



利用多探测任务数据建立新一代月球 全球控制网的方案与关键技术

邸凯昌¹ 刘斌¹ 彭嫚¹ 辛鑫¹ 贾萌娜¹ 左维² 平劲松²
吴波³ Oberst Jürgen⁴

1 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室,北京,100101

2 中国科学院国家天文台,北京,100012

3 香港理工大学土地测量及地理资讯学系,香港 九龙 红勘

4 柏林工业大学大地测量与地理信息研究所,德国 柏林,10623

摘要: 目前广泛应用的月球统一控制网 2005 (Unified Lunar Control Network 2005, ULCN2005) 是由 1994 年的克莱门汀 (Clementine) 影像和之前的遥感数据联合平差构建的。提出利用 21 世纪获取的分辨率更高、精度更好的多探测任务数据, 建立新一代月球控制网的方案与关键技术。该方案基于全球覆盖的月球遥感影像与激光高度计数据的联合平差, 同时利用在月球轨道侦察器窄角相机影像上能高精度定位的绝对定位精度在厘米级的 5 个激光棱角反射标志点作为绝对控制。此外, 还通过新的无线电测量方法对嫦娥三号着陆器进行高精度定位, 将其定位结果也作为一个新的绝对控制数据。新一代控制网构建的重点有高精度的轨道器严密及通用成像几何模型的构建、多任务多模态数据间的多尺度特征提取与匹配、最优化多重覆盖影像的选择、全月球整体平差等。基于新的数据和技术, 新一代月球控制网的精度和点的密度有望远超 ULCN2005。

关键词: 月球控制网; 多任务数据; 轨道器影像; 激光高度计; 摄影测量

中图分类号:P231.5

文献标志码:A

作为一种月球参考框架的实现, 月球控制网能提供大地参考椭球及月球制图中的控制点数据, 在科学的研究和工程实施中都具有重要价值。历史上, 人们利用地基望远镜对月球的观测建立了一些站点或局部区域的控制网^[1] (即一些具有一定精度地标点的坐标文件)。20 世纪 60 年代后期, 随着月球探测任务的实施, 基于轨道器影像的摄影测量处理开始应用于月球控制网的构建。利用该方法构建的月球全球控制网包含统一控制网^[2] (the Unified Lunar Control Network, ULCN)、克莱门汀统一控制网^[3] (the Clementine Lunar Control Network, CLCN) 和统一控制网 2005^[4] (the Unified Lunar Control Network 2005, ULCN2005)。其中, ULCN2005 是由 1994 年获取的 43 866 幅克莱门汀影像与之前的摄影数据进行摄影测量平差生成的, 应用最为广泛。控制网提供的 272 931 结果点平面精度在 100 m 至数百米间, 垂直精度在 100 m 量级^[4-5]。

21 世纪初, 很多国家和组织成功发射了一系列新的月球探测器, 推动月球探测进入了新的黄金期。欧洲空间局的 SMART-1、日本的 SELENE、印度的 Chandrayaan-1、美国的月球轨道侦察器 (lunar reconnaissance orbiter, LRO) 以及中国的嫦娥一号 (CE-1)、嫦娥二号 (CE-2) 等轨道器获取了大量的轨道器影像与激光高度计数据^[6]。另外, 中国的嫦娥三号 (CE-3) 成功着陆并开展巡视探测, 也产生了一系列就位精细探测的结果^[7]。

为了在科学的研究和工程任务中充分利用这些多任务、多重覆盖的遥感影像, 能够对其进行对比研究和联合使用, 首先需要将这些数据配准到统一的坐标参考基准中^[8]。月球全球控制网 (Lunar Global Control Network, LGCN) 是这些数据配准的一种最直接的支撑和实现。由于轨道及传感器存在各种各样的误差, 使得这些高分辨率遥感影像普遍存在着几何定位不一致的问题。这些遥感影像与 ULCN2005 也存在较大的不一致。

