



多源激光公路测绘体系中的精度控制

四川省公路规划勘察设计研究院有限公司

易菊平





主要内容：

- 1 检定、溯源与多源激光公路测绘体系
- 2 兼顾精度、效率、行业需求的激光测绘设备选型
- 3 公路测绘的主力测绘仪器及其检定和量值溯源
- 4 多源激光综合应用的基准设置与精度控制
- 5 激光测绘成果的应用





1 检定、溯源与多源激光公路测绘体系

1.1 设备检定与公路测绘

检定要求

- 国家或行业检定标准、规程
- 国家法定的权威检定机构
- 与国家高等级量值相联系

检定的目的

- 确保计量器具能够完全满足检定规程的要求
- 确保计量器具在工作过程中所测量数据的准确性





1 检定、溯源与多源激光公路测绘体系

1.2 激光雷达与公路测绘

- 测绘成果是公路勘测设计的基础资料；
- 用户需求升级和市场竞争加剧对测绘成果的精度和获取效率提出了更高要求；
- 激光雷达作为一种新型测量设备，其突出的优点，能较好满足这些需求，近几年来在公路项目中得到了广泛应用。
- 主要优点：非接触式主动测绘，对交通、视角等依赖小；对天气依赖小，不受光照的限制，可在阴天甚至夜间工作；成果点密度高、精度高；能快速采集多种数据；





1 检定、溯源与多源激光公路测绘体系

1.3 多源激光公路测绘体系

- 根据载体平台的不同，公路测绘中常用的激光雷达有机载、车载、背包、站式等不同形式，各有不同的适应性；
- 机载适合大范围数据获取，车载适合车辆可以通行区域及其周边范围的数据获取，站式和背包适合局部小范围或是对机载和车载漏洞的一个补充；
- 为了全面发挥激光测绘的优势，我们构建了一个“多源一体”的公路激光测绘体系。
- 在这个体系中，为了达到预期的精度目标，需要统筹考虑设备选型、基准传递、精度指标的分配以及精度保障措施的实施。



2 兼顾精度、效率和行业需求的激光测绘设备选型

2.1 设备选型的要求

- 1、适应公路行业特点和需求：多阶段、不同部位；不同成果形式、不同精度要求；
- 2、兼顾精度与效率：
- 3、适合使用者的特点：系统的集成度高，外业操作简单
- 4、适合轻型航空器搭载：体积、重量、功耗不大

2 兼顾精度、效率和行业需求的激光测绘设备选型

2.2 设备选型

- 综合以上要求，选择了一款高精度、高点密度的中低空设备——Optech的Eclipse





2 兼顾精度、效率和行业需求的激光测绘设备选型

2.3 设备基本参数特点

- 1、测程：50~1000米（成果指标、航空器性能、气象条件共同决定常用作业高度）
- 2、激光等级：一级（人眼安全）
- 3、精度：平面 $1/3500$ *相对航高，高程3cm~7cm（高程精度高）
- 4、脉冲频率：有效值300kHz（成果点密度大）
- 5、效率：扫描幅宽=1.1*相对航高
- 6、操作：可一键启停
- 7、载荷：传感器功耗200瓦，重量30kg，尺寸35cm*32cm*29cm，适合轻型航空器搭载



3 公路测绘的主力测绘仪器及其检定和量值溯源

3.1 传统测量仪器

- GNSS、全站仪、水准仪、测距仪等。一般是原理简单的单一系统。
- 这类仪器目前我国属于强制检定设备，定期检定由国家权威检定机构按照国家或行业检定标准、规程来执行。



3 公路测绘的主力测绘仪器及其检定和量值溯源

3.2 新型测绘仪器

- 激光雷达扫描设备、倾斜摄影设备等。一般由多个功能不同的子系统组合而成。
- 激光雷达包括惯性测量系统、GNSS测量系统、扫描系统和激光测距系统。
- 部分子系统无强制检定规定，部分子系统用户难以自行检定。



3 公路测绘的主力测绘仪器及其检定和量值溯源

3.3 激光雷达系统的检定与量值溯源

- 目前还没有国家或行业检定标准或规程，也没有权威的检定机构来做整体系统的量值溯源工作。
- 激光雷达设备除了出厂或返厂维修时的全系统检定由厂家在特定检定场完成外，用户只能按照厂家推荐的校准方案完成部分子系统的定期校准和验证工作。
- 激光雷达设备的检定不具备国家法定性、强制性和权威性。国内的量值溯源在这一块还存在着若干空缺。
- 目前只能将独立分系统就近归类检定，并通过空间位置的传递对结果的综合误差进行综合校正。

4 多源激光综合应用的基准设置与精度控制

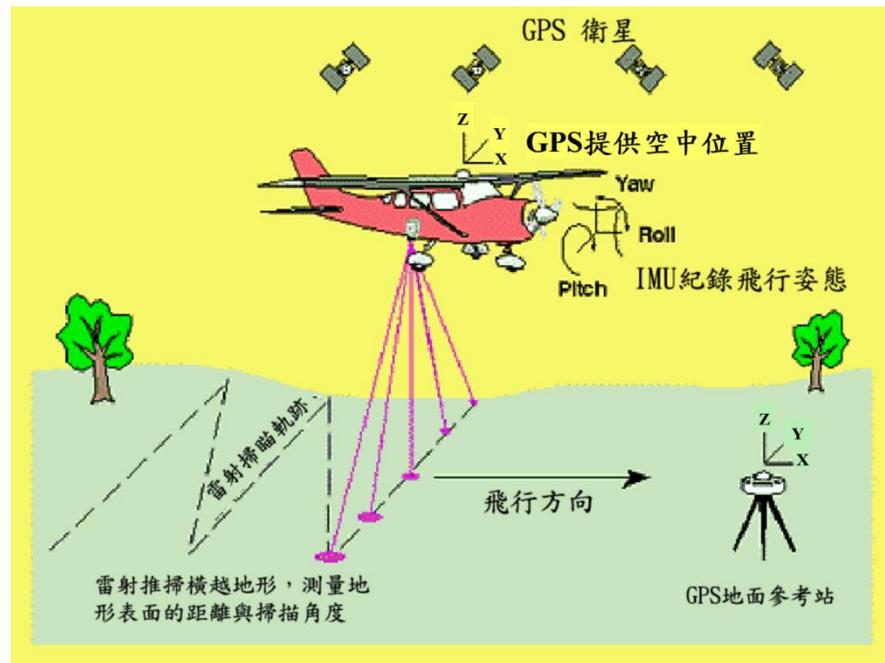
4.1 多源激光雷达的基准统一和传递

- 激光雷达数据的成果主要表现为空间位置信息，检测其数据的精度需要与控制点进行比较，因此需要有统一的高精度基准。
- 不同手段采集的激光点云只有纳入一个统一的坐标基准中，才能实现互相精准融合，才能构建“多源一体、优势互补”的公路激光测绘体系。

4.1 多源激光雷达的基准统一和传递

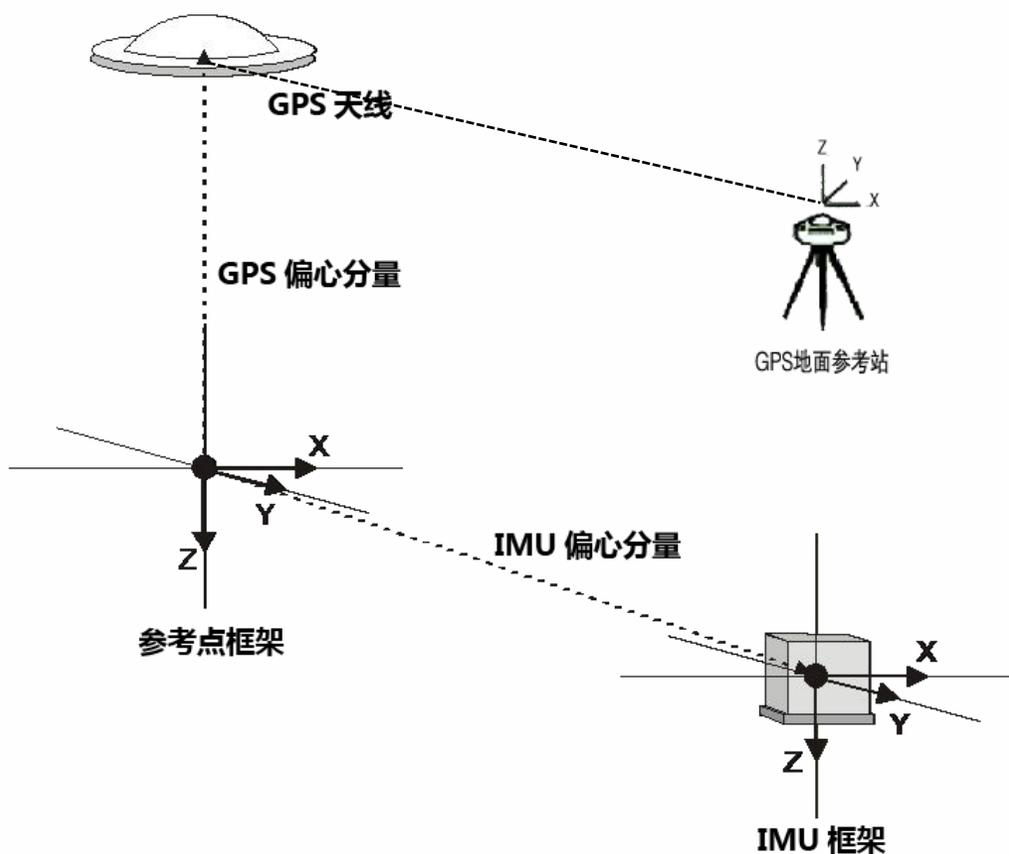
机载激光雷达 (LiDAR) 的系统组成

LiDAR是Light Detection And Ranging (光波探测与测距) 的缩写, 以激光作为工作媒介来测量。系统构成包括激光扫描系统、定位系统GNSS、惯性测量系统IMU。



