SfM-MVS点云
数字露头模型应用简介

王　冉，林靖愉，李路，肖宙轩，惠元秀，晁会霞，焦建刚

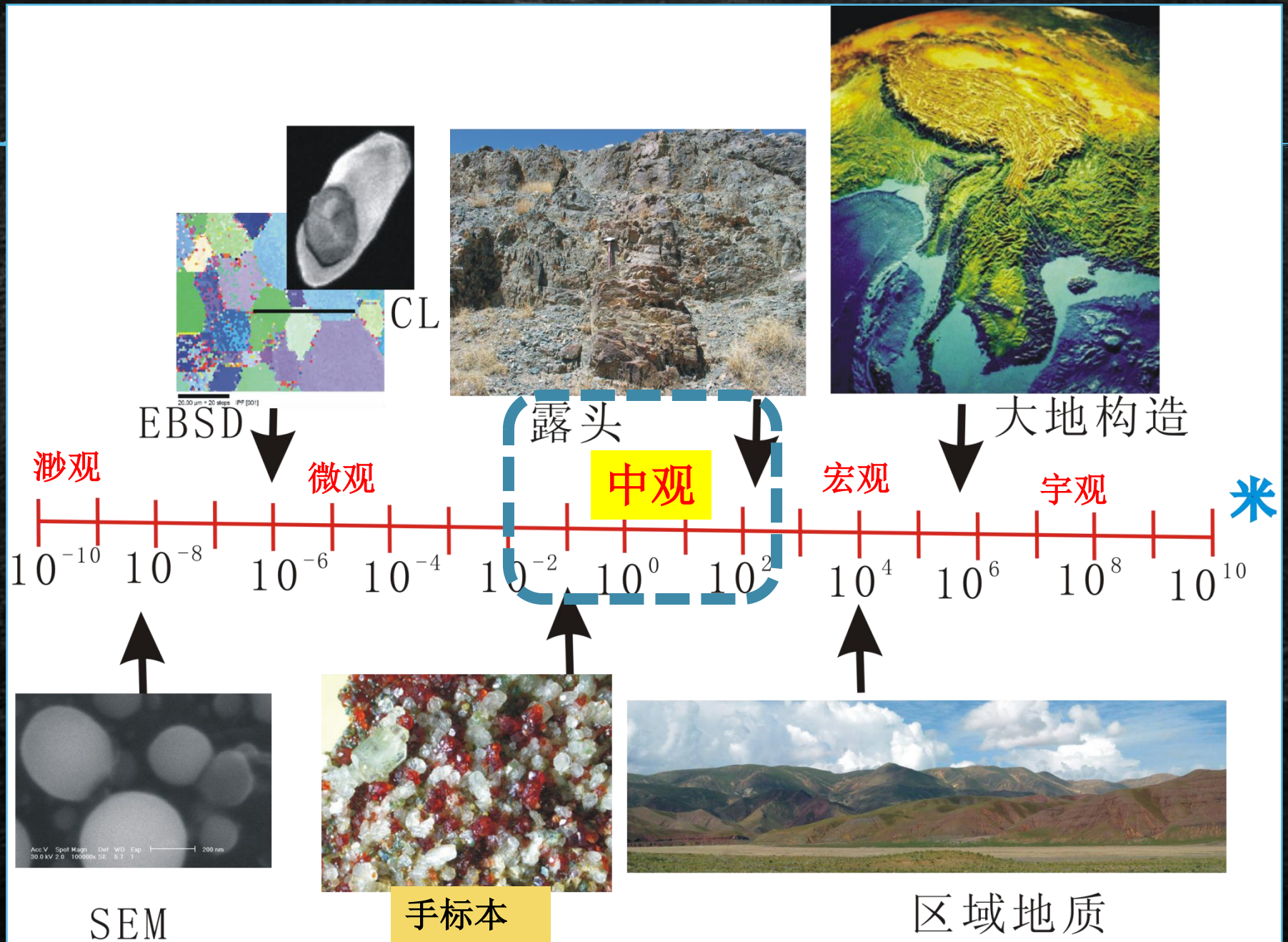
长安大学地球科学与资源学院

王冉联系方式：
18950604（QQ），18802956129（M.P.）
shiranwang@qq.com（邮箱）
个人主页：http://js.chd.edu.cn/dqkxyzyxy/wr/list.htm

汇报提纲

1. 研究背景
2. SfM点云三维露头建模、姿态校正与产状提取
3. 小结

1.1 作为出发点的露头尺度研究仪器化程度最低



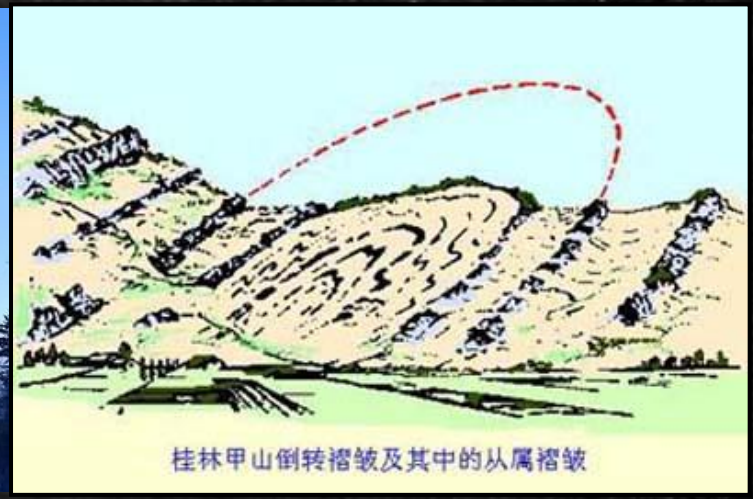
构造地质学的尺度

- 宇观：看（肉眼）不全，摸（徒手）不全，必须借助天文的方法。
- 宏观：看不全，摸不全，必须借助于大范围地图。
- **中观：看得见，摸得着，是其它尺度观察的基础，我们总是从这个尺度出发。**
- 微观：看不清，不能摸，必须借助于显微镜进行观察。
- 渺观：看不见，摸不着，即使显微镜也不能观察，必须借助于化学的方法。

