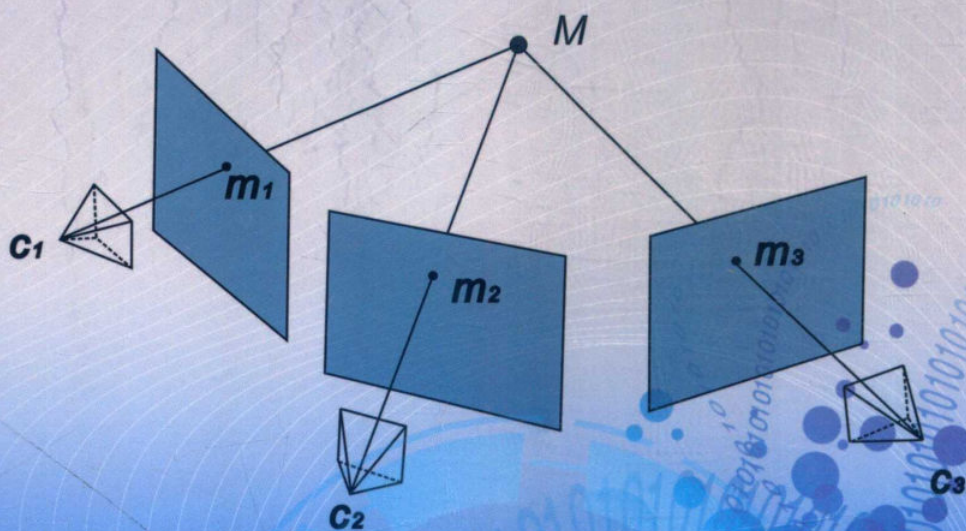


# 现代摄影测量理论与方法

孙华生 编著



科学出版社

# 现代摄影测量理论与方法

孙华生 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书主要介绍了现代摄影测量中关于空间定位的相关理论和方法。由于计算机视觉和摄影测量在空间定位方面有着共同的交叉点,而且随着这两个学科的深入发展,它们也在相互借鉴和融合。本书借鉴了计算机视觉领域中许多先进的空间定位理论,来优化和改进传统摄影测量的数据处理算法,从而形成适应性和稳健性更强的基于图像的空间定位理论和方法体系。本书中的理论和方法不仅可以满足传统的航空摄影测量空间定位的需求,而且还可以满足其他摄影测量手段(如无人机、车载或手持相机等)进行空间定位的需求。

本书可供学习摄影测量、计算机视觉定位的本科生、研究生,以及从事该领域研究的专业研究人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代摄影测量理论与方法/孙华生编著.—北京:科学出版社,2019.10

ISBN 978-7-03-062435-2

I. ①现… II. ①孙… III. ①摄影测量 IV. ①P23

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第215603号

责任编辑:杨红 郑欣虹/责任校对:樊雅琼

责任印制:张伟/封面设计:陈敬

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年10月第一版 开本:720×1000 B5

2019年10月第一次印刷 印张:12 3/4

字数:254 000

定价:69.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

传统航空摄影测量采用的图像获取设备都比较昂贵，通常还需要与其他辅助设备（如全球导航卫星系统、惯性导航系统等）共同完成数据获取。此外，传统的航空摄影测量对图像的拍摄条件有着非常严格的要求。例如，航空摄影测量要求相机必须进行严格标定，图像采用垂直摄影的方式获取，而且在图像获取时，相机的航向倾角、旁向倾角和航偏角都不能太大。其目的的一方面是使成像比例尺尽可能保持一致，以保证摄影测量的定位精度；另一方面是简化数据处理的算法，例如，在相对定向时可以很容易地估计出转角和基线在各个方向分量上的初始值，从而可以直接进行非线性求解。此外，在以上情况下，实现图像密集匹配的算法也比倾斜摄影的更为简单。然而，受到以上条件的严格限制，航空摄影测量技术显得不够灵活。