- 机载GPS以高频率记录飞行位置信息
- IMU以高频率记录飞行姿态信息
- 激光扫描系统记录测距和扫描角度信息

4.1 多源激光雷达的基准统一和传递



机载LiDAR基准统一与传递

- 三者之间的基准统一归算到激光扫描器参考点，并通过地面参考站控制点进行传递。
- 地面GPS、机载GPS、IMU融合解算求出各时刻传感器轨迹。轨迹包含时间、位置和姿态。
- 扫描测距数据与轨迹数据联合结算，得出每个地面点的三维坐标XYZ (LAS点云)



4.1多源激光雷达的基准统一和传递

车载、背包、站式激光的基准统一与传递

- 车载LiDAR:

与机载LiDAR构成基本一致，不同的是载体。开阔地区测量基准传递与机载LiDAR类似。短暂隐蔽区域依靠惯性定位及地面控制来解决。

- 背包LiDAR:

有良好GPS信号的区域：与机载类似；

隐蔽遮挡位置：没有定位信息，通过标靶和控制点与已有基准联系；
多线扫描可采用SLAM技术。

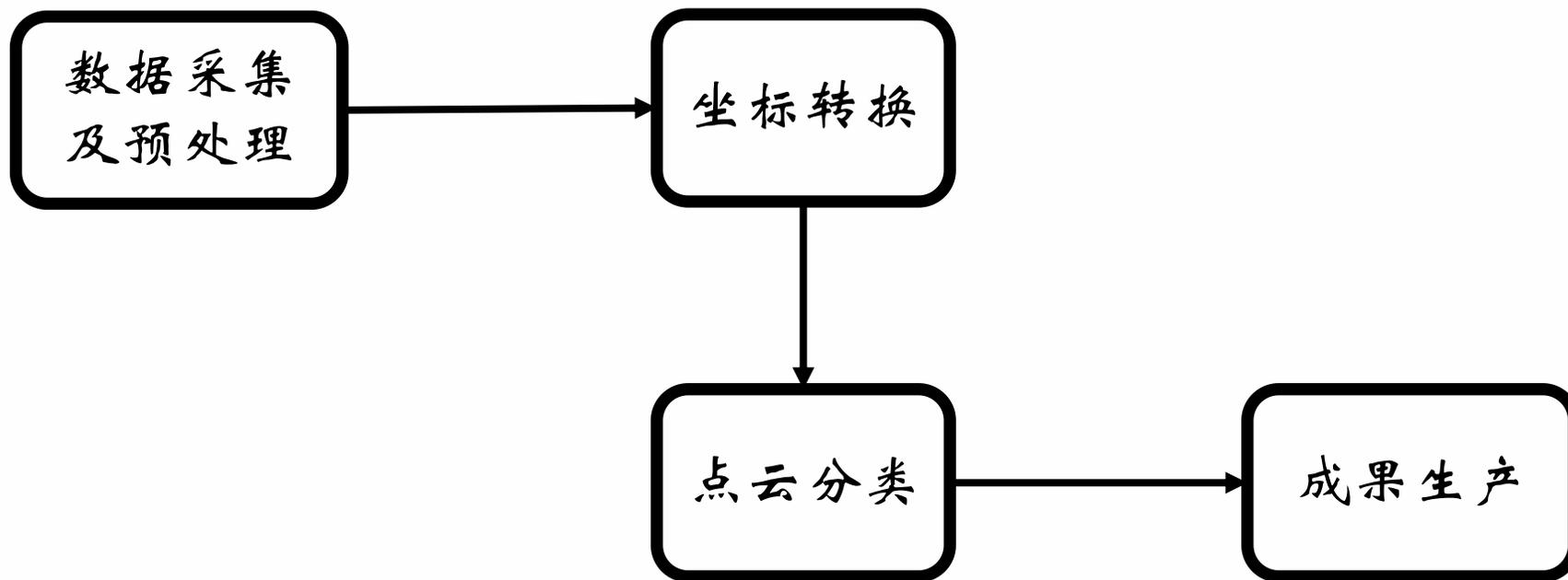
- 站式LiDAR:

一般没有POS装置，只通过标靶和控制点与已有基准联系。



4.2 工序之间精度指标的合理分配

激光雷达数据生产工序



4.2 工序之间精度指标的合理分配

各个工序的精度指标分配

- 激光测绘的工序较多，既包含传统测绘手段，也包含惯性测量、GNSS测量、激光扫描等新型测绘手段。成果的精度由所有生产工序共同决定，各环节的误差不是简单的累加，二是遵循误差传播率。

- 误差传播率公式： $Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$,

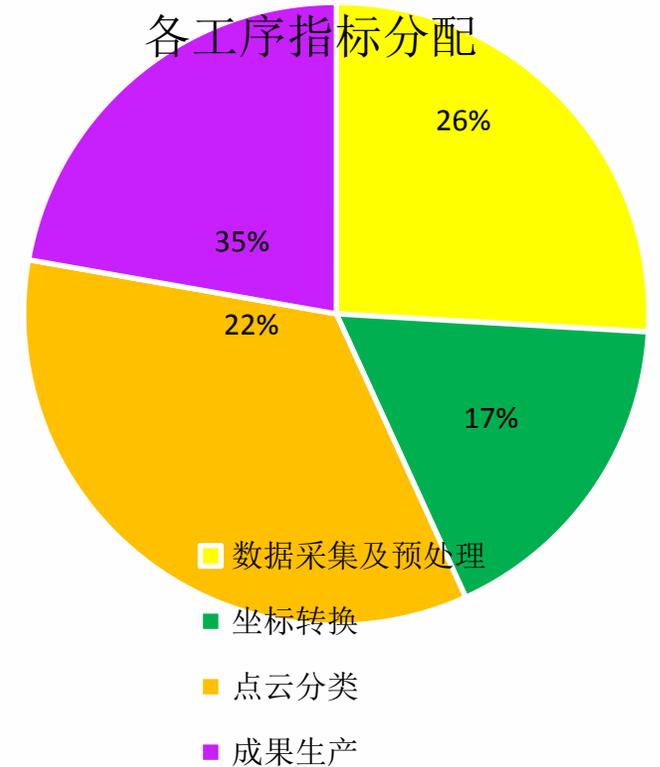
$$m_z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 m_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 m_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m}\right)^2 m_m^2}$$