1.1 作为出发点的露头尺度研究仪器化程度最低

题安业县





桂林甲山倒转褶皱及其中的从属褶皱

● 贾岛（唐， 779～843年）

一山未了一山迎，百里都无半里平。

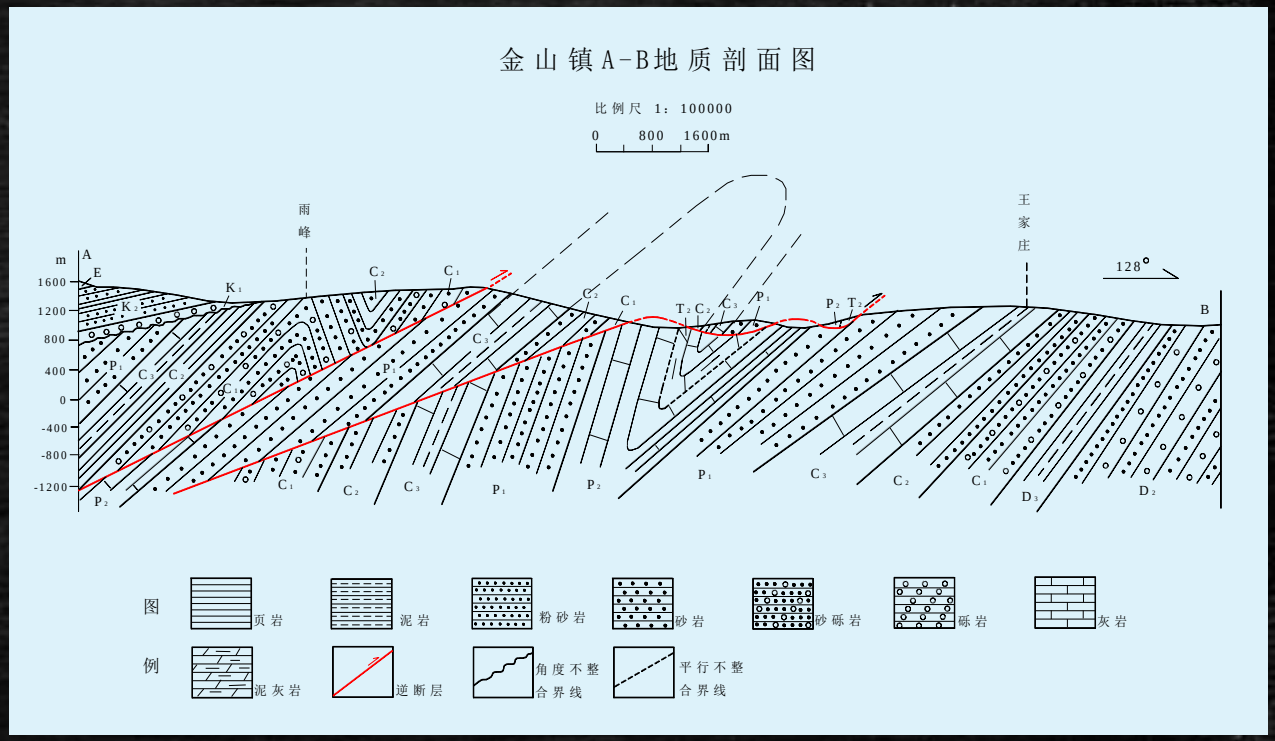
宜是老禅遥指处，只堪图画不堪行。

闵中秋思

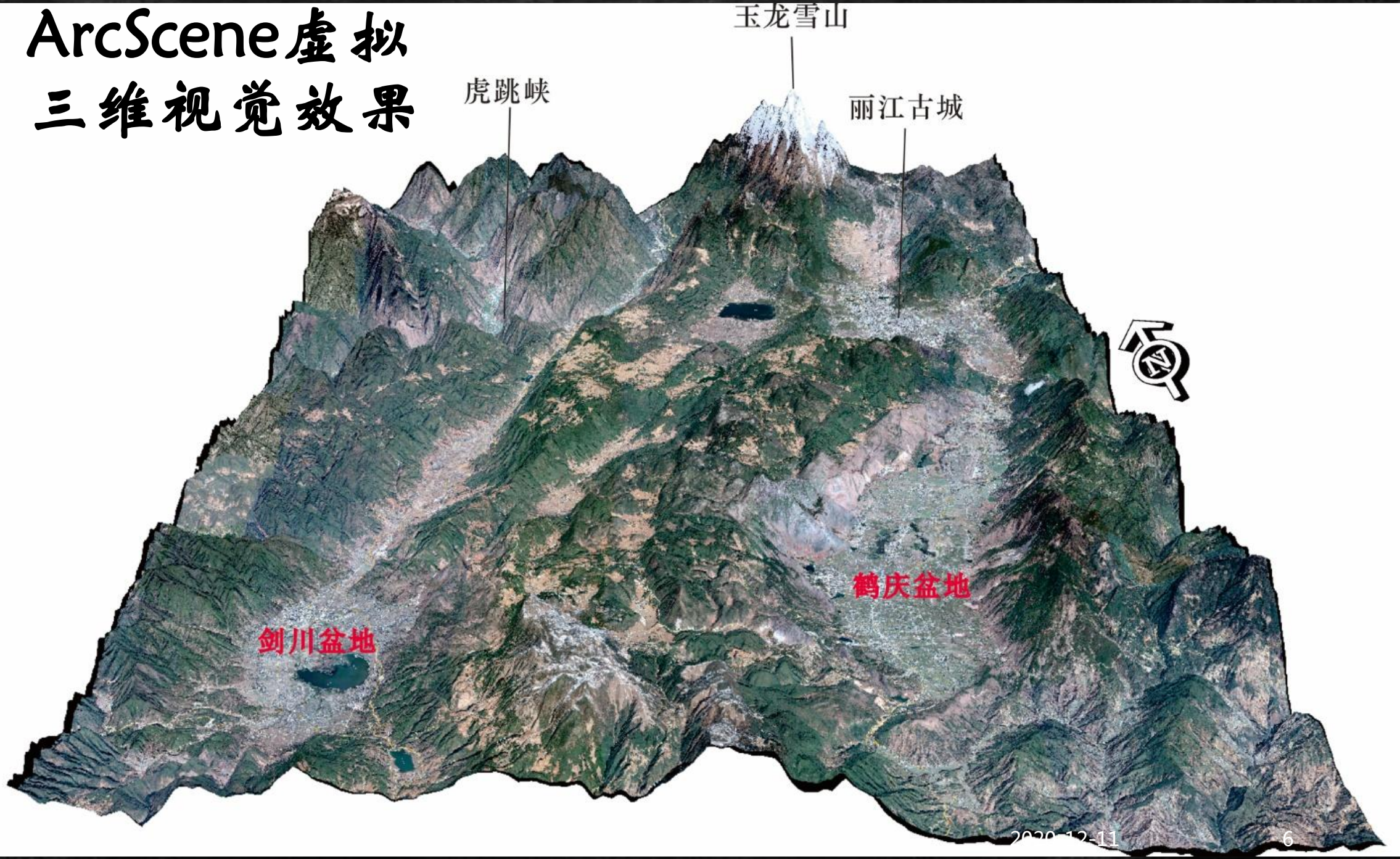
● 杜荀鹤（唐，约846年-约907年）

雨匀紫菊丛丛色，风弄红蕉叶叶声。

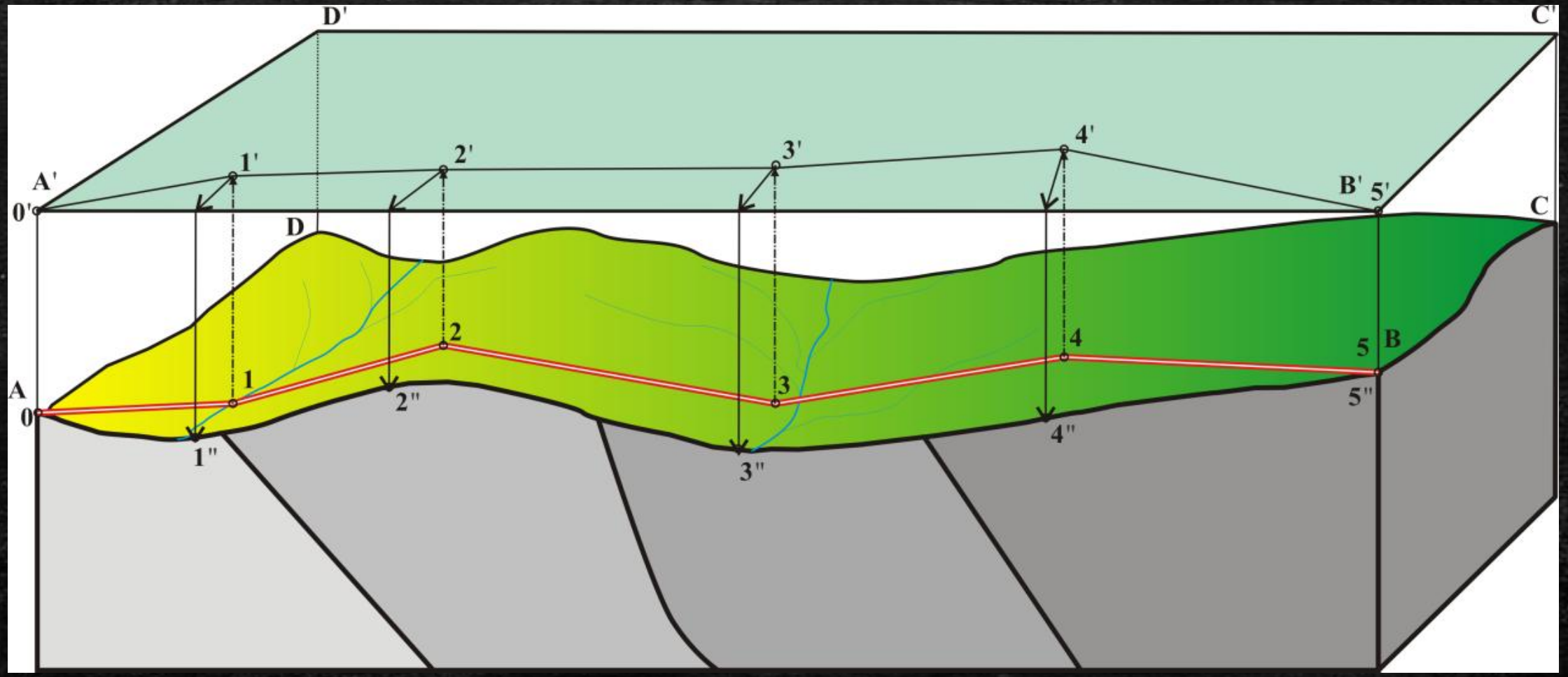