后来，在作者学习了 Hartley 和 Zisserman 的著作《计算机视觉中的多视图几何》（*Multiview Geometry in Computer Vision*）之后，收获非常大，并认为其理论和方法可以更好地用于解决摄影测量的相关问题。这是因为：从本质上说，计算机视觉定位的目标与摄影测量是一致的，即利用相机拍摄的二维图像来还原被拍摄物体在三维空间中的位置，在这个过程中还可以实现对相机参数的获取，而且计算机视觉采用的理论和方法要比摄影测量的更为先进和灵活。例如，在计算机视觉中对图像的姿态不需要做太多的限制，可从任意角度和位置进行垂直或倾斜拍摄，而其位姿参数可以直接利用线性算法解算出来；甚至相机可以不必事先进行标定，因为相机内参数可通过自标定技术解算出来；而且计算机视觉的数据处理过程可以不借助任何辅助设备，所以其适应能力非常强，数据处理非常灵活方便，完全可以满足倾斜摄影测量的要求。此外，计算机视觉采用的理论是以射影几何和数值分析为基础的数学理论，在具体计算时采用向量和矩阵进行计算，各个参数之间的关系非常简洁，便于理解和计算。

近些年来，随着硬件技术的进步，出现了多种多样的摄影测量平台和设备，如无人机摄影测量设备、车载摄影测量设备，甚至是手持的数码相机和手机等，其数据获取能力非常强大。实际上，在摄影测量过程中，各种平台和设备只为摄影测量的实现提供最基本的素材（即图像），真正的核心部分是数据处理，而数据处理必须采用各种先进的算法来实现。如果采用传统的航空摄影测量算法对以上设备拍摄的图像进行处理，想实现实景三维建模功能是不可行的，必须采用计算机视觉的定位理论和方法来实现。一旦有了强大的算法和软件，就可以将那些

看起来非常普通的二维图像变成真实场景的三维模型，生动地展现在人们的面前。目前，国内外已经开发出了多款较为成熟的实景三维建模软件，通过无人机和手机等拍摄的图像，即使在没有进行相机标定的条件下，也可以在相机自标定的基础上实现三维模型的构建。这些三维建模软件的功能非常强大，其理论基础就是计算机视觉的相关理论。

然而，目前国内出版的摄影测量方面的教材和专著，其内容大多介绍的仍然是传统的航空摄影测量理论和方法，这些方法无法满足现代摄影测量数据处理的要求。20世纪90年代以来，在计算机视觉领域中出现了许多优秀的关于视觉定位的新理论和新算法，因此作者希望通过借鉴计算机视觉领域中的先进理论和方法，来满足现代摄影测量数据处理的要求。本书参阅大量文献资料，对摄影测量中涉及的主要内容进行深入研究，并对研究结果进行整理和汇总。本书重点关注现代摄影测量中的数学基础和几何问题，在介绍了现代摄影测量的背景、数学基础和基本约束之后，对其中涉及的基于二维图像进行空间定位的核心内容进行了详细的介绍，具体包括：空间前方交会、空间后方交会、相对定向与绝对定向、从运动恢复结构、基于已知参照物的相机标定、相机自标定、光束平差等。只要具备了现代摄影测量的数学基础，并且理解了现代摄影测量的基本约束，后面的内容就比较容易理解了。本书详细描述了现代摄影测量的各种理论和方法，并附有大量的数学公式，读者根据书中对各种具体算法的描述，即可通过计算机编程来实现各种数据处理算法。

本书的内容完全是基于作者的理解撰写的，由于个人的能力有限，难免存在一些不完善或者疏漏之处，欢迎各位读者对本书进行批评指正。如果读者对本书的内容有疑问、意见或者建议，可直接发送电子邮件到 [sunhuasheng@126.com](mailto:sunhuasheng@126.com) 联系作者。