- 根据最终成果的精度要求和各工序精度消耗的特性和代价，对各工序的精度指标进行合理的分配，才能获得最佳性价比和效率。

4.2 工序之间精度指标的合理分配

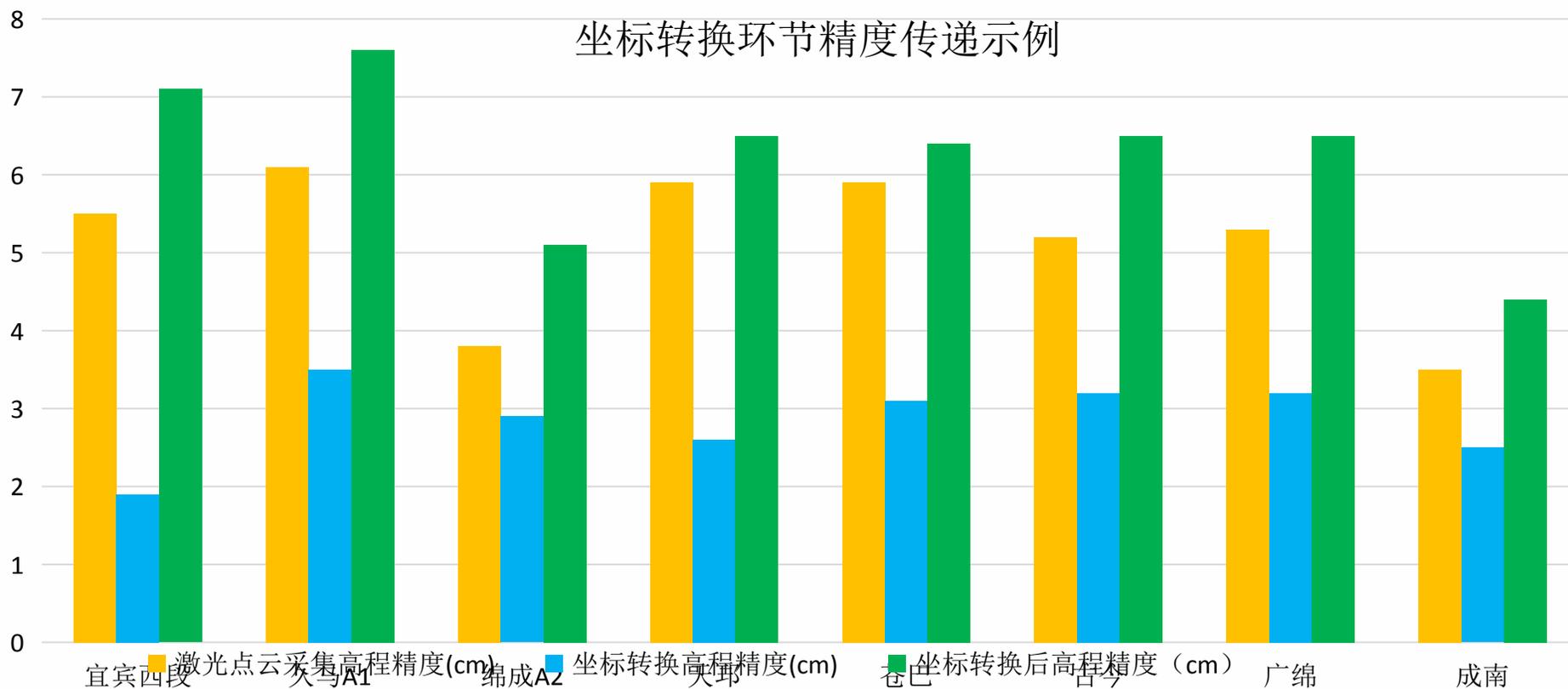
各个工序的精度影响因素及指标分配

- 数据采集及预处理阶段：设备标称精度，控制点、航线布设、轨迹解算、航线平差等。涉及到的影响因素很多，需要采取的精度保障措施也最多。
- 坐标转换阶段：坐标转换点的布设和测量精度。坐标转换精度的指标分配以不会对采集精度有显著的影响，也不会显著增加外业控制工作量为原则；
- 点云分类阶段：自动化程度不高，人工干预的比重较大；
- 成果生产阶段：自动化程度较高，通过参数控制；



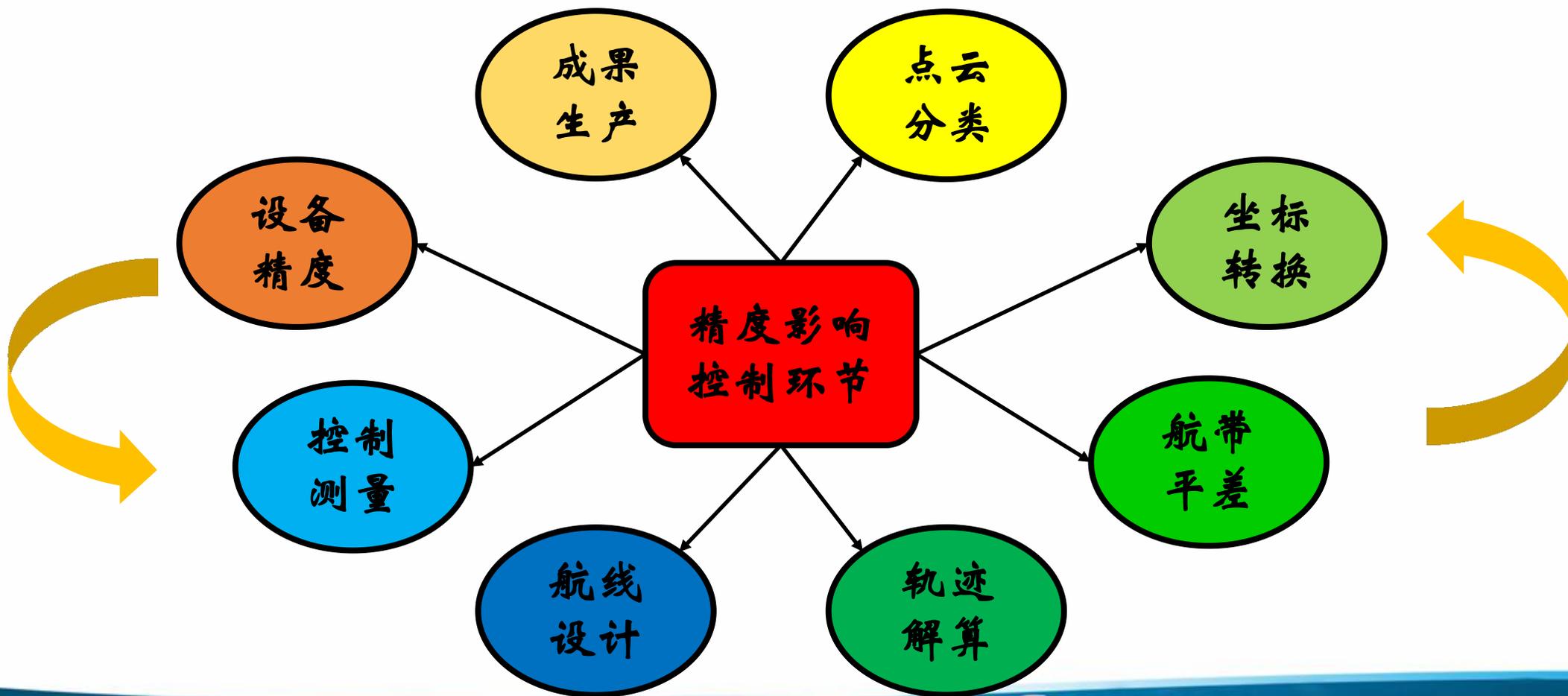
4.2 工序之间精度指标的合理分配

不同项目精度指标实例



4.3 工序层面的精度影响因素

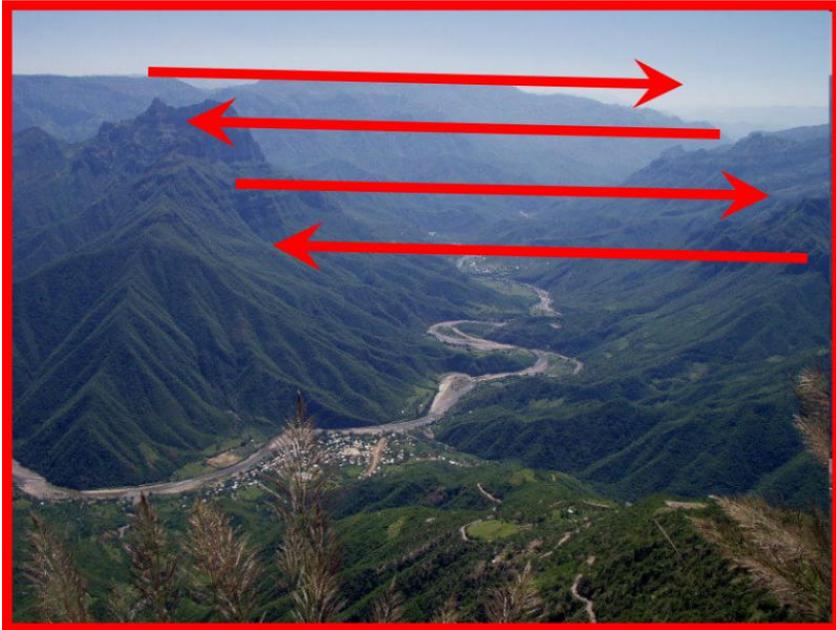
从激光雷达生产的工序环节看精度影响因素



4.4改善激光雷达精度的主要措施

1、精度自适应航线设计方法

- 根据地形起伏状况和飞行器飞行性能合理调整航高；
- 采用变高飞行方案，保持对地航高不变，点密度和精度均匀，飞行效率提高。



4.4改善激光雷达精度的主要措施

2、维持测量基准的一致性：

- 起算基准：国家点，地方/行业点（CORS系统），用户点；
- 布设控制点要联测覆盖项目区域的、系统一致的、年代接近的高等级已知点；掺杂使用不同来源、不同等级、不同年代的已知点极易产生系统性偏差。
- 轨迹解算：使用的地面基站点应属于同一控制系统；

