成图或数据扫描。本书以车载移动测量系统为例，介绍了移动测量系统的实验过程及理论基础，深入浅出地讲解该系统的设计原理与实现方法，使读者读完本书后能对移动测量系统的设计原理与实现方法有深入的认识与了解。

全书共分8章，分为相对独立又相互呼应的三部分。第一部分（第1~3章）包括绪论、移动测量系统的理论基础及其组成和工作原理；第二部分（第4和5章）着重讲述移动测量系统的POS数据处理和点云数据处理；第三部分（第6~8章）对车载移动测量系统的设计与集成进行讲述，并对系统检校与系统测试进行讲解与说明。

参与本书撰写的还有郭可才、罗德安、赵江洪、危双丰、申兴旺、吴桂凯、潘伟利、董叔壮、周腾飞、高楚天、邵天翼。本书是国家重点研发计划项目（项目编号：2017YFB0503702）、国家自然科学基金项目（项目编号：70601013、41301429、40871196）、北京市自然科学基金资助项目（项目编号：4144071、8172016）、北京未来城市设计高精尖创新中心科研项目（项目编号：UDC2016050100、UDC2016030300）、北京市优秀人才培养资助青年骨干个人项目（项目编号：2014000020124G052）、国家测绘地理信息局公益性项目（项目编号：201512009）、国家测绘地理信息局科技计划项目（项目编号：2013CHG15）、现代城市测绘国家测绘地理信息局重点实验室开放研究课题项目（项目编号：20141203NY）、北京市教育委员会科技发展计划面上项目（项目编号：KM201510016016）、北京建筑大学科研基金项目（项目编号：KYJJ2017024、331614023、331613004）的研究成果。本书得到了北京建筑大学学术著作出版基金资助出版，在此一并表示衷心的感谢。

本书阐述的各类方法与关键算法为移动测量系统的研究应用提供了有效支撑，希望能抛砖引玉，引起各位专家学者的深入研究。由于学识和时间的限制，书中的不妥之处在所难免，敬请各位专家、读者批评指正！

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 移动测量系统的理论基础	4
2.1 移动测量的数学模型	4
2.1.1 物方模型	4
2.1.2 激光点云的地面点坐标计算	6
2.2 移动测量定义的坐标系	7
2.2.1 载体框架坐标系	7
2.2.2 辅助传感器坐标系	9
2.2.3 与惯性导航计算相关的坐标系	9
2.2.4 与基准转换相关的坐标系	10
2.2.5 摄影测量坐标系	11
2.2.6 激光扫描仪坐标系	12
2.3 坐标系之间的坐标变换	13
2.3.1 与 IMU 传感器相关的坐标变换	13
2.3.2 与像片相关的坐标变换	17
2.3.3 与激光扫描仪相关的坐标变换	18
2.3.4 与基准转换相关的坐标变换	20
2.4 GPS 时间系统	20
第 3 章 移动测量系统的组成和工作原理	23
3.1 GPS 的组成和工作原理	23
3.1.1 GPS 的组成	24
3.1.2 GPS 的工作原理	26
3.2 惯性导航系统的组成和工作原理	27
3.3 PSLV 的组成	28
3.3.1 惯性测量装置	28
3.3.2 主 GPS 接收机和辅 GPS 接收机	29
3.3.3 卡尔曼滤波器	29
3.3.4 高性能工业计算机	30