因此,为更好地支撑月球科学的研究和后续的月球探测工程任务,利用 21 世纪以来获取的多任务、高分辨率数据构建新一代 LGCN 十分必要且意义重大。

相对 20 世纪获取的用于构建 ULCN2005 的遥感数据,新数据在影像分辨率、立体覆盖率、激光高度计的精度和点的密度及轨道姿态测量精度方面都有很大的提高。例如,基于重力重建与内部结构实验室探测器(gravity recovery and interior laboratory, GRAIL)获取的重力场数据^[9],LRO 轨道定轨精度可以达到约 20 m;在利用月球侦察轨道器激光高度计(lunar reconnaissance orbiter laser altimeter, LOLA)数据进行交叉点平差精化后,定轨精度能进一步提高到约 14 m^[10]。另外,由于月球侦察卫星相机窄角影像(lunar reconnaissance orbiter camera narrow-angle camera, LROC NAC)的获取,月球上绝对测量精度在厘米级的 5 个激光棱镜反射标志(lunar laser ranging retro-reflectors, LRRRs)能在高分辨率影像上识别并定位^[11]。因此,这些 LRRRs 在新的 LGCN 构建中可以作为绝对控制点。所有这些有利条件使得现在构建一个比以往的月球控制网精度更高的新一代 LGCN 成为可能。本文提出了利用 21 世纪获取的多任务数据构建新一代 LGCN 的方案和关键技术。

1 新一代 LGCN 数据基础

新一代 LGCN 的构建主要利用 21 世纪获取的多任务轨道器影像和激光高度计数据。

1.1 高分辨率影像数据

1.1.1 CE-2 立体影像数据

CE-2 于 2010-10-01 发射升空,其搭载的高分辨率立体相机在轨道高度为 100 km 和 15 km 时分别获取空间分辨率为 7 m 和 1.05 m 的立体影像^[12]。CE-2 相机在同一焦平面上安装有前视和后视(视角分别为 7.98° 和 -17.2°)两线阵,通过推扫式成像形成前、后视立体影像。两个线阵具有相同的主光轴,焦距同为 144.4 mm,每个线阵都由 6 144 个探元组成。整个任务期间共获取了 607 轨影像数据,其中 7 m 分辨率的数据完成了全月的立体覆盖,1.05 m 分辨率数据获取于 CE-3 预选着陆区^[13]。到目前为止,CE-2 是分辨率最高的能全球覆盖的立体影像。

在之前的研究中,文献[14]开发出了一种自检校的光束法平差方法,使得 CE-2 立体影像同

轨和轨间的反投影残差从 20 个像素减少到子像素级,其与 LOLA 数据的不一致性也缩减到 9~10 m。文献[15]使用 384 个条带的 CE-2 立体影像,制作了全月的正射影像(digital orthophoto map, DOM)和数字高程模型(digital elevation model, DEM)。利用激光反射棱镜点作为检查,平面位移为 21~97 m,高程误差为 2~19 m。与 LOLA 数据的 DEM 对比,高程误差平均值为 43 m,均方差为 110 m。

CE-2 数据具有高分辨率和全球的立体覆盖特性,因此在新一代月球控制网构建中将作为主要的影像数据。

1.1.2 LROC NAC 影像

NASA 的 LRO 于 2009 年 6 月发射升空,进入轨道高度为 30~50 km 的极轨轨道。LRO 上搭载的相机(LROC)中包含了一台宽角相机(wide-angle camera, WAC)和两台窄角相机(NAC)^[16]。WAC 能获取分辨率为 100 m、幅宽为 100 km 的影像。NAC 能获取分辨率高达 0.5~2 m 间的幅宽为 5 km 的影像。美国宇航局基于 WAC 影像制作了分辨率为 100 m 的几乎覆盖全月的地形模型 GLD100^[17]。