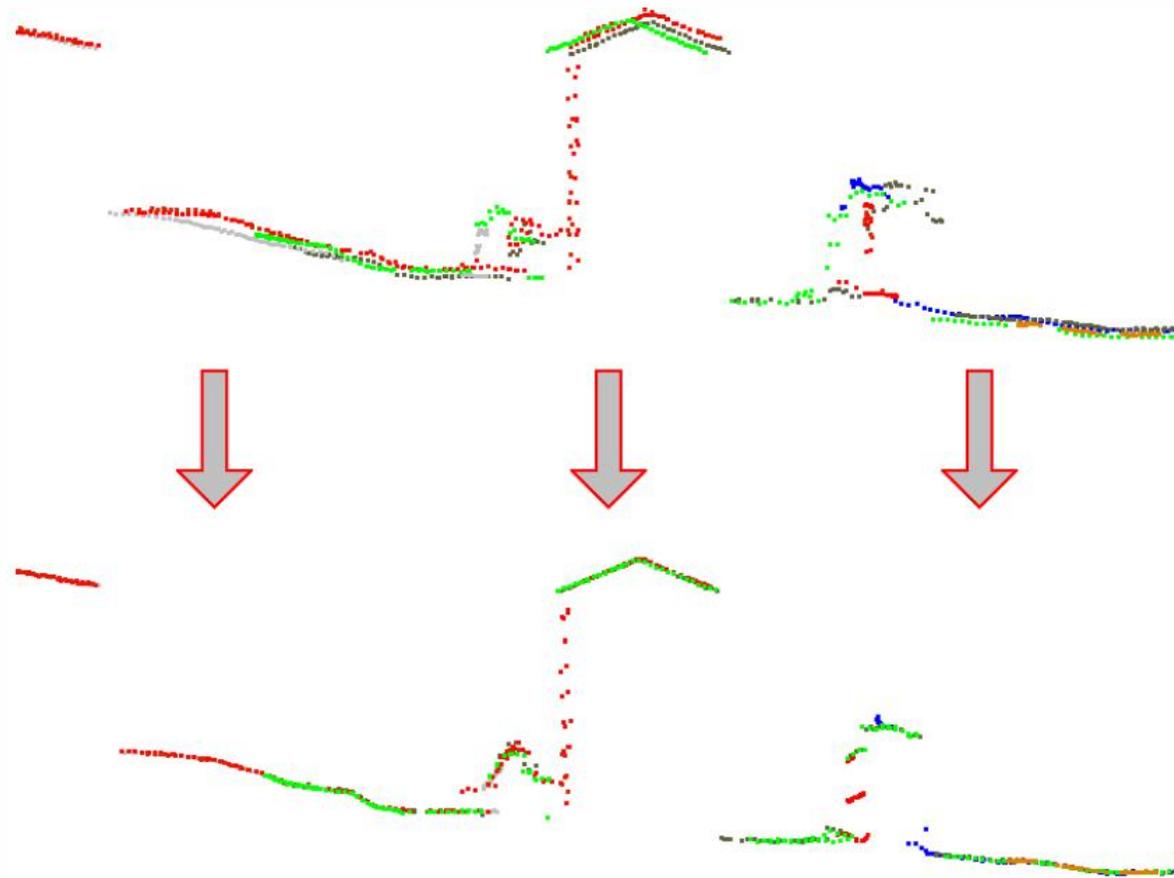
基准统一案例：

- 成都周边某项目，项目过程中同时使用了用户点和CORS系统；两者未联测；
- 不同基准输出的激光点云，高程偏差3米多，平面偏差1米多。

4.4改善激光雷达精度的主要措施

3、进行航带平差并添加控制点进行约束

- 检校场航飞的参数（航高、地形等）可能跟测区不完全一致，不完全代表测区特点。
- 检校的安置角可能存在残差；
- 轨迹解算使用的基站点成果跟参考面成果可能存在高程系统差；
- 航飞过程中转弯坡度角过大，GPS信号被遮挡造成航带间高程偏差；

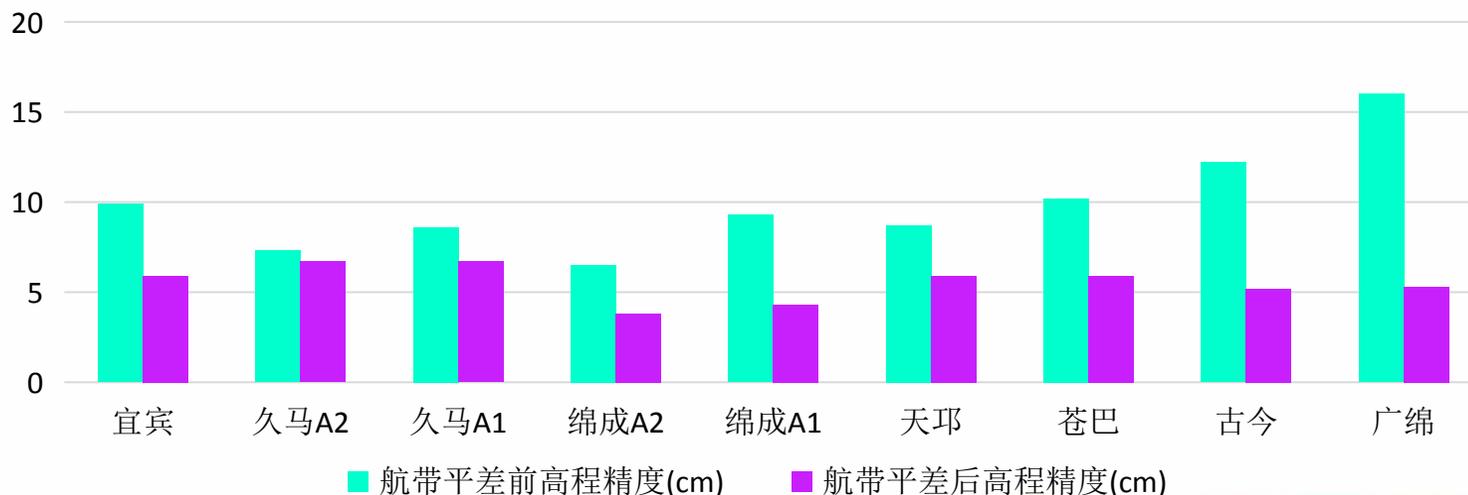


4.4改善激光雷达精度的主要措施

3、进行航带平差并添加控制点进行约束

- 根据航线和地形起伏状况，选布参考面，测量平面点和高程点
- 用参考面测量点对激光点云进行约束平差处理，消除高程系统差、削弱或消除系统安置角的误差和飞行不稳定造成的姿态偏差。

航带平差精度改善统计表



4.4改善激光雷达精度的主要措施

4、有针对性的坐标转换方案：

- 坐标转换包括平面基准和高程基准的转换
- 基准的转换需要利用不同基准下的重合点，即两套转换点成果；
- 转换点和激光点云的基准需一致性；
- 坐标转换点位的分布、点的数量、转换方法的选择；
- 点位分布要跟地形起伏和高程异常相适应，尤其在山区地形起伏大的地方。

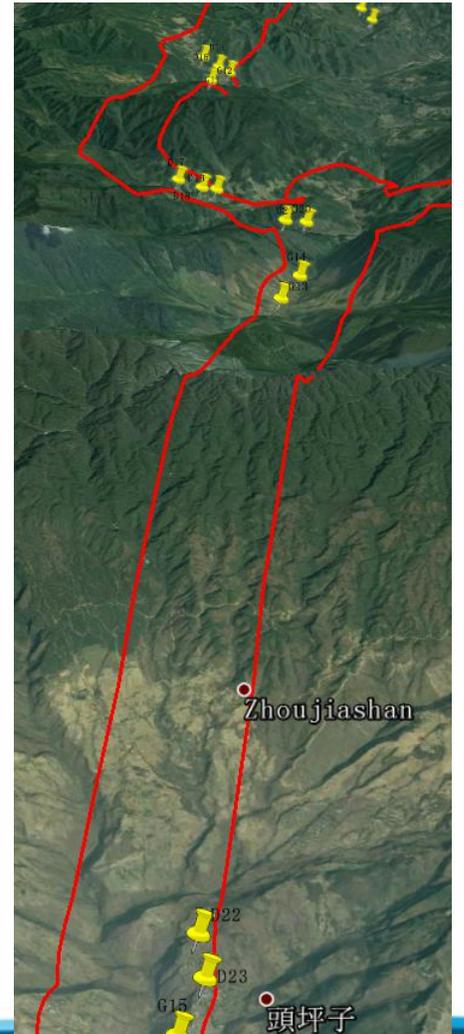
4.4改善激光雷达精度的主要措施

坐标转换案例1:

- 路线穿越山顶，且植被茂密，跨度10km的距离无法布设控制点
- 山脚与山顶高差大，高程转换过程中高程异常很大
- 全段一起转换，山两端转换残差太大，最终针对地形合理的分段进行高程转换；