3.3.5	GPS 方位测量子系统	30
3.3.6	轮速传感器	31
3.4	GPS 和 INS 的组合原理	31
3.4.1	松组合	31
3.4.2	紧组合	33
3.4.3	applanix In-Fusion 组合技术	35
3.5	线扫描激光雷达	36
3.5.1	RIEGL VQ-180	36
3.5.2	RIEGL VZ-1000	38
3.5.3	FARO Focus3D	40
第 4 章	POS 数据处理	49
4.1	POS 数据处理流程	49
4.2	SmartBase 技术	50
4.2.1	SmartBase 的概念	50
4.2.2	SmartBase 支持的参考站数据	51
4.2.3	SmartBase 质量检查	51
4.2.4	SmartBase 精度	51
4.2.5	执行 SmartBase 需要考虑的因素	52
4.2.6	SmartBase 的数据处理过程	54
4.3	SingleBase 技术	54
4.4	C/A 码 GPS	55
4.5	精密单点定位技术	55
4.5.1	精密单点定位的概念	55
4.5.2	精密单点定位的数据处理过程	55
4.5.3	精密单点定位的数据处理精度	56
4.5.4	精密单点定位的适用条件	56
第 5 章	点云数据处理	58
5.1	扫描仪数据格式转换	58
5.2	大数据分割	59
5.3	加载激光雷达数据	60
5.4	加载 GPS/INS 数据	62
5.5	数据显示	64
5.6	数据配准	65

第 6 章 车载移动测量系统的设计与集成	67
6.1 车载平台的设计	67
6.2 点云数据处理系统软件开发	71
6.2.1 FARO 编程环境配置	71
6.2.2 扫描仪操作控制的具体实现	80
第 7 章 车载移动测量系统检校	87
7.1 移动激光雷达测量系统的误差来源	87
7.2 标靶的原理	88
7.2.1 多功能实用型激光雷达扫描标靶	89
7.2.2 激光扫描标靶	91
7.2.3 新型圆柱形三维激光扫描标靶	92
7.2.4 球形测量装置	93
7.3 检校的原理	94
第 8 章 车载移动测量系统测试	96
8.1 利用全站仪测定精确的标靶坐标	96
8.1.1 检校场的选择	96
8.1.2 观测点的选择	97
8.1.3 控制网的建立	99
8.1.4 检校点位置的选择	101
8.1.5 观测数据的获取方式	102
8.2 移动测量设备的测量数据与标靶坐标对比	103
8.3 精度分析	106
8.3.1 绝对精度分析	106
8.3.2 相对精度分析	109
8.3.3 站载扫描数据与车载扫描数据的对比	110
参考文献	119

第 1 章 绪 论

近年来,随着国家科技的进步发展,作为国家基础建设根基的测绘行业也在进行着翻天覆地的变化。在当前计算机技术、激光雷达技术、摄影测量与遥感技术的飞速发展下,人们已经将多种多样的传感器搭载到卫星、飞机等高空遥感平台上来进行遥感作业,同时也将低空无人机、汽车、舰船等作为遥感平台,通过各种集成来获取影像数据。以卫星和飞机为运载工具的航空航天遥感平台搭载的多种传感器能获得多时相、高分辨率、高时间分辨率的遥感数据。航空摄影测量是目前获取地球空间影像最主要的技术手段。随着无人机、无人飞艇搭载小面阵数码相机在技术方面的突破,其已经逐渐应用于小面积航空摄影,获取了低空高分辨率的影像数据。不仅在影像方面,在获取实时三维空间信息方面,激光雷达(light detection and ranging, LIDAR)技术应用也取得了实质性的进展,其已经可以实现高效实时遥感信息的定位。高速公路等特殊地物由于其特殊性,无法用站载扫描仪进行数据扫描,为此人们提出了车载移动测量系统。该系统以汽车作为平台,通过在汽车上安装高精度动态全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)和高动态载体测姿传感器惯性测量装置(inertial measurement unit, IMU),再利用 GNSS/IMU 组合定位定姿技术来直接快速获取地理定位信息,实现了在特殊地带及常规测区内都可以使用的快速的无须地面控制点的数据采集,为三维数据的采集方式提供了新的思路。

移动测量系统最关键的技术就是利用多传感器(multi-sensors)组合技术测量地理定位信息,尤其 GNSS/IMU 组合系统是移动测量系统的核心。随着 GNSS/IMU 组合定位定姿技术的发展,移动测量系统充分集成了各种传感器,主要是利用 GNSS 和 IMU 的传感器信息。该系统用高精度 GNSS 定位结果来控制并修正 IMU 的系统漂移,用 IMU 的数据对因 GNSS 信号失锁而引起的整周模糊度难确定的问题进行补充解决,改正计算 GNSS 模糊度搜索方法,使最终的运动载体输出结果具有高精度和高采样率,提高了组合系统的性能和可靠性,实现了优势互补。高精度的组合系统缩短了数据获取的时间,与传统的地图生产模式相比,提高了生产效率,且成图质量和精度较高。图 1-1 所示为车载移动测量系统。