LROC NAC 影像被广泛应用于区域(如历史着陆区和未来任务的预选着陆区)三维制图中。目前为止,LROC NAC 影像已覆盖了接近全月 99% 的范围,但是只有 4% 的立体覆盖。利用 LROC NAC 重叠区特征拼接的全月拼图可以通过 Lunaserv MapServer 获取^[18]。由于 LROC NAC 影像目前是能获取的月面上分辨率最高的轨道器影像,因此其在新一代控制网构建中也是重要的数据源。

1.1.3 SELENE 地形相机影像

SELENE 于 2007 年 9 月发射升空,所搭载的两线阵推扫式地形相机(terrain camera, TC)在 100 km 的轨道上获取了分辨率为 10 m 的全月覆盖超过 99% 的立体影像。文献[19]对 TC 相机进行内检校及安装角校正,从而降低了 TC DEM 与激光高度计测量数据间的不一致性。在此基础上,生产了全球分辨率为 1 024 像素/(°)(赤道为 30 m/像素)的 DEM 和 DOM。SELENE TC 影像分辨率稍低于 CE-2 卫星影像,在新一代控制网构建中可以作为补充数据。

1.2 激光高度计数据

LRO 搭载的另外一个重要载荷是激光高度计 LOLA,LOLA 每次发射 5 个激光点,点间的距离约为 56 m,沿轨方向发射间距约为 10~12 m。

利用 LOLA 激光点生产的各种分辨率的 DEM 也已公布并可公开下载。如利用 2009 年 7 月到 2013 年 7 月间 65 亿个激光测量点生产的全球 256 像素/°(赤道上 118 m/像素)^[20]、全球分辨率为 1 024 像素/°(赤道 30 m/像素)的高分辨率的 LDEM_1024^[20]。

目前,文献[21]利用 SELENE TC DEM 与 LOLA 激光高度计进行配准融合生产了新的 DEM (SLDEM2015)。SLDEM2015 覆盖月球南北纬 60°,分辨率为 512 像素/°(赤道约为 60 m/像素),DEM 与 LOLA 激光轨迹间的均方根误差在 3~4 m。

截至 2016 年 3 月,LOLA 已经获取了约 68 亿个激光测量数据,这一数量随着载荷继续工作还将持续增加^[22]。LOLA 数据将是新一代控制网构建中的主要高程数据。

1.3 绝对控制点

在影像区域网平差中,引入绝对控制点不仅能提高精度,还能提高解的稳定性,因此绝对控制点的获取也非常关键。阿波罗 11、14、15 号及月球车 1 号和 2 号上分别搭载了共 5 个 LRRRs。经过长期的测量,LRRRs 的绝对定位精度能达到厘米级^[11]。由于以往的影像分辨率不足,很难在影像上精确定位这些 LRRRs,因此之前的月球控制网的构建中未采用这些 LRRRs 作为平差的绝对控制。随着获取的遥感影像分辨率的增加,特别是 0.5 m 分辨率 LROC NAC 影像的获取,使得我们能在影像上识别和高精度定位这些 LRRRs^[11-12],也使得利用这些点作为绝对控制成为可能。因此,新一代 LGCN 构建中应采用这些激光反射棱镜标志点作为绝对控制点。

目前,一种新的无线电相位测距方法能对 CE-3 着陆器进行高精度的定位^[23],随着对着陆器的重复观测和定位精度的提升,在新一代 LGCN 的构建中,CE-3 着陆点可作为一个新的绝对控制点。

月面着陆器上可以设置多频点微波信标,类似于地球上的逆向微波多普勒导航,也可以提供地基 VLBI 观测信号,即可以作为微波频段的绝对控制点。CE-3 的 VLBI 信标工作模式之一,即可以提供精密测量的机会。另外,俄罗斯的新一轮月球探测计划中,安排了 S、X、Ka 频段的多波段信标,搭载超稳振荡器提供高精度的测量频率参考,预期可以在月球的极区提供这类新类型的绝对控制点。

2 新一代 LGCN 总体方案与关键技术

2.1 总体方案技术框架

新一代控制网基于全球覆盖的影像与激光高度计数据整体摄影测量平差处理实现,5 个 LRRRs 和 CE-3 着陆器将作为全球平差中的绝对控制。图 1 为整体方案的技术框架。