北畔是山南畔海，只堪图画不堪行。



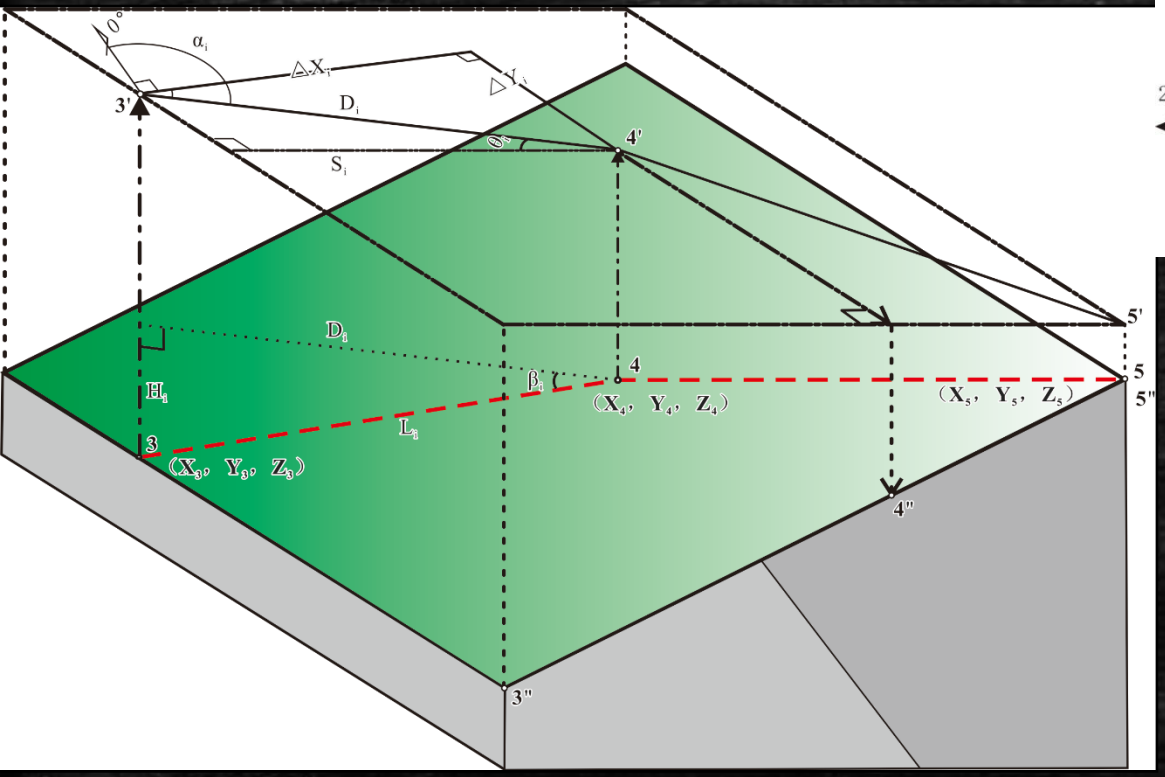
ArcScene虚拟三维视觉效果

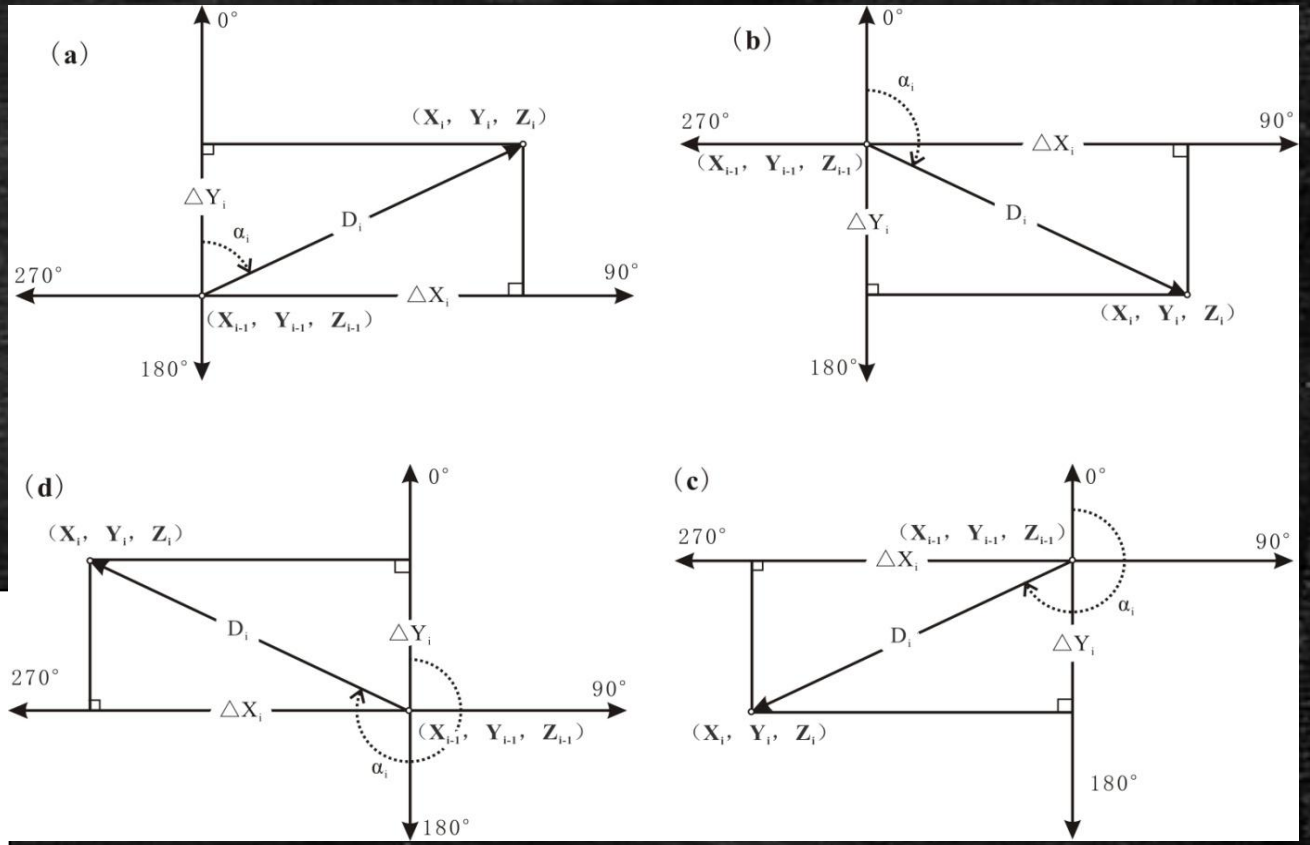


1.2 测绳法和点坐标法地质剖面测量方法效率太低



王冉,马立成,孙勇,张胜龙,贾志明.地质剖面测制新方法的尝试——点坐标法[J].地质力学学报,2017,23(6):856-863



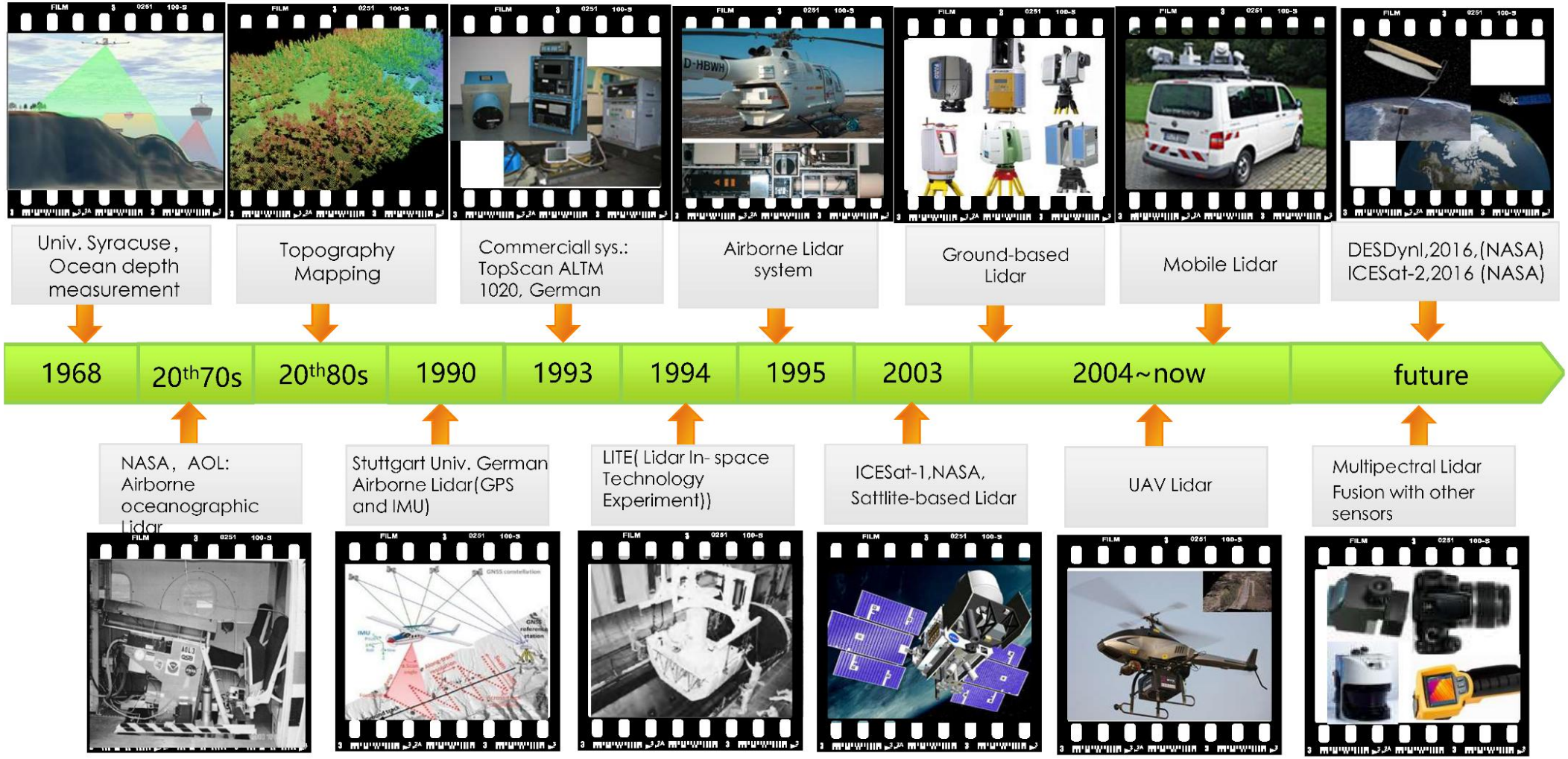