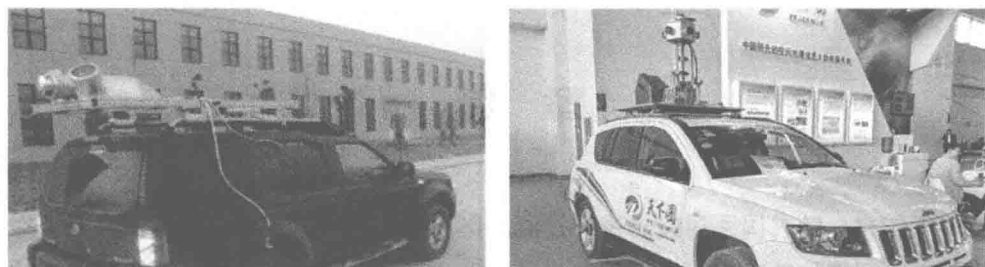


图 1-1 车载移动测量系统

移动测量系统最主要的数据采集设备是激光扫描仪,它能扫描出具有很高密度的点云数据,每平方米至少 10000 点。点云数据分辨率高,能识别高架电线以下直径为 3mm 的最小地物特征,因此用激光扫描仪获得点云数据成为一种全新的、独立的测量方式。移动测量系统的出现是测绘技术的一次革命,它为地理信息的采集与更新开辟了一条快捷高效的途径,逐渐成为三维空间信息获取的重要手段之一。随着硬件及集成技术的发展,传感器的使用越来越广泛,自动处理技术也越来越完善,移动测量技术将会在未来导航数据采集和地图快速实时更新中发挥越来越大的作用。李德仁院士指出,移动测量系统是当今测绘界较为前沿的科学技术之一,代表着未来道路电子地图测绘领域的发展主流,是测绘领域一个新的发展方向。移动测量系统与航空航天遥感、无人机遥感相比,有其自身的优势和特点。利用移动测量系统搭载的数码相机、激光扫描仪能及时快速地获取道路、街道两侧的序列影像和激光点云,能够对各种道路、街区的资产随时随地按需要进行测量,加快了空间数据的采集和属性信息的确定,是对航空摄影测量和卫星摄影测量的有力补充。

随着高速公路、普通道路、城市高层建筑等基础设施建设日新月异的发展,对电子交通地图的需求变成了快速更新,具备实时性、全面性和准确性。如果依然使用传统的人工测量方式,会造成成图效率低,最后生产出来的电子地图可能已经成为过时的产品,而采用移动测量系统能在无须任何底图的情况下,高效率、高精度、低成本地完成电子交通地图的测绘工作。移动测量系统作为一代崭新的测绘方式和独立的道路电子地图测量成图系统,必将取代传统的作业模式。另外,移动测量系统以其测绘速度快、效率高、自动化程度高、运行成本低,同时还降低了传统人工测量的劳动量,减少了人工测量的危险性等特点,受到了大众的广泛关注。因此,车载移动测量系统必将广泛应用于高速公路及其两侧的测量与勘察、道路现状调查分析、道路资产管理、街道或路边资产管理、高速公路路面维护、电杆清查等方面,特别是在公路地理信息系统、铁路地理信息系统、公安地

理信息系统、可视化监控、警备路线管理等方面发挥重要的作用，并为各类管理决策人员提供辅助决策，具有十分广阔的应用前景。随着智慧城市的发展，街道景观的三维可视化已经成为智慧城市建设的一项重要工作。同时，利用车载移动测量系统获取的建筑物立面的影像数据和密集的激光点云数据，可以重建三维可视化的城市模型或者生成计算机辅助设计（computer aided design, CAD）图，这也为城市道路设计、城市规划提供了很好的技术保障。