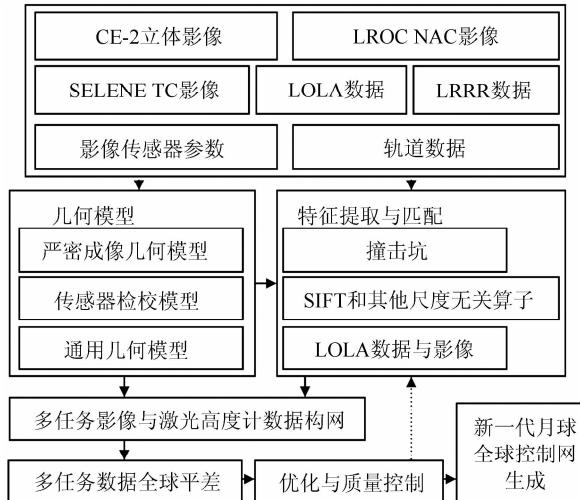


图 1 总体技术框架

Fig. 1 Overall Technical Framework

月球全球控制网的构建涉及到一系列摄影测量和相关的关键技术,其中一些关键技术仍有待研发、提高并集成。其中包含严密及通用成像几何模型构建、多任务异源数据间的多尺度特征提取与匹配方法、多重覆盖下最优影像选择、大尺度区域网平差等,下面对这些关键技术展开论述和探讨。

2.2 关键技术

2.2.1 轨道器影像几何模型构建

成像几何模型是轨道器数据几何处理的基础,国际国内多个研究团队利用轨道器影像的内外方位元素,基于共线方程已构建了各任务影像的严密成像几何模型^[14,19,24-26]。

严密模型构建分内定向和外定向两个部分。内定向是指利用定标得到的传感器内方位元素将影像像素坐标转换为以像主点为中心的影像焦平面坐标,由于传感器的设计不同,各种传感器的内定向参数和内定向方法也不尽相同。外定向是指利用轨道器定轨定姿得到的传感器的外方位元素将焦平面坐标转换为物方三维坐标(如月固坐标系坐标)。对于推扫式成像的轨道器,每个扫描行都有不同的外方位元素,在局部区域内一般用时

间的多项式来拟合。

严密成像几何模型通常比较复杂,不同的传感器有不同的严密成像几何模型。同一任务同一传感器影像平差可以用严密成像几何模型;在不同任务不同传感器数据间平差时,严密成像几何模型平差将非常复杂。

有理函数模型 (rational function model, RFM) 是一种对地观测中常用的通用成像几何模型。RFM 是严密成像几何模型的数学拟合,具有与平台无关、结构简单和计算高效等特点^[27]。目前,文献[28-29]研究了有理函数模型在 LROC NAC、CE-1、CE-2 和火星 HiRISE、高分辨率立体相机 (high resolution stereo camera, HRSC) 轨道器影像中的适用性。实验表明,传统的有理函数模型在积分时间无跳变情况下,拟合严密成像几何模型的残差为 1/100 个像素左右,在 HRSC 和 CE-2 RFM 构建中,时间变量 RFM 和虚拟重成像两种方法均能有效解决因积分时间跳变引起的传统 RFM 拟合精度不足的问题^[29]。

2.2.2 多任务影像与激光高度计数据构网

全球覆盖的影像与激光高度计数据构网的摄影测量平差是构建新一代 LGCN 的关键。构网是利用大量均匀分布的连接点 (同名特征点) 对各影像数据进行连接。由于多任务影像间具有不同的分辨率 (如 0.5 m 分辨率的 LROC NAC 影像与 7 m 分辨率的 CE-2 影像)、像素纵横比、影像指向角、光照条件等,使得提取并匹配特征点变得很困难。我们建议利用撞击坑特征、尺度无关特征算子等进行异源影像的匹配。