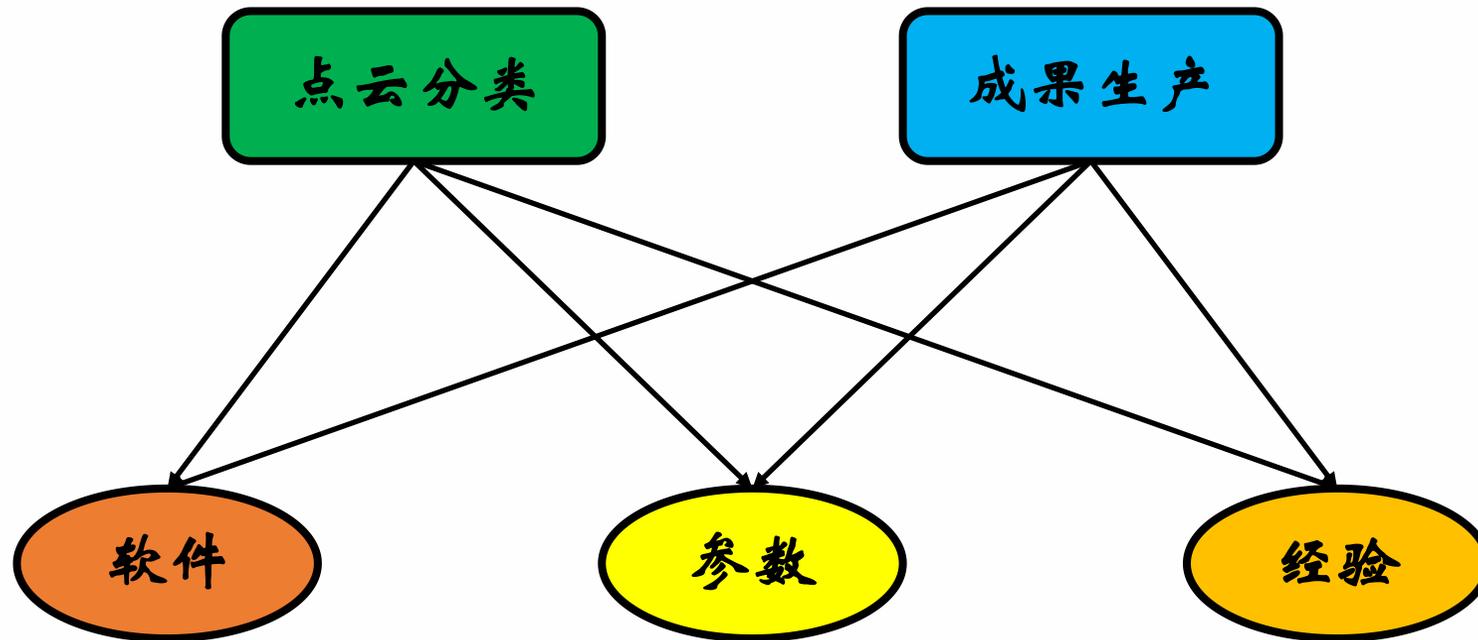
坐标转换案例2:

- 转换点有两套用户点控制成果；而航飞使用的CORSS站成果；点云输出使用的用户控制点；
- 激光点云坐标转换时使用了两套用户点控制成果；
- 用户控制点与CORSS站成果未联测，两者基准不一致，坐标转换后精度不满足项目要求；