孙华生

2019年3月

# 目 录

## 前言

## 上篇 现代摄影测量的背景与理论基础

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                  | 3  |
| 第 2 章 现代摄影测量的数学基础         | 9  |
| 2.1 线性优化与非线性优化问题          | 9  |
| 2.1.1 线性优化问题              | 9  |
| 2.1.2 非线性优化问题             | 10 |
| 2.2 统计理论与方法               | 11 |
| 2.2.1 正态分布概率密度函数的推导       | 11 |
| 2.2.2 参数估计                | 14 |
| 2.2.3 RANSAC 算法           | 17 |
| 2.2.4 蒙特卡罗方法              | 19 |
| 2.3 多项式代数                 | 20 |
| 2.3.1 抽象代数中的基本概念          | 20 |
| 2.3.2 多项式的求解              | 21 |
| 2.4 线性代数与矩阵论              | 23 |
| 2.4.1 常用的矩阵分解             | 23 |
| 2.4.2 非齐次线性方程组 $Ax=b$ 的求解 | 26 |
| 2.4.3 齐次线性方程组 $Ax=0$ 的求解  | 27 |
| 2.4.4 矩阵的广义逆              | 28 |
| 2.4.5 基变换与坐标变换            | 28 |
| 2.4.6 分块矩阵求逆              | 30 |
| 2.5 向量代数与空间解析几何           | 30 |
| 2.5.1 向量代数                | 30 |
| 2.5.2 空间解析几何              | 34 |
| 2.6 射影几何基础                | 41 |
| 2.6.1 射影平面                | 41 |

|            |                    |           |
|------------|--------------------|-----------|
| 2.6.2      | 二次曲线与对偶二次曲线        | 43        |
| 2.6.3      | 二维射影变换             | 46        |
| 2.6.4      | 三维射影变换             | 51        |
| 2.7        | 符号运算               | 55        |
| <b>第3章</b> | <b>现代摄影测量的基本约束</b> | <b>58</b> |
| 3.1        | 相机投影模型             | 58        |
| 3.1.1      | 预备知识               | 58        |
| 3.1.2      | 相机投影模型的详细推导        | 64        |
| 3.1.3      | 相机投影与反投影           | 74        |
| 3.1.4      | 消失点和消失线            | 77        |
| 3.2        | 两视图的对极约束           | 78        |
| 3.2.1      | 对极约束的推导            | 78        |
| 3.2.2      | 基本矩阵 $F$ 的求解方法     | 91        |
| 3.2.3      | 基于对极约束的像对匹配检验      | 93        |
| 3.2.4      | 两图像之间的单应关系         | 95        |
| 3.2.5      | 相机和结构的三维重构         | 97        |
| 3.2.6      | 图像坐标和世界坐标的归一化处理    | 100       |
| 3.2.7      | 判断点是否共线或共面的方法      | 102       |
| 3.3        | 多视图的约束             | 102       |
| 3.3.1      | 两视图对极约束的张量表示       | 102       |
| 3.3.2      | 三视图的约束             | 104       |
| 3.3.3      | 多视图的约束             | 110       |

## 下篇 现代摄影测量空间定位的理论与方法

|            |                   |            |
|------------|-------------------|------------|
| <b>第4章</b> | <b>空间前方交会</b>     | <b>113</b> |
| 4.1        | 实现空间前方交会的基本思路和方法  | 113        |
| 4.2        | 像点误差对世界坐标点定位精度的影响 | 121        |
| <b>第5章</b> | <b>空间后方交会</b>     | <b>123</b> |
| 5.1        | 非线性算法             | 123        |
| 5.2        | 线性求解算法            | 126        |
| <b>第6章</b> | <b>相对定向与绝对定向</b>  | <b>136</b> |
| 6.1        | 相机位姿的相对定向         | 136        |
| 6.1.1      | 相机内参数已知条件下的相对定向   | 137        |