撞击坑是月球表面最常见的地貌特征,目前已有很多基于影像或 DEM 的自动提取或识别撞击坑的方法^[30]。利用少量的人工编辑干预,可以在不同分辨率影像上提取简单的“碗形”撞击坑,然后利用最小二乘拟合获取这些撞击坑的中心和大小 (半径)。最后根据分布模式进行撞击坑匹配,并利用 RANSAC 剔除粗差。这些匹配好的撞击坑中心点即为影像的连接点。

尺度不变特征转换 (scale-invariant feature transform, SIFT) 是一种常用的具有尺度与旋转不变性的特征描述子^[31],利用特征向量的欧氏距离可以对 SIFT 特征点进行匹配。在撞击坑数量少的区域,SIFT 特征点可以作为一种补充。另外,对比 SURF (speeded up robust features)^[32] 和 AKAZE^[33] 等其他一些尺度不变的特征算子,这些算子匹配的特征点也可作为补充,以获取更多的连接点。

激光测高数据与影像的匹配由于其异质性是一项具有挑战性的技术问题。一种可行的方法是通过激光高度计生成的 DEM 作为“桥梁”,首先利用地形阴影图技术生成仿真影像,将 LOLA DEM 或者 SLDEM2015 的高程信息转化为与影像相同光照条件下的灰度信息,然后利用仿真影像与真实影像进行影像间的匹配,从而达到激光高度计数据与影像匹配的目的。

2.2.3 多重覆盖下最优影像选择

随着多个月球轨道器持续地获取影像,很多区域都被同一或不同的轨道器影像覆盖多次,如何在这些多重覆盖的影像中选择出定位精度最高的最优影像组合是一项非常重要的工作。

为了自动选择出多重覆盖中最优的立体像对,文献[34]提供了以考虑影像重叠区、影像立体“强度”、空间分辨率和光照条件及成像波段间的一致性等准则的参考方法。

本文通过实验分析方法,以 CE-3 着陆区多重覆盖的 LROC NAC 影像为实验数据,进行了多重覆盖定位精度分析。结果表明,利用多重覆盖影像的定位结果几乎优于所有的立体像对的组合精度,同时部分影像的组合精度优于所有影像一起平差的精度^[35]。在此基础上,提出了一种启发式的多重影像选择方法进行最优影像组合的选择,获取了多重覆盖下最高定位精度。进一步的验证和改进后,将应用在新一代 LGCN 构建的影像选择与影像构网中。

在一些特定情况下,轨道器的震动会引起影像“颤振”效应,从而影响影像质量及定位精度。因此,在影像选择中,应考虑剔除受“颤振”影响的影像。

2.2.4 全球多任务数据的平差

全月多任务影像与激光高度计数据联合平差是新一代 LGCN 构建的技术核心。考虑到全球多源影像平差的复杂性,整体平差将基于 RFM 进行。RFM 参数 (rational polynomial coefficients, RPCs) 来源于对各影像严密成像几何模型的拟合,为了使参与平差的 RPCs 具有足够的精度,将利用在全月分区光束法平差对轨道姿态等外方位元素进行精化。

整个月球被划分为一些重叠的区域,每个区域中都包含多重覆盖的影像,区域与区域间也存在一定的重叠度。在区域内,不同任务的影像 (如 CE-2 或 SELENE) 首先在 LOLA 高程约束下进行严密模型的光束法平差,同任务立体影像与 LOLA 的平差方法可以参照文献[25]的方法,同

任务影像间还可以利用自检校光束法平差^[14]来提高内方位元素的精度。由于 LOLA 作为参考数据,而 LRO 轨道姿态参数已经经过精化,所以 LROC NAC 影像不参与该阶段的处理。但是在 RPCs 生成的过程中,应该考虑其新的在轨检校参数^[24,26]。

在分区光束法平差后,内外方位元素都已被精化,因此同一任务同轨和相邻异轨影像间定位的不一致性会消除或缩小。前方交会的三维点与 LOLA 点间的一致性也变得更好。基于精化后的内外方位元素,最小二乘拟合出新的 RPCs^[29]。