第2章 移动测量系统的理论基础

移动测量系统是一个多传感器集成的组合系统,各个传感器按照自己的采样频率进行数据的采集、输入/输出,采样的时间间隔也各不相同。要对每个传感器的测量数据进行实时处理或者数据后处理,必须拥有统一的空间基准和时间基准,才能保证系统数据的集成处理。对于空间基准,必须建立统一的坐标系统,将全球定位系统(global positioning system, GPS)、IMU、距离传感器(distance measuring indicator, DMI)(又名轮速传感器)、数码相机、相机和激光扫描仪等传感器的原点统一到一个基准参考坐标系中,建立各个传感器之间严密的坐标关系,以实现多源数据的融合处理。整个移动测量系统传感器采集的数据必须建立在同一时间坐标系中,才能保证数据的精确。本章首先从理论上分析 GPS、IMU、DMI、相机和激光扫描仪等多个传感器之间的几何关系,建立统一的坐标系,寻找各个传感器坐标系之间的内在联系;然后推导各个坐标系之间的变换关系;其次建立物像关系模型,计算物点坐标和相机外方位角元素的公式;再次推导激光点云的地面坐标计算公式;最后阐明多组合传感器系统中时间同步的重要意义。

2.1 移动测量的数学模型

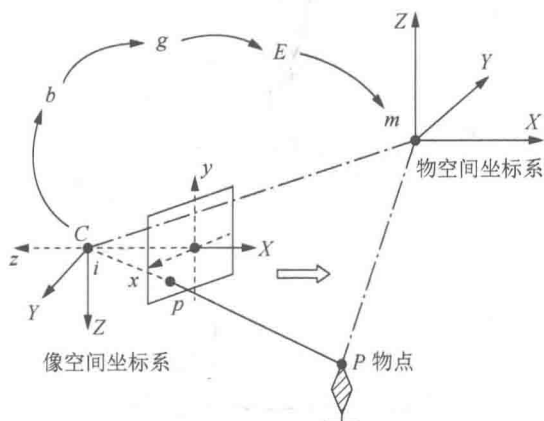
2.1.1 物方模型

1. 像空间坐标系 i 到物空间坐标系 m 的变换关系——求物点 P

设物点 P 在物空间坐标系 m 中的坐标为 (X_P, Y_P, Z_P) , 相机投影中心 C 在物空间坐标系 m 中的坐标为 (X_C, Y_C, Z_C) 。在物空间坐标系 m 中,从相机投影中心 C 到物点 P 的解算坐标为 $(\Delta X_P, \Delta Y_P, \Delta Z_P)$, 则物点 P 在物空间坐标系 m 中的坐标可以用下式表示:

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix}^m + \begin{bmatrix} \Delta X_P \\ \Delta Y_P \\ \Delta Z_P \end{bmatrix}^m \quad (2-1)$$

相机投影中心 C 和物空间坐标系之间的关系如图 2-1 所示。

图 2-1 相机投影中心 C 和物空间坐标系之间的关系

相机投影中心 C 在物空间坐标系 m 中的坐标 (X_C, Y_C, Z_C) 是由 POSPac 软件计算的, 直接从 IMU 的位置关系推算到相机投影中心 C 的关系如下式所示:

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix}^m = \mathbf{R}_E^m \left(\begin{bmatrix} X_{\text{IMU}} \\ Y_{\text{IMU}} \\ Z_{\text{IMU}} \end{bmatrix}^E + \mathbf{R}_g^E \mathbf{R}_b^g(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \end{bmatrix}^m \right) \quad (2-2)$$