---

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 6.1.2 相机内参数未知条件下的相对定向 .....  | 144 |
| 6.2 世界坐标的绝对定向 .....          | 146 |
| 第 7 章 从运动恢复结构 .....          | 149 |
| 第 8 章 基于已知参照物的相机标定 .....     | 153 |
| 8.1 基于三维标定场的相机标定 .....       | 153 |
| 8.2 基于二维标定场的相机标定 .....       | 157 |
| 8.3 基于虚圆点的相机标定 .....         | 163 |
| 8.4 基于消失点和消失线的相机标定 .....     | 165 |
| 8.4.1 基于消失点的相机标定 .....       | 165 |
| 8.4.2 基于消失线的相机标定 .....       | 165 |
| 第 9 章 相机自标定 .....            | 167 |
| 9.1 相机自标定的基本理论 .....         | 167 |
| 9.2 基于绝对对偶二次曲面的相机自标定 .....   | 172 |
| 9.3 基于 Kruppa 方程的相机自标定 ..... | 173 |
| 9.4 分层相机自标定 .....            | 175 |
| 9.5 特殊情形的自标定 .....           | 178 |
| 9.5.1 基于纯旋转运动的相机自标定 .....    | 178 |
| 9.5.2 基于平面场景的相机自标定 .....     | 179 |
| 第 10 章 光束平差 .....            | 181 |
| 10.1 无约束条件的光束平差 .....        | 182 |
| 10.2 带约束条件的光束平差 .....        | 186 |
| 参考文献 .....                   | 191 |

# 上篇 现代摄影测量的背景 与理论基础

本篇共分为3章，包含了本书前3章的内容。其中，第1章为绪论，简要地介绍了摄影测量的背景、发展状况，以及本书关注的主要问题；第2章为现代摄影测量的数学基础，介绍了现代摄影测量涉及的常用的数学知识，尤其是线性与非线性优化、线性代数与矩阵论，以及射影几何等，是对实现空间定位至关重要的内容；第3章为现代摄影测量的基本约束，介绍了单视图的相机投影模型约束、两视图的对极约束，以及多视图的约束关系。第2章和第3章的内容是现代摄影测量基本的理论基础。



# 第1章 绪 论

常规的大地测量、工程测量等主要依靠水准仪、经纬仪、全站仪等测量仪器实现。这种测量方式具有很高的精准度和可靠性，但对大区域范围的测量来说，其工作量大、作业效率低。随着现代科学技术的发展和进步，测量技术得以快速发展。在过去的几十年里，产生和发展了许多新的测量理论与技术，例如，惯性测量技术、全球导航卫星系统（global navigation satellite system, GNSS）定位技术、室内无线定位技术、摄影测量与遥感技术、三维激光扫描技术、立体合成孔径雷达（StereoSAR）技术和干涉合成孔径雷达（InSAR）技术等，极大地提高了测量的工作效率。随着这些新的理论和技术不断完善和成熟，它们已经在经济和社会发展过程中得到了广泛的应用，可以满足经济和社会发展对空间信息快速更新，甚至实时服务的要求。目前，测量技术正朝着自动化和智能化方向发展，这就使人可以从繁重的体力和脑力劳动中解放出来。

根据各种测量技术数据获取方式的差异，可对其进行如下分类：①点方式，即尺规测量、大地测量、工程测量、惯性测量中广泛应用的各种仪器设备，如测量尺、水准仪、经纬仪、全站仪、GNSS定位仪、惯性测量单元（inertial measurement unit, IMU，包括加速度计和陀螺仪）等，都是按照单个点的方式获取位置信息的；②面方式，如摄影测量与遥感技术、三维激光扫描技术、StereoSAR和InSAR技术等，都是以面的方式获取空间位置信息的；③体方式，如CT扫描、核磁共振、三维地震和超声波检测技术等，都是以体的方式获取空间位置信息的。

各种测量技术有着各自的优势，在不同的行业和应用领域中具有重要的应用价值。在以上测量技术中，摄影测量与遥感是利用搭载在各种遥感平台的多种类型的传感器，采用非接触成像的方式记录物体的电磁辐射信息，然后对获取的图像进行一系列的处理和分析，从而确定物体的空间位置及其各种理化属性的科学与技术。其中，摄影测量主要关注的是物体的空间定位问题，即根据传感器获取的图像及其辅助数据，最终生成数字地表模型（digital surface model, DSM）、数字正射影像（digital orthophoto map, DOM）、三维立体模型等产品；遥感则主要关注的是物体属性的确定问题，即根据传感器获取的不同波段（如紫外、可见光、近红外、热红外、太赫兹和微波等）的电磁辐射信息，在对其进行一系列的校正、增强、变换、量化等处理后，从中提取出有用的遥感信息（如实现图像的分类，或得到地物各种量化的理化参数等）。尽管摄影测量与遥感各自关注的问题有所不同，但不管是物体的空间定位，还是其属性的确定，都是对地物空间信息进行