多任务影像间定位的不一致性通过各任务数据自身基于 LOLA 参考的分块区域网平差已得到一定程度的消除或缩减,而全球的整体平差会进一步消除多任务数据间的不一致性。根据前述相关研究结果,在分区平差中,影像的反投影误差能达到子像素。LRO 轨道精化后精度为 14 m,因此利用 LOLA 作为参考,分区平差的三维精度在物方坐标系下(如在月固坐标系下)有望达到 20 m。

在分区平差的基础上进行全月多任务影像与激光高度计数据联合平差解算。其中 3 类连接点将参与平差,包含同条带立体影像间的连接点、相邻条带影像的连接点和不同任务数据间的连接点。各连接点的权值通过匹配精度、分辨率等相关的先验信息获取。全球平差中的未知数包含了连接点的物方坐标和模型改正参数(如 RFM 的像方仿射变换参数)。通过约束 LOLA 地形与连接点平差后三维坐标的内插地形在局部区域的一致性,实现 LOLA 点在全球平差中的高程控制。

LOLA 点参与到全球整体平差的方式依然是值得研究的课题。在之前的研究中,LOLA 点通过严密成像几何模型反投影到像方并作为观测值进行平差,由于影像模型本身的精度,LOLA 点只在局部区域内进行了较小的调整^[25];考虑 LOLA 点已经在分块区域平差中作为参考数据以及全球平差巨大的运算量,将研究和验证 LOLA 点坐标在全月整体平差是否需要作为带权观测值改正。

与分区平差相比,全月整体平差还需要加入 LRRRs 与 CE-3 着陆点的绝对控制,平差后点的绝对定位精度有望达到 20~30 m,将远超 ULCN 2005 控制网的精度。

由于全球平差涉及到大量的观测值和未知数,大型稀疏矩阵的稳健高效求解也是值得进一步研究和改进的关键技术之一。

作为全月整体平差的结果,连接点的三维坐

标及其对应在影像上的影像坐标作为新一代 LGCN 的基本组成部分,还可以匹配更多的特征点,利用精化后的模型通过多片空间前方交会求取三维坐标点,进行 LGCN 点的加密。显然,新一代 LGCN 将比 ULCN2005 具有更密集的控制点。

3 结语

在海量覆盖全月的高分辨率影像及激光高度计数据持续获取的情况下,利用 21 世纪多任务数据构建新一代全月控制网是完全可行的,考虑到科学的研究和工程任务的应用需求,这项任务也是十分迫切的。本文提出了构建新一代 LGCN 的整体方案,详细阐述了涉及到的数据,讨论了相关关键技术,供后续的研究和实施参考。

新一代全月控制网的构建不仅涉及提高和集成各种摄影测量处理技术,还涉及海量数据的处理。因此需要充足的经费支持和多团队的共同合作,特别涉及到多任务数据结合应用时,国际间的合作不可或缺。

参 考 文 献

- [1] Schimerman L A. Lunar Cartographic Dossier, Volume I [R]. NASA and the Defense Mapping Agency, St. Louis, Missouri, USA, 1973
- [2] Davies M E. The Unified Lunar Control Network [J]. *Journal of Geophysics Research*, 1994, 99 (E11): 23 211-23 214
- [3] Edwards K E. Global Digital Mapping of the Moon [C]. The 27th Annual Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Texas, USA, 1996
- [4] Archinal B A, Rosiek M R, Kirk R L, et al. The Unified Lunar Control Network 2005 [OL]. <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1367/ULCN2005-OpenFile.pdf>, 2006
- [5] Archinal B A, Rosiek M R, Kirk R L, et al. Final Completion of the Unified Lunar Control Network 2005 and Topographic Model [C]. The 38th Lunar and Planetary Science Conference, League City, Texas, USA, 2007
- [6] Di Kaichang, Liu Bin, Liu Zhaoqin, et al. Review and Prospect of Lunar Mapping Using Remote Sensing Data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1 230-1 242(邸凯昌, 刘斌, 刘召芹, 等. 月球遥感制图回顾与展望 [J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1 230-1 242)
- [7] Liu Z, Di K, Peng M, et al. High Precision Landing Site Mapping and Rover Localization for