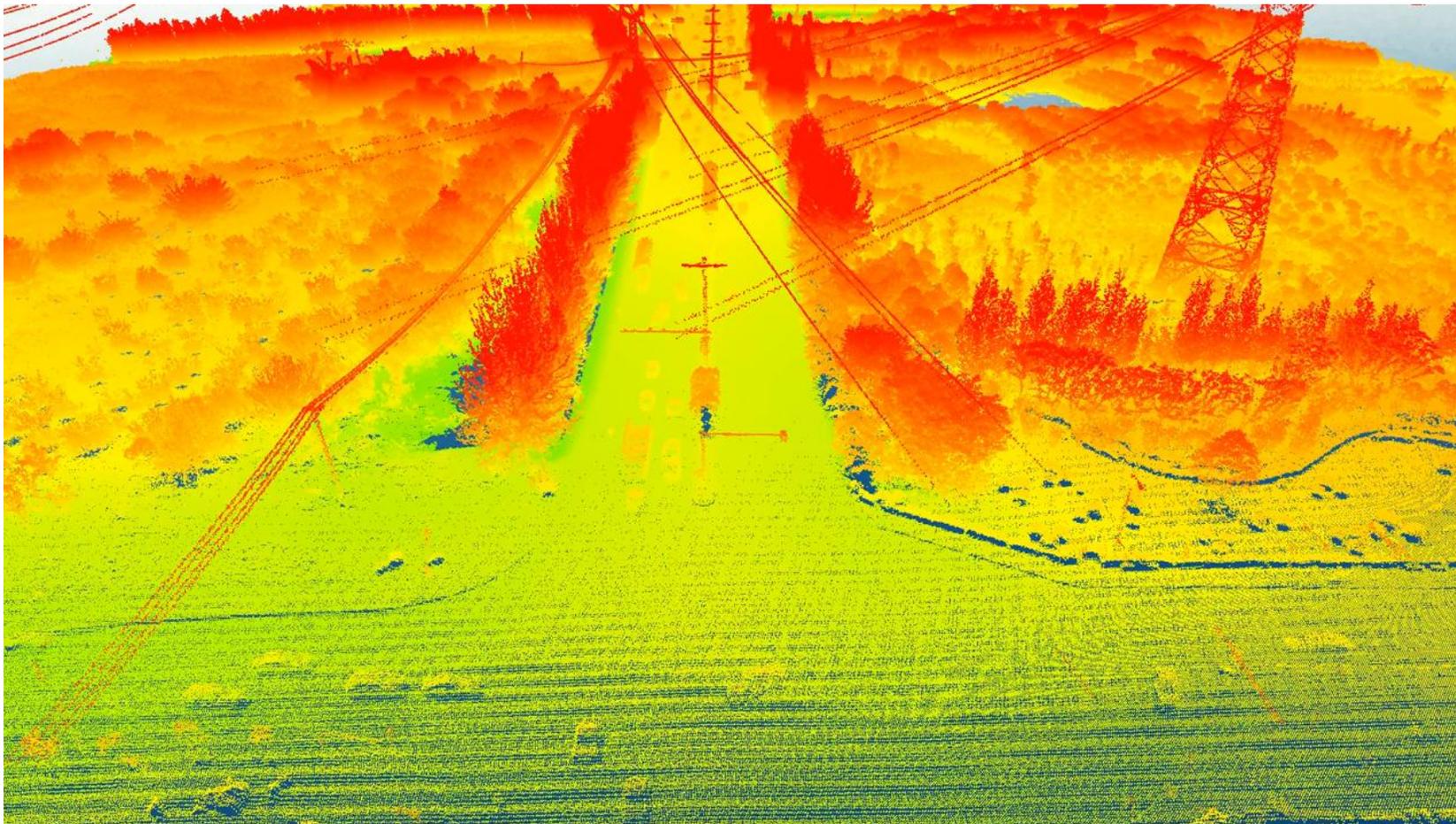
4.4改善激光雷达精度的主要措施

5、提升软件自动化、针对性优化参数、明确重点要点



5 激光雷达成果的应用

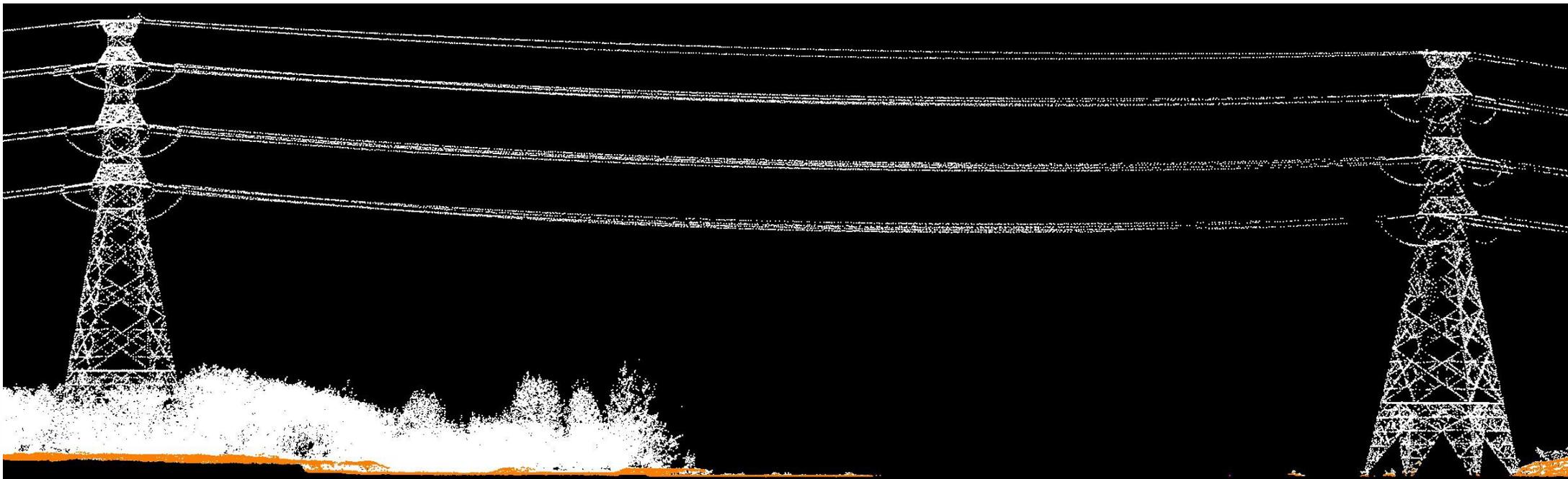
5.1 激光点云



5 激光雷达成果的应用

5.1 激光点云

高压线净空测量



传统测量方法：

- 1、GPS+RTK测量（测电塔位置）。
- 2、全站仪（测悬高）。

存在问题：

- 1、安全隐患大。
- 2、线位调整以后需要重新测悬高。

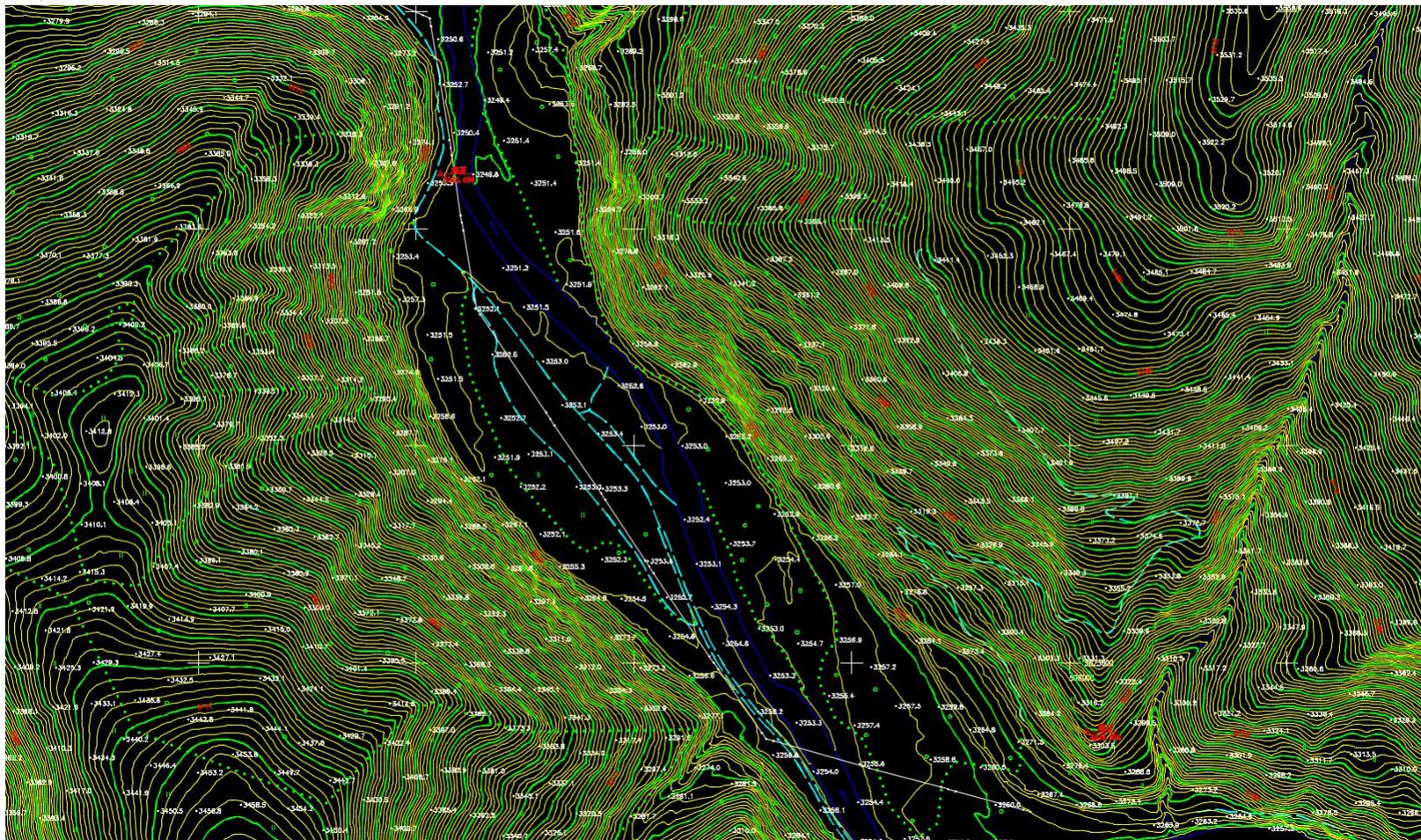
当前方法：直接在点云上量取高压电塔位置和电力线悬高。



5 激光雷达成果的应用

5.1 激光点云

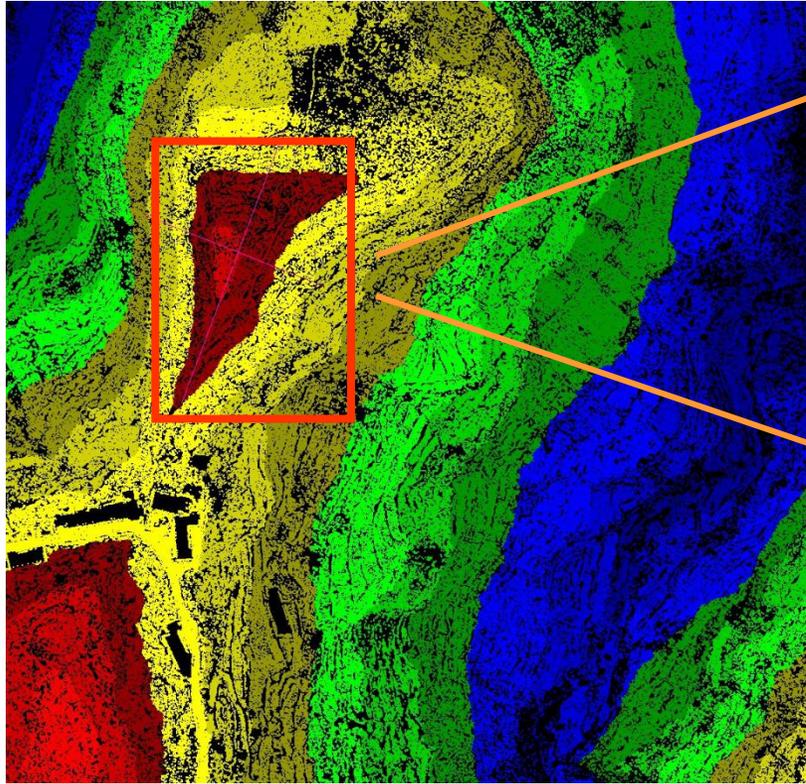
地形地貌提取



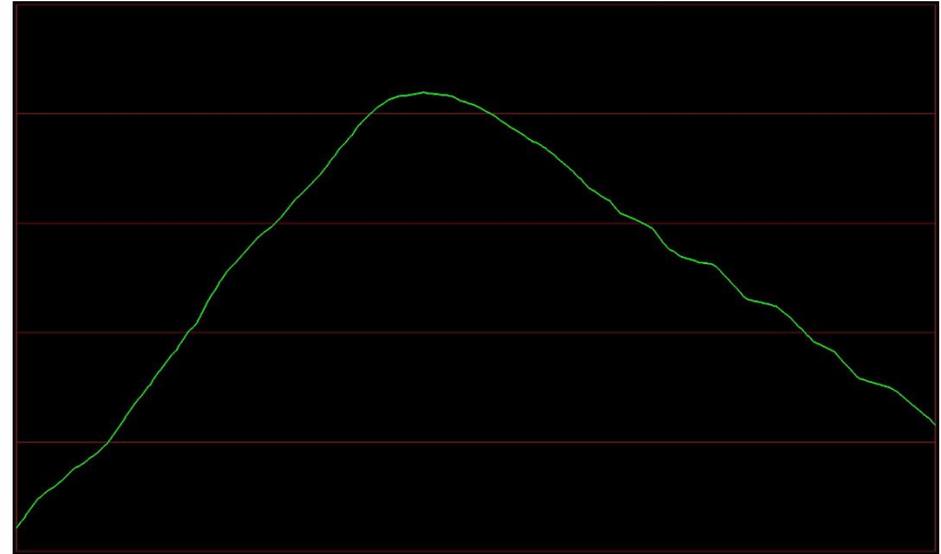
5 激光雷达成果的应用

5.1 激光点云

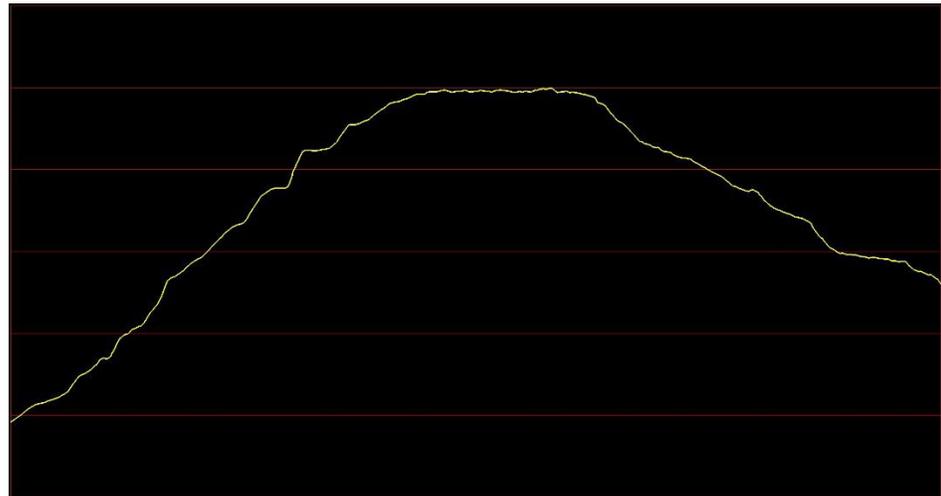
切取纵、横断面地面线



点云高程渲染效果图



横断面

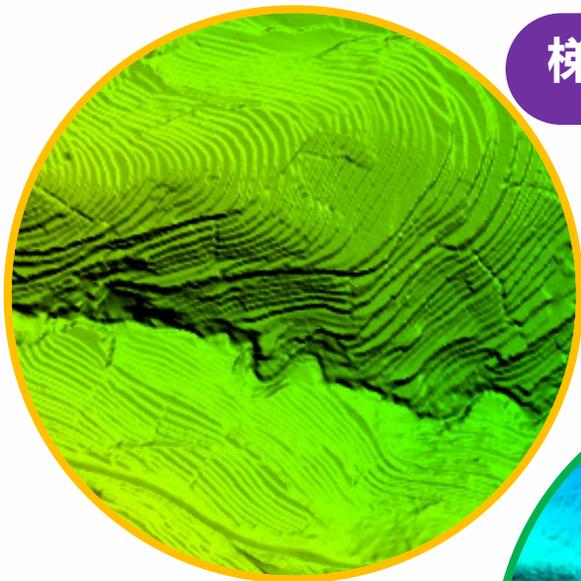


纵断面

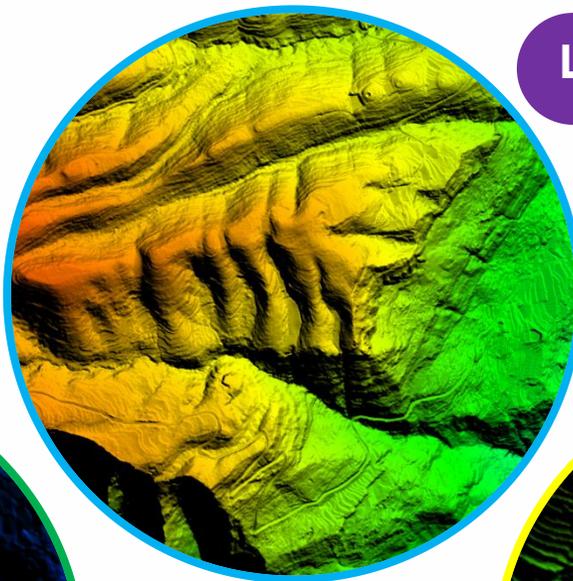
5 激光雷达成果的应用

5.1 激光点云

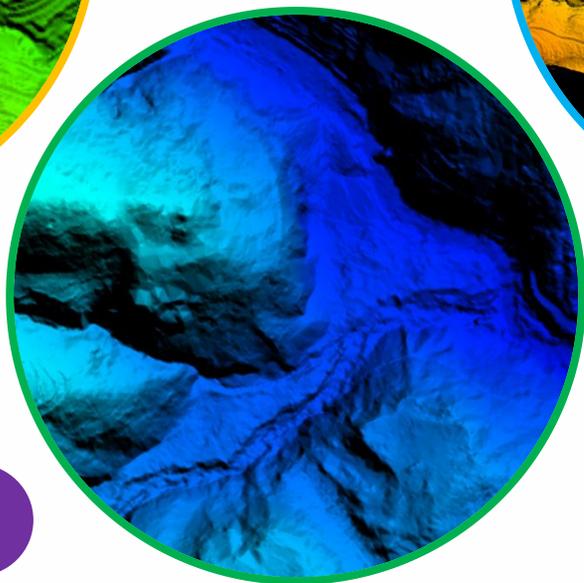
生成DEM



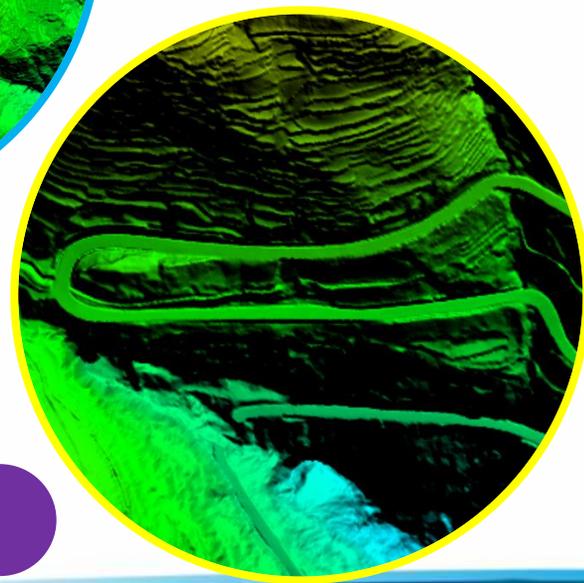