获取的重要组成部分。因此，摄影测量与遥感并不是完全分离的两个学科，而是有着密切联系的两个研究方向，只是它们的关注点不同。

本书将重点关注利用摄影测量技术实现空间定位的相关理论和技术问题，对其他的技术不做介绍。如果读者对其他技术感兴趣，可参考相关的专业资料。下面对摄影测量的发展阶段及其分类进行简要的介绍。

摄影测量的发展历程大致分为三个发展阶段，即模拟摄影测量（1900~1960年）、解析摄影测量（1950~1990年）和数字摄影测量（1980年至今）。其中，在模拟摄影测量阶段，是利用航拍影像，并借助十分精密的光学机械投影设备来模拟摄影成像的过程并还原真实的场景，从而实现摄影测量的。在解析摄影测量阶段，是根据航拍影像，在模/数转换技术和计算机的辅助下，计算出物体的空间位置，从而实现摄影测量的。在数字摄影测量阶段，主要是对数码相机拍摄的数字图像（或者是对航拍影像进行扫描而得到的数字化图像），利用摄影测量中的各种约束，在计算机的辅助下，结合数字图像处理、模式识别、计算机视觉、机器学习等技术，实现对物体的自动定位，而且其输出的产品也主要是数字形式的。

根据数据的获取方式，摄影测量可以分为垂直摄影测量和倾斜摄影测量。垂直摄影测量（也称为正直摄影测量），即要求不同图像的相机主光轴彼此平行且垂直于摄影基线（或者相机主光轴彼此近似平行且垂直于摄影基线）的摄影测量方式，例如，传统的航空摄影测量即属于垂直摄影测量，其数据处理的算法和过程相对比较简单，但在三维立体地物侧面信息的获取方面存在一定的缺陷。倾斜摄影测量，即不同图像的相机主光轴不仅可以像垂直摄影测量那样彼此平行且垂直于摄影基线，而且还可以从任意的倾斜角度获取被拍摄物体图像的摄影测量方式。倾斜摄影测量突破了传统的垂直摄影测量只能从垂直角度拍摄的局限，可以获得更为详细的三维立体地物侧面信息，并可以快速高效地实现三维实景建模和立体测量，但其数据处理算法和过程比垂直摄影测量的复杂得多。近些年来，倾斜摄影测量得到了快速发展，并在精细的三维数字城市模型构建、变形监测等领域发挥了重要作用，该技术的最大优势在于其建模的成本非常低。

根据相机与被拍摄物体的距离，摄影测量可以分为航天摄影测量、航空摄影测量和近景摄影测量。其中，航天摄影测量主要是利用卫星、航天飞机、宇宙飞船等遥感平台进行的，其目的是从宏观尺度上对整个地球表面进行测绘，例如，空间分辨率为 90 m 或 30 m 的 SRTM-DEM 数据就是基于美国国家航空航天局发射的“奋进”号航天飞机上搭载的 SRTM 系统获取的；覆盖全球的空间分辨率为 30 m 的 GDEM 数据是利用 NASA Terra 卫星的 ASTER 传感器获取的；德国宇航中心利用两颗间距不到 200 m 的近地轨道 TanDEM-X 雷达卫星，可获取空间分辨率为 12 m、高程精度为 2 m 的 WorldDEM。航空摄影测量，即利用各种航空平台（如固定翼飞机、直升机、多旋翼飞行器、飞艇、热气球等）进行的摄影测量，其