王冉,马立成,孙勇,张胜龙,贾志明.地质剖面测制新方法的尝试——点坐标法[J].地质力学学报,2017,23(6):856-863

1.3 激光雷达点云三维露头建模较为昂贵不便

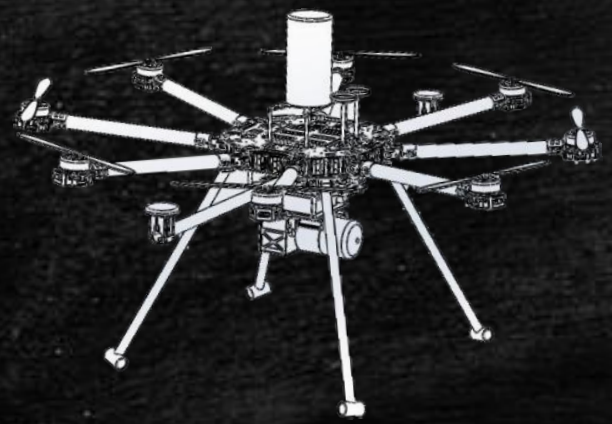
Lidar History

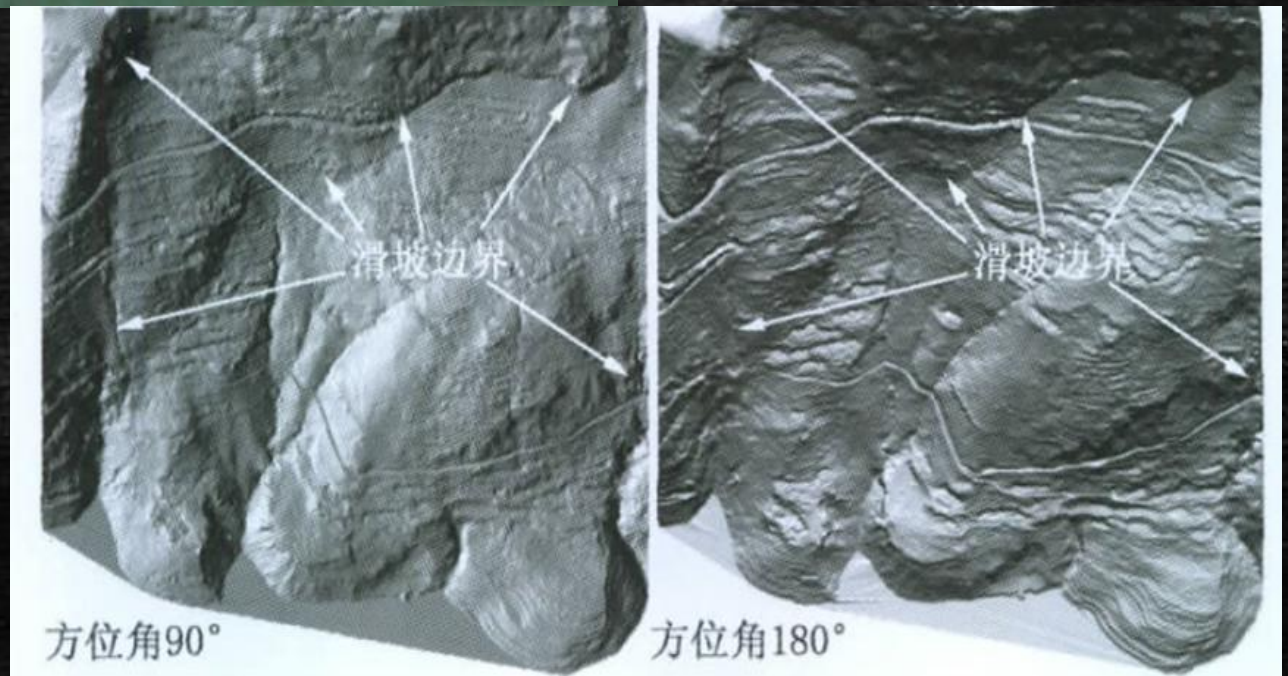
- 据郭庆华等，2017










滑坡边界
滑坡边界
方位角90°
方位角180°

激光雷达优势和适用性


真彩色三维激光雷达数据

① 全天时作业，主动遥感、不依赖可见光