梯田



山地



水系

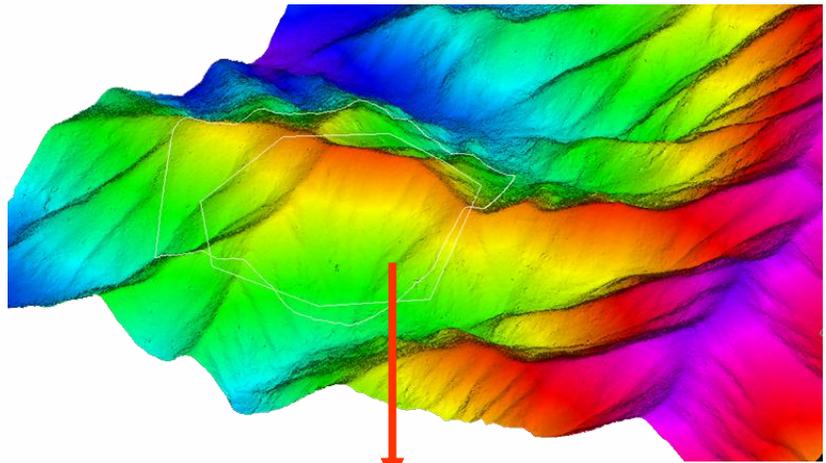


道路

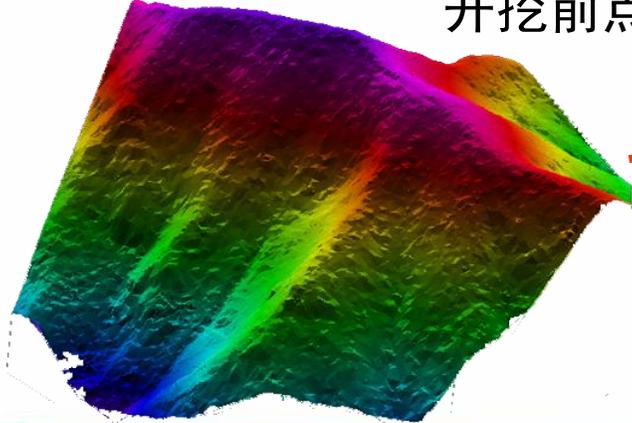
5 激光雷达成果的应用

5.2 数字高程模型DEM

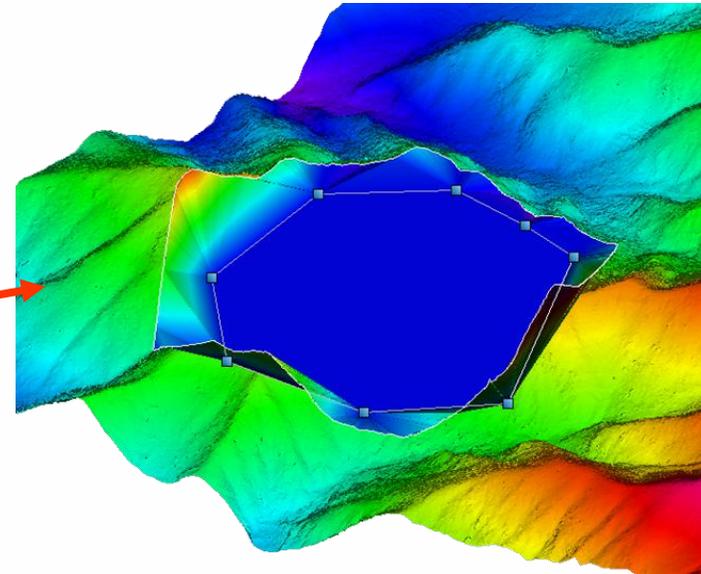
精确快速计算土方量



开挖前点云DEM



开挖后点云DEM



5 激光雷达成果的应用

5.3 数字正射影像DOM



乐马



绵成



泸古今



成乐



泸石

5 激光雷达成果的应用

5.3 数字正射影像DOM

踏勘、选线



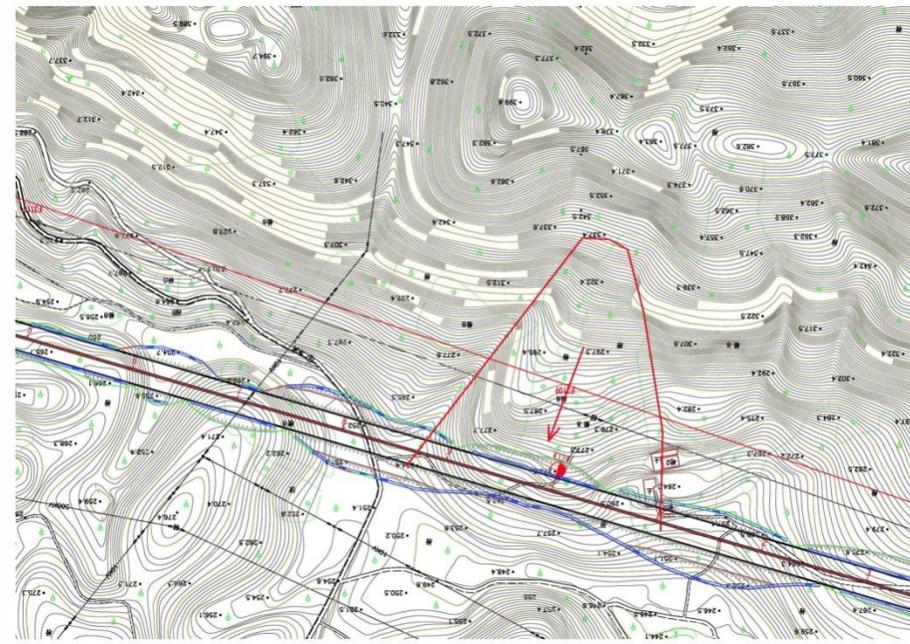
路线平面图、平面
总体图、占地图，
底图用正射影像图
来取代地形图

5.3 数字正射影像DOM



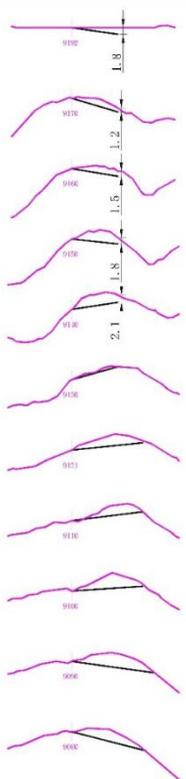
辅助地质灾害判断

剖面图可以看出断面呈明显的台阶状，为典型的滑坡特征，可推测出滑坡大概的滑面形状和深度。



5 激光雷达成果的应用

5.4 开拓性项目应用:



差异较大原因分析：隧道洞口植被茂密，
激光打在了植被上，导致数据高于实际地面。

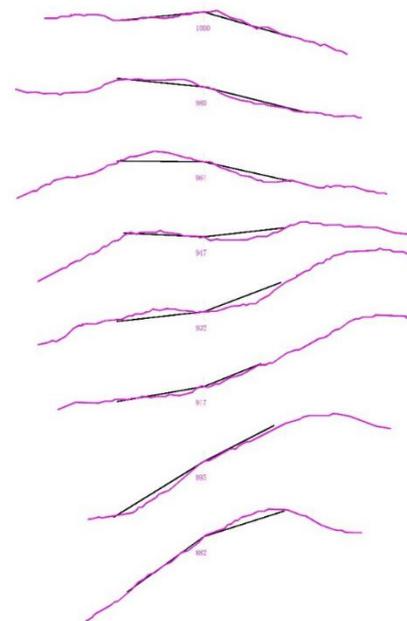
四川第一条应用激光雷达
技术的新建高速公路

广元至平武高速公路

激光点云数据采集横断面地面线

实测横断面检测点

广元至平武高速公路B1合同段(K0+882-K1+000)横断面检测对比图



激光点云数据采集横断面地面线