拍摄的对象主要是区域范围的地表，所以需要从较高的高度进行拍摄，而航空平台的高度通常在 300 m 以上直至大气层的平流层，一些高空侦察机甚至可以到达几万米的高度。受传感器的角分辨率或者瞬时视场角的限制，传感器距离被拍摄物体越远，其获取图像的分辨率越低。因此，为了获取更加清晰的图像，得到更加精细的测量结果，需要从较近的距离进行拍摄，由此产生了近景摄影测量。近景摄影测量，通常指相机与被拍摄物体的距离不超过 300 m 的摄影测量，其主要目的是获取具有极高精度（通常为亚毫米级至厘米级）的单个地物的三维立体模型，所以也称为非地形摄影测量，其数据获取可以用安装到三脚架上的相机、手持设备（如数码相机、手机）、小型航拍设备（如无人机）来实现，其数据获取通常需要采用倾斜摄影方式来实现。根据近景摄影测量的具体应用领域，可将其进一步划分为建筑摄影测量、工业摄影测量、工程摄影测量和生物医学摄影测量等。对建筑摄影测量而言，可获得各种建筑物（如古建筑、雕塑、文物、景观等）的立体模型、观测建筑物变形等；对工业摄影测量而言，可实现大型机械部件加工质量和装配质量的检测（如汽车外壳形状的测定）等；对工程摄影测量而言，可实现爆破量计算、爆破过程演示、采矿区或水利工程的三维立体测量和变形监测等；对生物医学摄影测量而言，可实现人或动物躯体的测量、生物发育过程的监测，以及构建外科、牙科等所需要的特别精细的三维立体模型等。需要注意的是：航天摄影测量、航空摄影测量及近景摄影测量，都既可以采取垂直摄影的方式，又可以采取倾斜摄影的方式成像。此外，有些遥感传感器不是采用传统的框幅摄影方式成像的，如 SPOT 卫星传感器是采用推帚式扫描的方式成像，即在传感器的运动方向上采用扫描的方式成像，而在垂直于运动方向上采用摄影的方式成像，所以需要特别的算法（如有理函数模型）来实现其数据处理。

此外，在 20 世纪 60 年代初，出现了一门新的关于图像处理和定位的学科，它就是计算机视觉。计算机视觉的发展受到了计算机硬件和软件性能的限制，随着计算机性能的不不断提高，一直到了 70 年代后期，当计算机可以满足图像处理的时候，它才受到研究人员的关注并得到了快速发展。计算机视觉领域中许多重要的研究进展都是在 80 年代以后取得的。计算机视觉是人工智能的重要组成部分，它是利用各种成像设备（如照相机和摄像机）代替动物或人的眼睛作为图像获取的手段，并由计算机代替动物或人的中枢神经系统，实现对图像的获取、处理、表达和理解。计算机视觉的最终目标是使计算机能像动物或人一样通过视觉（图像）来观察和理解世界，从而可以根据获取的信息做出各种决策。计算机视觉需要解决基于二维图像实现空间定位和三维场景重建（立体视觉）、目标物体识别（如从图像中找到指定的物体，或者实现更为复杂的人脸、手势、指纹、文字等识别）、目标物体分类、特征（如颜色、大小、形状、纹理、结构等）提取、图像匹配、运动与跟踪等众多的内容，它与数字图像处理、计算机图形学、模式识别、

机器学习、摄影测量与遥感等学科有着密切的联系和交叉。其中，对物体的定位和三维场景重建是计算机视觉领域中的重要研究内容，也是摄影测量关注的内容。

传统的摄影测量主要是根据搭载在各种航空和航天平台的专业量测相机获取的航空图像和卫星图像来完成地形图和各类专题图的制作，从而为测绘行业提供信息服务的技术。传统的摄影测量处理的数据具有很强的针对性，而且需要严格按照一定的规程获取数据，通常还需要一些辅助信息，如相机标定参数、GNSS定位仪和IMU等设备获取相机位置和姿态，以及地面控制点等，以实现后期的数据处理。因此，其适应性和灵活性受到了很大的限制。然而，计算机视觉可以以普通数码相机作为数据获取的设备，对相机的位置和姿态的要求不像航空摄影测量那么严格，但这要求其数据处理算法的适应性必须比传统算法的更强。计算机视觉领域中关于定位的理论，主要是以射影几何为基础的多视图几何理论，以及以数值分析为基础的计算数学理论，这些理论比传统的摄影测量理论更加灵活和先进。