式中, $\mathbf{R}_E^m$ 为地心地固坐标系 E 到物空间坐标系 m 的旋转矩阵; $(X_{\text{IMU}}, Y_{\text{IMU}}, Z_{\text{IMU}})$ 为 IMU 坐标原点 b 在地心地固坐标系 E 中的坐标; $\mathbf{R}_g^E$ 为当地水平参考坐标系 g 到地心地固坐标系 E 的旋转矩阵; $\mathbf{R}_b^g$ 为 IMU 载体坐标系 b 到当地水平参考坐标系 g 的姿态旋转矩阵, 旋转矩阵是由姿态角 (ϕ, θ, ψ) 组成的方向余弦; (ϕ, θ, ψ) 分别为横滚角 (roll)、俯仰角 (pitch)、航向角 (heading); (X_l, Y_l, Z_l) 为在 IMU 载体坐标系中, IMU 坐标原点 b 到相机投影中心 C 的偏心矢量。

相机投影中心 C 到物点 P 的解算坐标 $(\Delta X_P, \Delta Y_P, \Delta Z_P)$ 是通过摄影测量的共线条件方程计算的。

2. 像空间坐标系 i 到物空间坐标系 m 的变换方法

从像空间坐标系 i 到物空间坐标系 m 的变换有两种方法: 一是从像空间坐标系 i 变换到物空间坐标系 m 满足摄影测量的共线条件方程; 二是通过旋转矩阵变换, 把像空间坐标系 i 变换到物空间坐标系 m 中。

1) 共线条件方程

在物空间坐标系 m 中, 物点 P 、像点 p 与相机投影中心 C 满足共线条件方程。根据共线条件方程, 物点 P 与像点 p 之间的关系为

$$\begin{bmatrix} \Delta x_p \\ \Delta y_p \\ \Delta z_p \end{bmatrix}^m = \lambda \mathbf{R}_i^m(\phi, \omega, \kappa) \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f_p \end{bmatrix}^i \quad (2-3)$$

式中, (x_p, y_p) 为像点 p 在像平面坐标系中的坐标; f_p 为相机检校后的焦距; λ 为比例尺因子; $\mathbf{R}_i^m$ 为像空间坐标系 i 到物空间坐标系 m 的旋转矩阵, 由相机外方位角元素 (ϕ, ω, κ) 来定义。

2) 旋转矩阵变换

物点 P 、像点 p 与相机投影中心 C 之间的关系通过旋转矩阵的变换过程来实现, 变换过程如下: 像空间坐标系 $i \rightarrow$ 相机载体坐标系 $c \rightarrow$ IMU 载体坐标系 $b \rightarrow$ 当地水平参考坐标系 $g \rightarrow$ 地心地固坐标系 $E \rightarrow$ 物空间坐标系 m , 变换方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta x_p \\ \Delta y_p \\ \Delta z_p \end{bmatrix}^m = \lambda \mathbf{R}_E^m \mathbf{R}_g^E \mathbf{R}_b^g(\phi, \theta, \psi) \mathbf{R}_c^b(\theta_x, \theta_y, \theta_z) \mathbf{R}_i^c \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f_p \end{bmatrix}^i \quad (2-4)$$

式中, $\mathbf{R}_E^m$ 为地心地固坐标系 E 到物空间坐标系 m 的旋转矩阵; $\mathbf{R}_g^E$ 为当地水平参考坐标系 g 到地心地固坐标系 E 的旋转矩阵; $\mathbf{R}_b^g$ 为 IMU 载体坐标系 b 到当地水平参考坐标系 g 的旋转矩阵, 由姿态角 (ϕ, θ, ψ) 的方向余弦组成; $\mathbf{R}_c^b$ 为相机载体坐标系 c 到 IMU 载体坐标系 b 之间的旋转矩阵, 由偏心角 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 构成; $\mathbf{R}_i^c$ 为像空间坐标系 i 到相机载体坐标系 c 之间的旋转矩阵。

3. 相机外方位角元素的求解方法

根据式 (2-3) 和式 (2-4), 可以直接写出利用姿态角 (ϕ, θ, ψ) 计算相机外方位角元素 (θ, ω, κ) 的公式, 即

$$\mathbf{R}_i^m(\phi, \omega, \kappa) = \mathbf{R}_E^m \mathbf{R}_g^E \mathbf{R}_b^g(\phi, \theta, \psi) \mathbf{R}_c^b \mathbf{R}_i^c \quad (2-5)$$