- Chang'E-3 Mission[J]. *Science China-Physics Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(1): 1-11
- [8] Kirk R, Archinal B, Gaddis L, et al. Lunar Cartography: Progress in the 2000s and Prospects for the 2010s[J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, 39(B4): 489-494
- [9] Zuber M T, Smith D E, Watkins M M, et al. Gravity Field of the Moon from the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) Mission[J]. *Science*, 2013, 339(6 120): 668-671
- [10] Mazarico E, Rowlands D D, Neumann G A, et al. Orbit Determination of the Lunar Reconnaissance Orbiter[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(3): 193-207
- [11] Liu Bin, Di Kaichang, Wang Baofeng, et al. Positioning and Precision Validation of Chang'E-3 Lander Based on Multiple LRO NAC Images[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(28-29): 2 750-2 757 (刘斌, 邝凯昌, 王保丰, 等. 基于 LRO NAC 影像的嫦娥三号着陆点高精度定位与精度验证[J]. 科学通报, 2015, 60(28-29): 2 750-2 757)
- [12] Zhao B, Yang J, Wen D, et al. Overall Scheme and On-orbit Images of Chang'E-2 Lunar Satellite CCD Stereo Camera[J]. *Sci China Technol Sci*, 2011, 54(9): 2 237-2 242
- [13] Zuo W, Li C L, Zhang Z B. Scientific Data and Their Release of Chang'E-1 and Chang'E-2[J]. *China J Geochem*, 2014, 33: 24-44
- [14] Di K, Liu Y, Liu B, et al. A Self-calibration Bundle Adjustment Method for Photogrammetric Processing of Chang'E-2 Stereo Lunar Imagery[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(9): 5 432-5 442
- [15] Li C L, Ren X, Liu J J, et al. A New Global and High Resolution Topographic Map Product of the Moon from Chang'E-2 Image Data[C]. The 46th Lunar Planetary Science Conference, Woodlands, Texas, USA, 2015
- [16] Robinson M, Brylow S, Tschimmel M, et al. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) Instrument Overview[J]. *Space Science Reviews*, 2010, 150: 81-124
- [17] Scholten F, Oberst J J, Matz K D, et al. GLD100: The Near-Global Lunar 100 m Raster DTM from LROC WAC Stereo Image Data[J]. *Journal of Geo-physical Research*, 2012, 117(E12): E00H17, DOI: 10.1029/2011JE003926
- [18] Estes N M, Hanger C D, Licht A A, et al. Lunaserv Web Map Service: History, Implementation Details, Development, and Uses[C]. The 44th Lunar Planet Sci Conf, Woodlands, Texas, USA, 2013
- [19] Haruyama J, Hara S, Hioki K, et al. Lunar Global Digital Terrain Model Dataset Produced from SELENE (Kaguya) Terrain Camera Stereo Observations[C]. The 43rd Lunar and Planetary Science Conference, Woodlands, Texas, USA, 2012
- [20] Smith D E, Zuber M T, Jackson G B, et al. The Lunar Orbiter Laser Altimeter Investigation on the Lunar Reconnaissance Orbiter Mission[J]. *Space Science Review*, 2010, 150: 209-241
- [21] Barker M K, Mazarico E, Neumann G A, et al. A New Lunar Digital Elevation Model from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and SELENE Terrain Camera[J]. *Icarus*, 2016, 273: 346-355
- [22] Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, et al. Summary of the Results from the Lunar Orbiter Laser Altimeter After Seven Years in Lunar Orbit[J]. *Icarus*, 2017, 283: 70-91
- [23] Ping J S. Experiment of Lunar Radio Phase Ranging Using Chang'E-3 Lander[C]. The 47th Lunar and Planetary Science Conference, Woodlands, Texas, USA, 2016
- [24] Speyerer E J, Wagner R V, Robinson M S, et al. Pre-flight and Onorbit Geometric Calibration of the Lunar Reconnaissance Orbiter Camera[J]. *Space Science Reviews*, 2016, 200: 357-392
- [25] Wu B, Hu H, Guo J. Integration of Chang'E-2 Imagery and LRO Laser Altimeter Data with a Combined Block Adjustment for Precision Lunar Topographic Modeling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 391: 1-15
- [26] Wu B, Liu W C. Calibration of Boresight Offset of LROC NAC Imagery for Precision Lunar Topographic Mapping[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 128: 372-387
- [27] Liu Y, Di K. Evaluation of Rational Function Model for Geometric Modeling of Chang'E-1 CCD Images[J]. *International Achieves of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2011, 38: 121-125
- [28] Liu B, Liu Y, Di K, et al. Block Adjustment of Chang'E-1 Images Based on Rational Function Model[C]. The 18th National Symposium on Remote Sensing of China, Beijing, 2014
- [29] Liu B, Xu B, Di K, et al. A Solution to Low RFM Fitting Precision of Planetary Orbiter Images Caused by Exposure Time Changing[J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, 43: 441-448