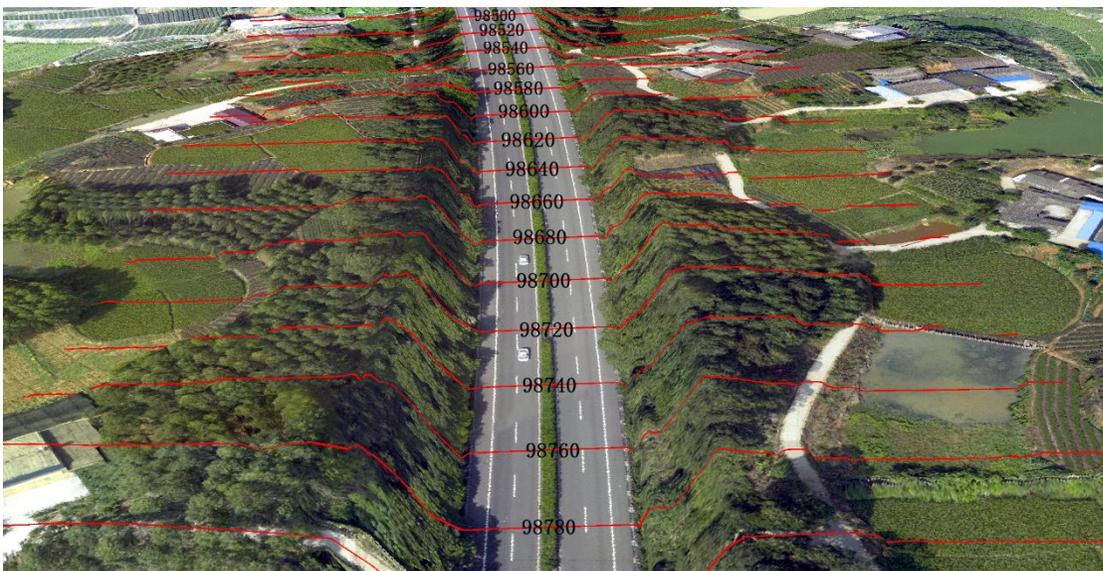
实测横断面检测点

5 激光雷达成果的应用

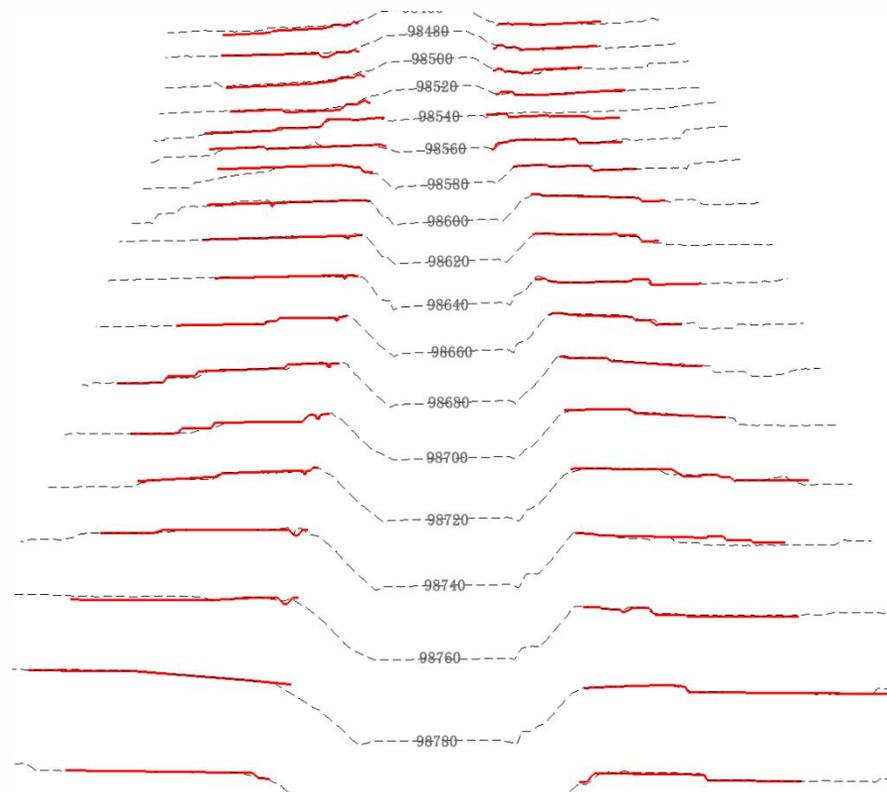
5.4 开拓性项目应用：

四川第一条应用激光雷达技术的改扩建高速公路

成都至乐山高速公路改扩建



激光点云数据采集横断面地面线
实测横断面检测点





5 激光雷达成果的应用

5.5拓展及推广应用:

G5京昆高速公路绵阳至成都段扩容工程A1标段、A2标段

天府新区至邛崃高速公路A标段

苍溪至巴中高速公路

泸州古蔺至金沙（四川境）高速公路A标段

G5京昆高速广元至绵阳段扩容工程A1标段

泸定至石棉高速公路

G0615线久治（川青界）至马尔康段高速公路A1标段、A2标段

G4216高速公路屏山新市至金阳段、金阳至对坪互通段

G544线川主寺至九寨沟口段……





5 激光雷达成果的应用

5.6 激光测绘取得的成绩

- 《成都至乐山高速公路扩容建设青龙场至眉山实验段施工图设计机载激光测量项目》获2015-2017四川省优秀测绘工程金奖；
- 《G544线川主寺至九寨沟口段“8.8”九寨沟地震恢复重建工程机载Lidar扫描测量项目》获2016-2018四川省优秀测绘工程铜奖；
- 《成都至乐山高速公路扩容建设青龙场至眉山实验段施工图设计融合测量项目》获2019年全国优秀测绘工程铜奖；



5 激光雷达成果的应用

5.7 激光雷达应用总结

- 1、构建了多源一体的公路激光测绘体系；
- 2、综合考虑设备选型、基准传递、精度分配和质量保障措施；
- 3、以良好的效率和较低的成本获得了更优异的成果精度和种类；



请指正

谢谢！