式 (2-5) 就是利用横滚角、俯仰角和航向角计算相机外方位角元素 (θ, ω, κ) 的公式。

式 (2-3) ~ 式 (2-5) 的推导过程揭示了由像点坐标 (x_p, y_p) 求解物空间的地面点坐标 (x_p, y_p, z_p) 的过程, 既可以通过共线条件方程来实现, 也可以通过旋转矩阵变换来实现。

2.1.2 激光点云的地面点坐标计算

在地心地固坐标系 E 中, 设某一个激光点云 P 的地面坐标为 (x_p, y_p, z_p) , 激光器扫描镜中心点的坐标为 (X_L, Y_L, Z_L) , 激光点云 P 与激光扫描镜中心点之间的量测距离分量为 $(\Delta X_p, \Delta Y_p, \Delta Z_p)$, 则激光点云 P 在地心地固坐标系 E 中的地面坐标可以表示为

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix}^E = \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix}^E + \begin{bmatrix} \Delta X_p \\ \Delta Y_p \\ \Delta Z_p \end{bmatrix}^E \quad (2-6)$$

激光点云 P 与激光扫描镜中心点之间的量测距离分量 $(\Delta X_p, \Delta Y_p, \Delta Z_p)$ 通过坐标变换过程来实现, 变换过程如下: 瞬时激光束坐标系 $SL \rightarrow$ 激光扫描参考坐标系 $T \rightarrow$ 激光载体坐标系 $L \rightarrow$ IMU 载体坐标系 $b \rightarrow$ 当地水平参考坐标系 $g \rightarrow$ 地心地固坐标系 E , 变换方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta X_p \\ \Delta Y_p \\ \Delta Z_p \end{bmatrix}^E = \mathbf{R}_g^E(B, L) \mathbf{R}_b^g(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix}^b + \mathbf{R}_L^b(\theta_x, \theta_y, \theta_z) \mathbf{R}_{SL}^T(\theta_i, 0, 0) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ p \end{bmatrix}^{SL} \quad (2-7)$$

不考虑偏心矢量的点云地面点计算公式为

$$\begin{bmatrix} \Delta X_p \\ \Delta Y_p \\ \Delta Z_p \end{bmatrix}^E = \mathbf{R}_g^E(B, L) \mathbf{R}_L^g(\phi, \theta, \psi) \mathbf{R}_T^L(\theta_x, \theta_y, \theta_z) \mathbf{R}_{SL}^T(\theta_i, 0, 0) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ p \end{bmatrix}^{SL} \quad (2-8)$$

式中, $\mathbf{R}_g^E$ 为当地水平参考坐标系 g 到地心地固坐标系 E 的旋转矩阵, 与激光点处的经纬度坐标 (B, L) 相关; $\mathbf{R}_L^g$ 为激光载体坐标系 L 到当地水平参考坐标系 g 的旋转矩阵, 由姿态角 (ϕ, θ, ψ) 构成; $\mathbf{R}_T^L$ 为激光扫描参考坐标系 T 相对于激光载体坐标系 L 的姿态旋转矩阵, 由偏心角 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 构成; $\mathbf{R}_{SL}^T$ 为瞬时激光束坐标系 SL 到激光扫描参考坐标系 T 之间的旋转矩阵, 由激光棱镜扫过的角度 θ_i 确定; p 为激光器扫描镜中心到激光点云 P 的斜距。

综合式 (2-7) 和式 (2-8), 可以解算任意一个激光点云 P 的地面坐标。

2.2 移动测量定义的坐标系

在建立移动测量系统对地定位的数学模型之前, 首先定义几个坐标系, 主要涉及载体框架坐标系、辅助传感器坐标系、与惯性导航计算相关的坐标系、与基准转换相关的坐标系、摄影测量坐标系和激光扫描仪坐标系。

2.2.1 载体框架坐标系

1. 移动测量系统平台框架坐标系 (VF)