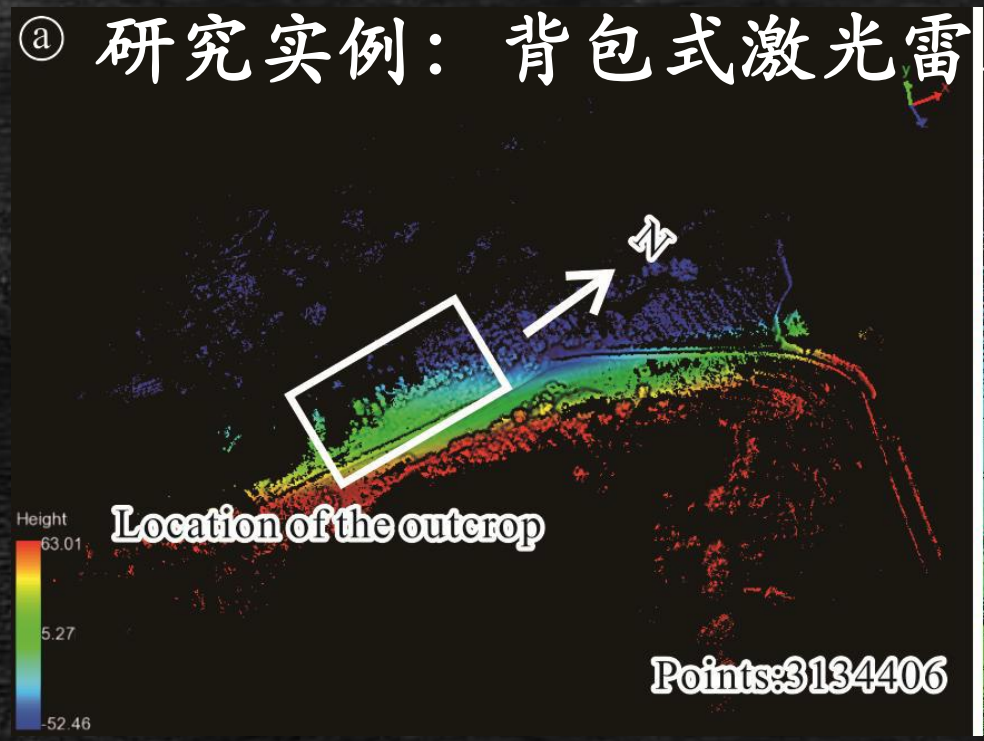
② 精度好且一致性高，

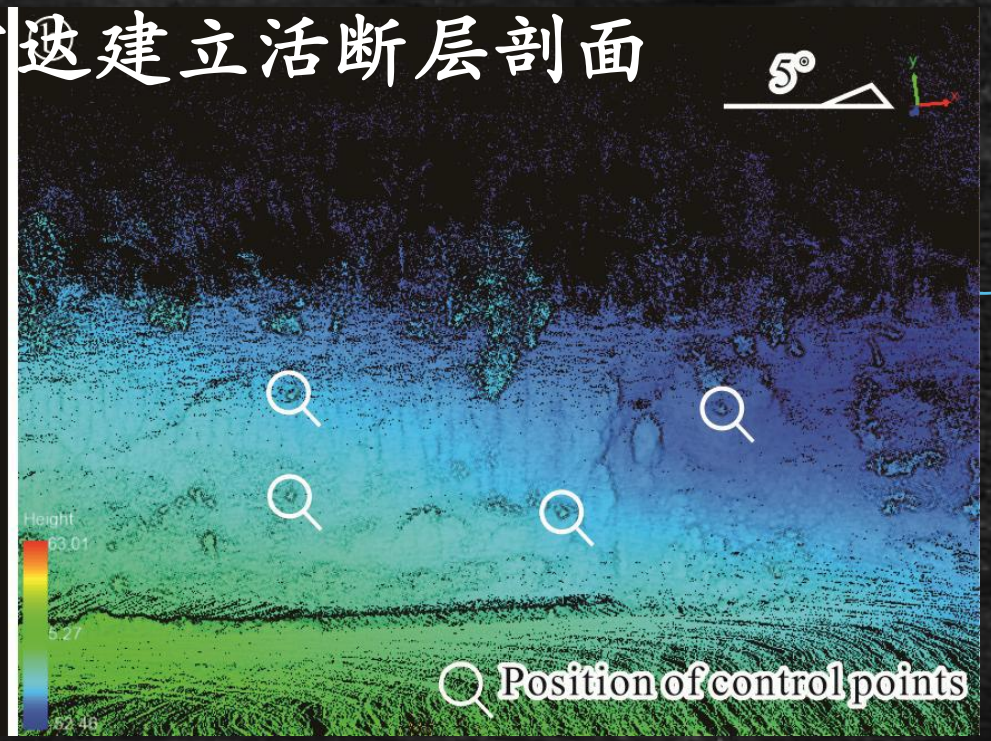
③ 直接测量、毫米级误差

④ 穿透力强，层次细节丰富生产效率高，直接获取目标三维信息

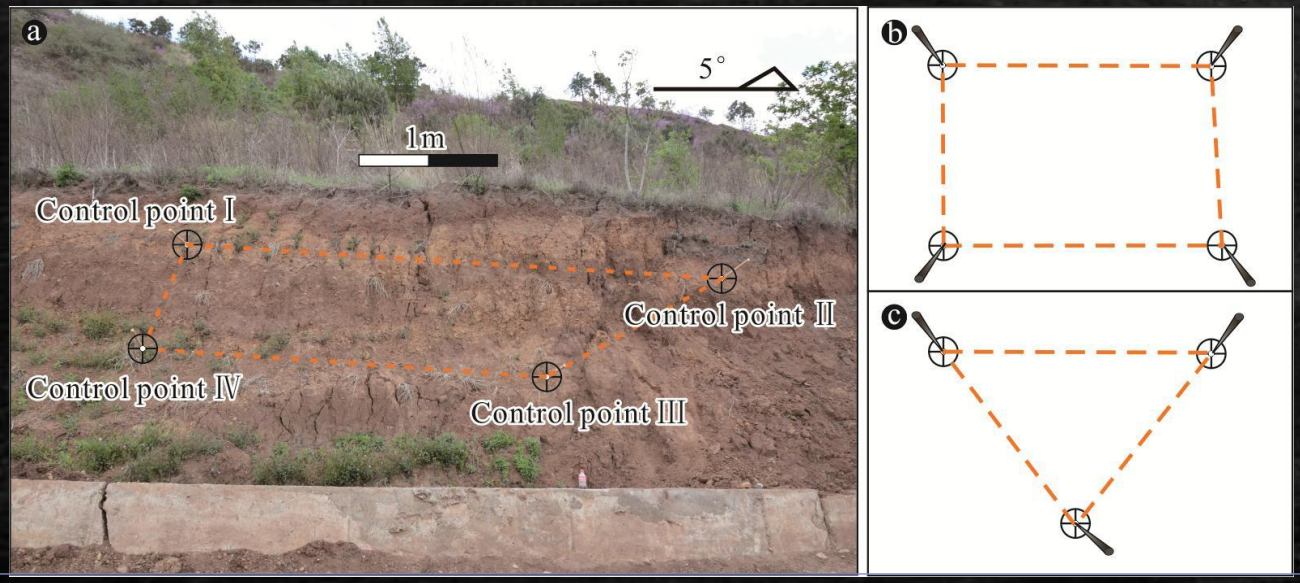
⑤ 太贵重，不可能人手一台

ⓐ 研究实例：背包式激光雷达建立活断层剖面

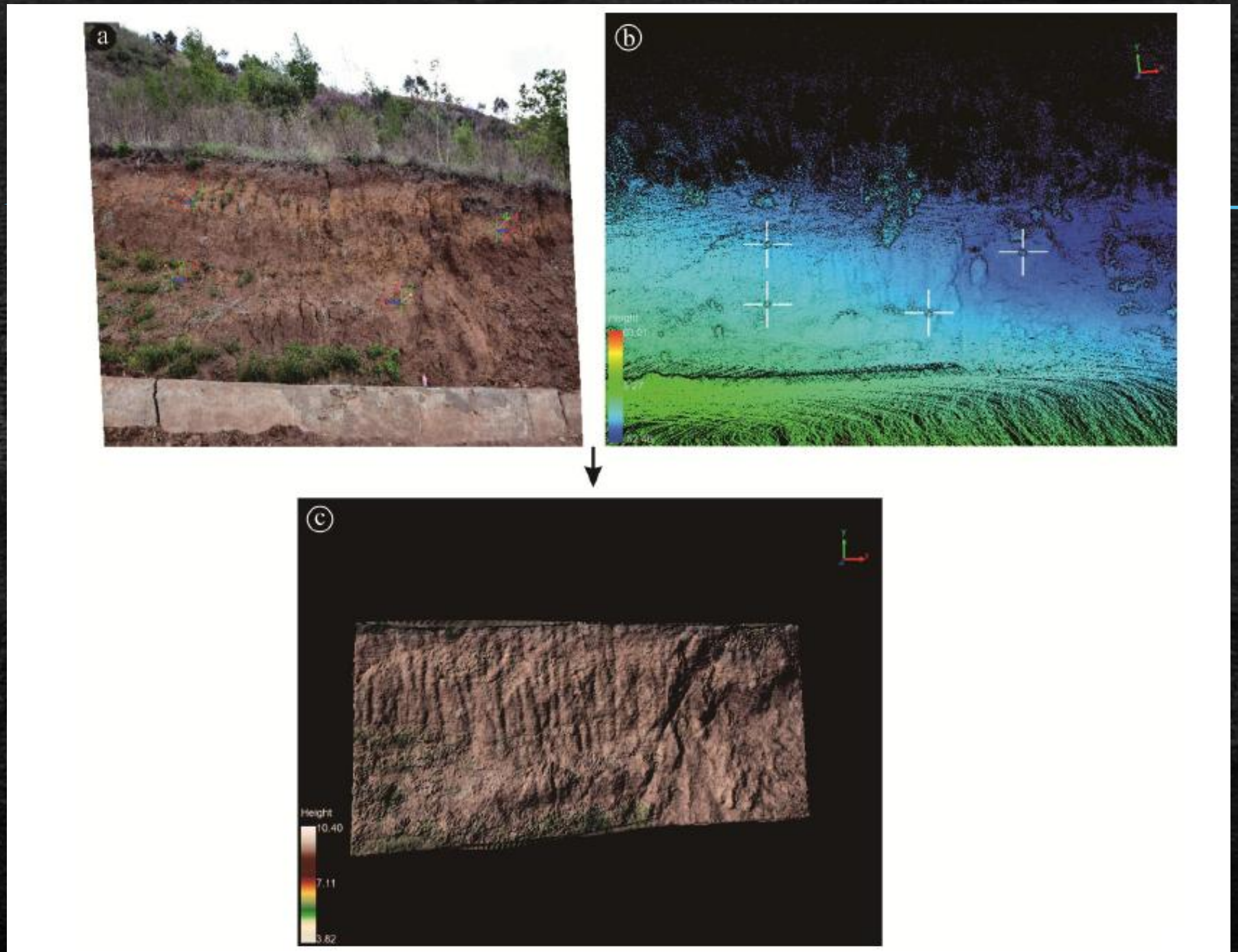




点云与照片配准融合