尽管摄影测量和计算机视觉定位在发展的历史背景、相关概念的定义和名称、解决问题的算法、求解的数学方法等方面存在着一定的差异，但这两个研究领域涉及的研究内容和研究目标却有着很大的相似性，本质上它们是一致的，即都是研究如何利用相机获取的二维图像，来确定被拍摄物体和相机本身在三维空间中的精确位置，并实现三维场景的重建。而且，这两个学科之间也在相互借鉴和交叉融合，例如，摄影测量中图像特征点提取、图像匹配等算法都来源于计算机视觉定位领域，而计算机视觉定位中也引入了摄影测量领域最先提出的光束平差算法。随着研究的不断深入，这两个学科的联系必然会越来越紧密。因此，在进行摄影测量研究时必须突破原有的研究思路和方法，本着择优选取的原则，通过借鉴并吸收计算机视觉定位领域中的优秀算法，不断优化和改进传统的数据处理方法，使其具有更强的适应性和稳健性，从而可以更好地实现空间定位。

近些年来，无人机摄影测量和车载摄影测量技术得到了快速发展，它们在现代摄影测量中得到了广泛的应用。无人机可以通过搭载多个相机（包括垂直的和朝向不同方向的倾斜镜头）的方式，或者搭载单个相机并调整镜头观测角度进行多次拍摄的方式，很方便地获取测区内多个倾斜角度的图像；而车载摄影测量系统也可以同时搭载多个朝向不同方向的相机，全方位且高效率地获取街景信息，从而可以方便地实现街道的三维建模。只要有了强大的数据处理软件，即使非专业人员也可以利用普通的数码相机或者手机拍摄的图像，很容易地实现物体的三维建模。目前，已有许多公司开发出了功能强大的实景三维建模商业软件，如Astrium公司（法国）2012年推出的全自动三维模型处理系统街景工厂（Street Factory），Acute 3D公司（法国）2013年推出的Smart3D capture（2015年被美国Bentley公司收购并改名为Context Capture），以及后来的Pix4D公司（瑞士）开

发的 Pix4Dmapper、Agisoft 公司(俄罗斯)开发的 Metashape(原名为 PhotoScan)、SmartEarth 公司(美国)开发的 Photomesh、香港科技大学开发的 Altizure、北京数字绿土科技有限公司开发的 LiMapper、中维空间科技(深圳)有限公司开发的 Pixel-Mosaic 等。与其他三维建模技术(如三维扫描技术)相比,利用摄影测量技术实现实景三维建模的效率高、效果理想,而且其建模的成本非常低。实景三维建模技术在城市三维建模、工程建设、工业设计与制造、逆向工程、医学、动漫制作、文物保护、考古等众多领域都得到了广泛的应用。

从二维图像转换为三维模型的基本过程如下。

(1) 对图像进行稀疏匹配以获取不同图像之间的匹配点,通常采用基于特征的图像匹配算法(如 SIFT、SURF 等)来实现。在该过程中,需要去除错配点和移动物体对应的像点。

(2) 如果事先没有进行相机标定,则需要进行自标定处理,以获取相机内参数(包括镜头畸变参数);如果相机已标定,则可忽略此步骤。

(3) 采用从运动恢复结构(structure from motion, SfM)技术获取相机的相对位置和姿态,并得到所有稀疏匹配点在三维空间的位置,从而得到稀疏点云。在该过程中,需要对相机内参数、外参数和得到的稀疏点云的世界坐标进行光束平差处理,以提高结果的解算精度。

(4) 根据以上步骤得到的结果,对图像进行密集匹配,并对密集匹配点进行前方交会处理,即可确定所有密集匹配点在三维空间的位置,从而得到密集点云。

(5) 根据密集点云实现三维表面重建,以恢复物体表面的形状,生成光滑的、连续(无漏洞)的三维表面模型。

(6) 为了得到更加逼真的三维表面,需要将一幅或多幅纹理图像映射到物体的三维表面上,即纹理映射(或称作纹理贴图)。

(7) 生成数字表面模型(DSM),以及真正射影像图(true digital orthophoto map, TDOM,即在 DSM 的基础上对遮蔽区和阴影进行检测与补偿而得到的正射校正结果)。