移动测量系统平台框架坐标系 (vehicle frame) 定义为一个右手空间直角坐标系, 坐标系的原点选在车体的几何中心, x 轴指向车体的前进方向, y 轴指向车体的右侧, z 轴垂直指向车体的下方, 各个轴严格地与车体的轴线对齐。

2. 参考框架坐标系 (ReF)

参考框架坐标系 (reference frame) 定义为一个右手空间直角坐标系, 坐标系的原点是由用户选择的参考点 (reference point), x 轴指向车体的前进方向, y 轴指向车体的右侧, z 轴垂直指向车体的下方。它与平台框架坐标系的坐标轴指向是一致的, 原点不同, 不需要严格对准。选择参考框架坐标系的目的是便于量测传感器与参考框架坐标系之间的偏心分量。极轨卫星运载火箭 (polar satellite launch vehicle, PSLV) 的导航解算是以参考框架坐标系为基准计算的, 是相机、激光扫描仪等辅助传感器坐标系的基准坐标系。

3. IMU 载体坐标系 (b)

IMU 载体坐标系定义为一个右手空间直角坐标系, 坐标系的原点位于 IMU 传感器的中心, 即 IMU 加速度计三个输入轴的交叉点; IMU 中各个传感器的轴向指的是 IMU 陀螺仪和加速度计自身的三个输入轴的方向; IMU 载体坐标系的轴向与 IMU 传感器轴的指向是一致的。IMU 传感器安装在车顶或者车厢内部, IMU 载体坐标系的 x 轴指向车体的前进方向, 与移动平台的前进方向保持一致, y 轴指向 IMU 载体的右侧, z 轴垂直指向下。IMU 载体坐标系的坐标轴方向在 IMU 传感器的盒子顶端都有标注, IMU 载体坐标系的测量标志点距离 IMU 传感器中心的距离偏移量标示在 IMU 盒子的顶端, 如 PSLV 220 的 IMU 测量标志点距离 IMU 中心的数值为 $X=0$, $Y=0$, $Z=-0.066\text{m}$ 。图 2-2 所示为 IMU 原点标志及安置在不同位置时的坐标指向。



图 2-2 IMU 原点标志及安置在不同位置时的坐标指向

从理论设计上讲, 应该使 IMU 载体坐标系与参考框架坐标系的坐标轴系相互平行, 但是由于在安装 IMU 传感器时, 受安装车载平台的方向、位置及电缆连线的方式等因素的影响, IMU 载体坐标系与参考框架坐标系之间存在固定的横滚、俯仰和航向的安置偏心角 ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)。IMU 载体坐标系相对于参考框架坐标系可以进行 180° 或者 90° 旋转。在实际工程应用中, 一般将 IMU 载体坐标系的原点作为参考框架坐标系的原点。

2.2.2 辅助传感器坐标系

1. DMI 载体框架坐标系 (DMI)

以车载移动测量系统为例, DMI 严格安装在后车轮上, 使 DMI 的轴线与车轮的轴线保持一致, 无偏心旋转。DMI 载体框架坐标系 (DMI body frame) 定义为一个右手空间直角坐标系, 坐标系的原点位于车载平台的车轮中心线与路面相切的地面点上, x 轴指向移动平台的前进方向, y 轴指向车轮的右侧, z 轴垂直指向下, 坐标轴的指向与车载平台框架坐标系保持一致。

2. 主 GPS 接收机坐标系 (GPS)

主 GPS 接收机坐标系 (primary GPS frame) 定义的是北东地 (NED) 的地理坐标系 g , 原点位于 GPS 天线的相位中心, 近似于天线的物理中心, x 轴指向北 (north, N), y 轴指向东 (east, E), z 轴指向地 (down, D), 属于右手空间直角坐标系。主 GPS 的偏心矢量是从参考框架坐标系的原点到 GPS 天线相位中心的坐标分量。

3. 相机载体坐标系 (c)