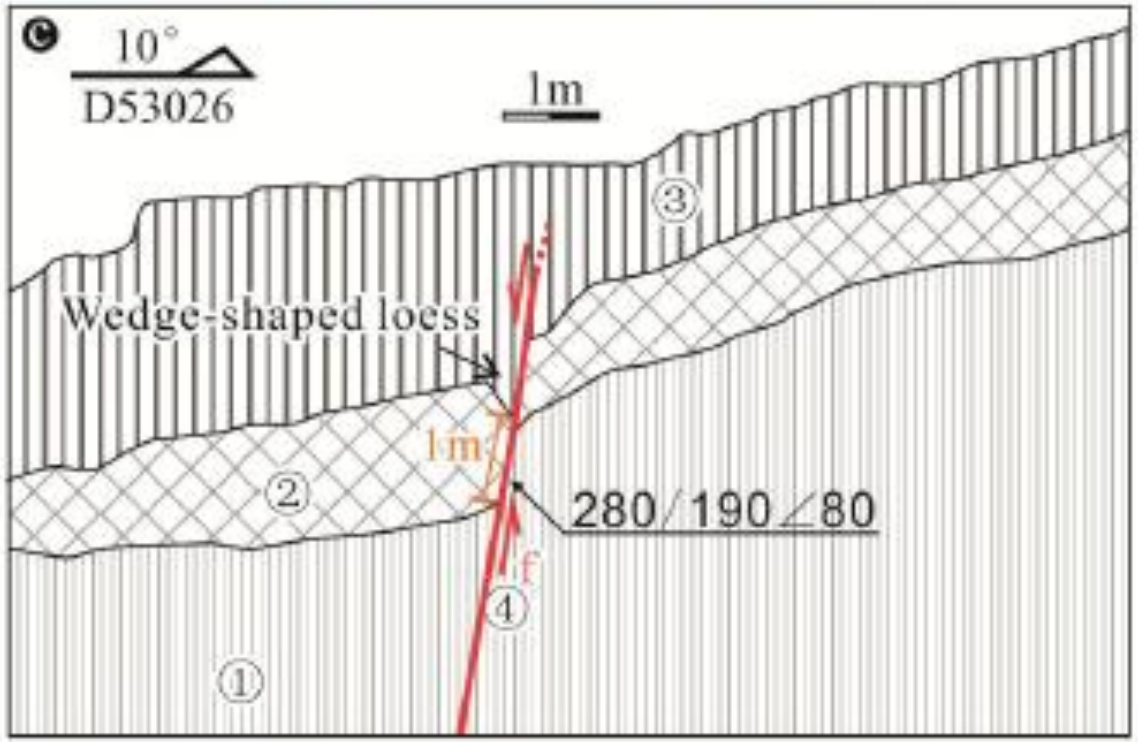
Lin Jingyu, **Wang Ran***, Xiao Zhouxuan, Li Lu, Yao Weihua, Han Wei, Zhao Baolin. 2017. Application of backpack Lidar to geological cross-section measurement[C]. SPIE, 7.


a
b
c
Height
10.40
7.11
3.82

根据三维云点绘制活动断裂面剖面