(8) 如果需要对模型中物体的长度、方向、面积和体积等进行量测,那么还需要利用一些控制点,对以上结果进行绝对定向处理,从而将模型的世界坐标转换为大地测量坐标系下的结果。注:如果有 GNSS/IMU 设备提供的辅助信息,以及已知的控制点信息,也可以在步骤(3)中直接实现绝对定向处理。

通过以上几个步骤的处理,即可利用一组二维图像构建出被测物体的三维模型。

本书突破了传统摄影测量的相关理论和数据处理方法,大量地吸收了计算机视觉领域中关于空间定位的相关理论,形成了适应性和稳健性更强的图像定位理论和方法体系,从而可以满足基于各种摄影测量手段实现现代摄影测量空间定位的要求。尽管图像稀疏匹配、密集匹配、三维表面重建、纹理映射、DSM 和 TDOM

生成等内容（涉及数字图像处理、计算机图形学、计算机视觉等领域的专业知识）对现代摄影测量是非常重要的，但因为本书重点关注的是现代摄影测量中关于定位的相关理论和方法，所以对以上内容不做详细介绍。如果读者对以上内容感兴趣，请参考其他文献资料的介绍。

## 第2章 现代摄影测量的数学基础

在现代摄影测量的数据处理过程中,几乎所有需要解决的问题都可以转化为数学问题,而数学是解决摄影测量问题最有力的工具。现代摄影测量涉及的数学知识非常广泛,本章就对其中经常涉及的数学知识进行较为系统的介绍,为从事该领域的研究人员提供参考。因为本书不是专业的数学参考书,所以只对现代摄影测量中经常涉及的数学问题进行简要的总结。如果读者对本书涉及的相关数学问题感兴趣,可参考相关的数学专业文献资料,进行更加深入的学习。

### 2.1 线性优化与非线性优化问题

#### 2.1.1 线性优化问题

对线性优化问题,最常用的求解方法是最小二乘法(least squares method, LSM)。其基本思想是:训练样本,利用残差平方和(residual sum of squares, RSS)来描述样本与模型的拟合度,优化目标是使残差平方和最小,即  $\min \text{RSS}(\beta) =$

$\min \sum_{i=1}^n \|y_i - \hat{y}_i\|_2^2$ 。对其具体描述如下。

假设有  $p$  个自变量  $(x_1, x_2, \dots, x_p)$ , 它们与因变量  $y$  之间的数学关系可用一个线性模型来模拟, 即  $y = \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p + \beta_{p+1}$ , 将其写为矩阵的形式:  $y = \beta^T x$ , 其中  $\beta$  为系数向量,  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p, \beta_{p+1})^T$ ,  $x$  为自变量的齐次形式,  $x = (x_1, x_2, \dots, x_p, 1)^T$ 。此外, 假设有  $n$  组样本  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 。利用该样本可

构建以下关系:  $\varepsilon = Y - X\beta$ ,  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ ,  $X = \begin{bmatrix} x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,p}, 1 \\ x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,p}, 1 \\ \vdots \\ x_{n,1}, x_{n,2}, \dots, x_{n,p}, 1 \end{bmatrix}$ ,  $\varepsilon$  为残

差向量。对残差平方和的定义如下:  $\text{RSS}(\beta) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=1}^{p+1} x_{ij} \beta_j)^2 = (Y - X\beta)^T$

$(Y - X\beta) = (X^T X)(\beta^T \beta) - 2(X^T Y)\beta + Y^T Y$ 。RSS( $\beta$ ) 越小, 则表示模型拟合的效果越好。因此, 该优化问题就可转换为  $\min \text{RSS}(\beta)$  问题。因为 RSS( $\beta$ ) 是一个凸二次函数, 所以其一阶导数为 0 的解即为待求的优化结果,  $J = \partial \text{RSS}(\beta) / \partial \beta =$