- [30] Kang Z, Luo Z, Hu T, et al. Automatic Extraction and Identification of Lunar Impact Craters Based on Optical Data and DEMs Acquired by the Chang'E Satellites[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(10): 4751-4761
- [31] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110
- [32] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. SURF: Speeded Up Robust Features[J]. *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*, 2008, 110(3): 346-359
- [33] Alcantarilla P F, Nuevo J, Bartoli A. Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces[C]. British Machine Vision Conference, Bristol, UK, 2013
- [34] Becker K J, Archinal B A, Hare T M, et al. Criteria for Automated Identification of Stereo Image Pairs[C]. The 46th Lunar and Planetary Science Conference, Woodlands, Texas, USA, 2015
- [35] Di K, Xu B, Liu B, et al. Geopositioning Precision Analysis of Multiple Image Triangulation Using LRO NAC Lunar Images[C]. The 23rd ISPRS Congress, Commission IV, Prague, Czech, 2016

Scheme and Key Techniques for Construction of New-Generation Lunar Global Control Network Using Multi-Mission Data

DI Kaichang¹ LIU Bin¹ PENG Man¹ XIN Xin¹ JIA Mengna¹ ZUO Wei² PING Jinsong²
WU Bo³ OBERST Jürgen⁴

1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

3 Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, China

4 Institute for Geodesy and Geoinformation Science, Technical University of Berlin, Berlin 10623, Germany

Abstract: The widely used Unified Lunar Control Network 2005 (ULCN2005) was built based on a combined photogrammetric solution of Clementine images acquired in 1994 and earlier photographic data. In this paper, we present a scheme and key techniques for construction of a new-generation lunar global control network using multi-mission data newly acquired in the 21st century, which have much better resolution and precision than the old data acquired in the last century. The new control network will be based on a combined photogrammetric solution of an extended global image and laser altimetry network. The five-lunar laser ranging retro-reflectors, which can be identified in LROC NAC images and have centimeter-level 3D position accuracy, will be used as absolute control points in the least squares photogrammetric adjustment. Recently, a new radio total phase ranging method has been developed and used for high-precision positioning of Chang'E-3 lander; this shall offer a new absolute control point. Systematic methods and key techniques will be developed or enhanced, including rigorous and generic geometric modeling of orbital images, multi-scale feature extraction and matching among heterogeneous multi-mission remote sensing data, optimal selection of images at areas of multiple image coverages, and large-scale adjustment computation, etc. Based on the high-resolution new datasets and developed new techniques, the new generation of global control network is expected to have much higher accuracy and point density than the ULCN2005.

Key words: lunar control network; multi-mission data; orbital imagery; laser altimetry; photogrammetric solution

First author: DI Kaichang, PhD, professor, specializes in planetary remote sensing and planetary science. E-mail: dikc@radi.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41671458, 41590851, 41771490.