① Lishi loess

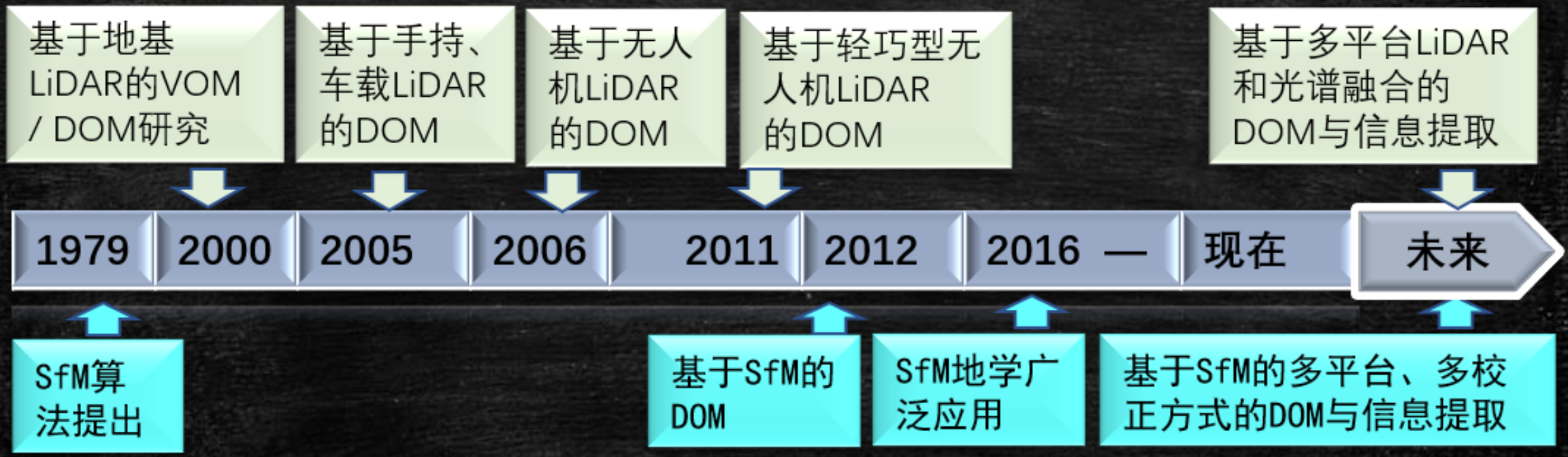
② Paleosol

③ Malan loess

④ Jingyang-Weinan fault

Lin Jingyu, **Wang Ran***, Xiao Zhouxuan, Li Lu, Yao Weihua, Han Wei, Zhao Baolin. 2017. Application of backpack Lidar to geological cross-section measurement[C]. SPIE, 7.