相机载体坐标系 (camera body coordinate frame) 定义为一个空间直角坐标系, 满足右手准则, 坐标系固定在相机上, 坐标系的原点位于相机透镜的投影中心, x 轴指向车体的前进方向, y 轴指向相机的右侧, z 轴垂直指向下。从设计上讲, 相机载体坐标系与参考框架坐标系之间的坐标轴应该相互平行, 但是受安置的影响, 存在安置偏心角。另外, 为了实际工程的需要, 相机设备会偏离一定的角度。这两个角度综合作为相机载体坐标系与参考框架坐标系之间的偏心角。

4. 激光载体坐标系 (L)

激光载体坐标系也称理想激光扫描仪载体坐标系, 定义为一个右手空间直角坐标系, 坐标系与激光扫描仪器相关联, 坐标系的原点位于扫描棱镜的旋转轴中心, x 轴指向车体的前进方向, y 轴指向扫描仪的右侧, z 轴垂直指向下。理论上, 激光载体坐标系与参考框架坐标系之间的坐标轴应该相互平行, 但是存在安置偏心角和实际工程需要的偏离角, 这两个角度综合作为激光载体坐标系与参考框架坐标系之间的偏心角。

2.2.3 与惯性导航计算相关的坐标系

1. 当地水平参考坐标系 (g)

当地水平参考坐标系与参考椭球相切。当地水平参考坐标系的原点位于当前位置, 当前位置可以是主 GPS 天线的相位中心或者是车载平台上定义的任意一点,

x 轴指向北, y 轴指向东, z 轴指向地, 即 z 轴指向当地的重力矢量方向。当地水平意味着 z 轴与当地垂直参考系的 z 轴一致。平台的姿态角是相对于当地水平参考坐标系来测定的。以车载移动测量系统为例, 当地水平参考坐标系是车载平台导航的坐标系, 随着机动车的移动而变化, 也称为导航坐标系 n 、地球切平面坐标系、北东地坐标系 (NED)、东北天坐标系 (ENU) 或地理坐标系。

2. 导航坐标系 (n)

导航坐标系指的是 IMU 传感器所使用的一个数学平台, 是姿态矩阵参考变换所选定的坐标系。以车载移动测量系统为例, IMU 是直接安装在车载平台上的, 与 GPS 天线及扫描仪之间是刚体连接, 其中 IMU 的陀螺仪和加速度计分别用来测量整个车载平台运动过程中的角度变化及距离和位置变化。计算机系统根据这些测量信息解算出运动载体的航向、姿态、速度和位置。由于是组合系统, 惯性导航系统 (inertial navigation system, INS) 首先必须用 GPS 的已知位置和速度来初始化, 执行航向的对准, 找到真北方向; 然后置平, 使垂直方向指向当地的重力矢量方向。完成 INS 对准后, 即建立了一个当地水平的数学参考坐标系, 该参考坐标系就是导航坐标系。建立导航坐标系后, 航向角与真北方向的夹角是已知的, 因此 IMU 的姿态角也就已知了。

IMU 载体坐标系到导航坐标系的坐标变换就是载体姿态矩阵的解算, 姿态矩阵解算相当于建立了一个数学平台, 并且姿态矩阵随时间实时更新。当地水平参考坐标系与基于数学平台的导航坐标系相差一个自由方位角 α_f , 如下式所示, 本节不严格区分当地水平参考坐标系和导航坐标系。

$$R_g^n = \begin{bmatrix} \cos \alpha_f & \sin \alpha_f & 0 \\ -\sin \alpha_f & \cos \alpha_f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

2.2.4 与基准转换相关的坐标系

1. 地心地固坐标系 (E)

地心地固坐标系 (earth-centered earth-fixed) 是一种与参考椭球相固定连接的坐标系, 坐标系的原点位于椭球中心, x 轴指向赤道与本初子午线相交的交点, z 轴指向北极, y 轴位于赤道平面内, 与本初子午线呈 90° 。

2. 1984 世界大地坐标系 (WGS-84)

1984 世界大地坐标系 (world geodetic system 1984, WGS-84) 是地心地固坐标系的一种。GPS 卫星按照广播星历和精密星历向 GPS 接收机发送卫星的位置观测信号, 计算 GPS 接收机的位置。GPS 接收机位置的计算采用的是 WGS-84, POS