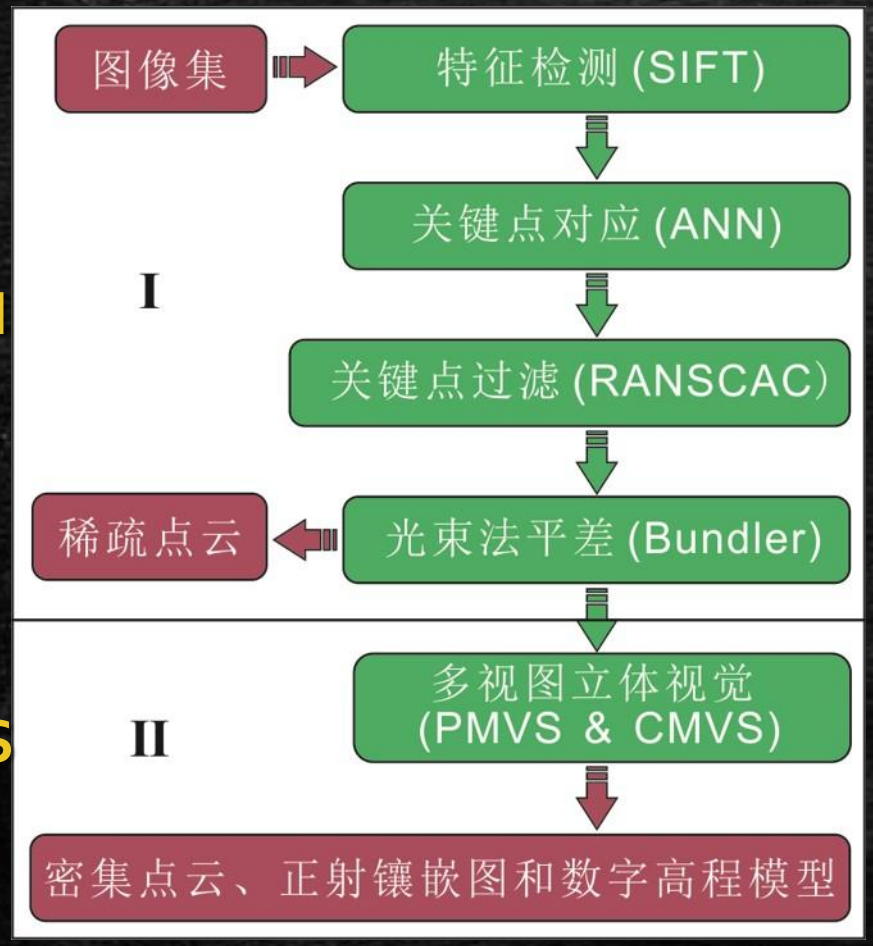
DOM的发展进程


基于地基LiDAR的VOM / DOM研究
基于手持、车载LiDAR的DOM
基于无人机LiDAR的DOM
基于轻巧型无人机LiDAR的DOM
基于多平台LiDAR和光谱融合的DOM与信息提取
1979
2000
2005
2006
2011
2012
2016
现在
未来
SfM算法提出
基于SfM的DOM
SfM地学广泛应用
基于SfM的多平台、多校正方式的DOM与信息提取

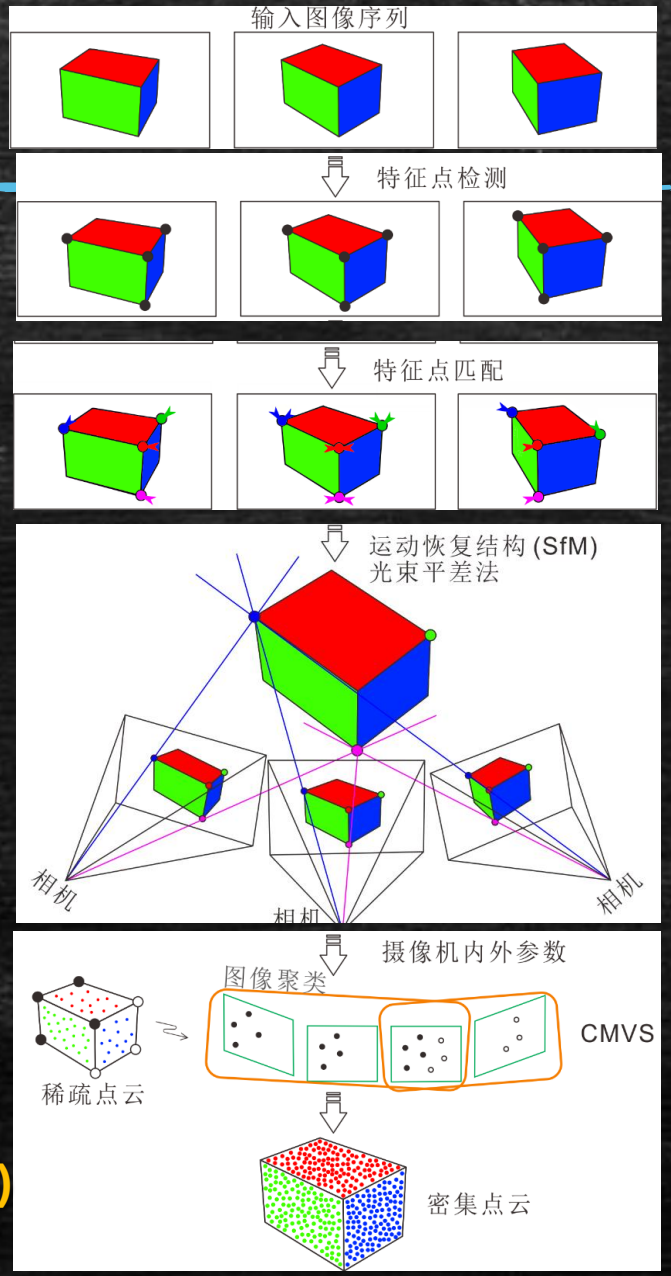
汇报提纲

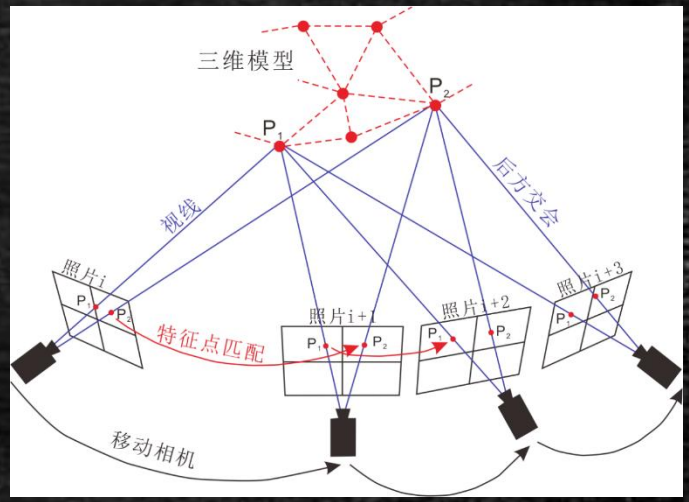
- 1. 研究背景
- 2. SfM点云三维露头建模与产状提取
- 3. 小结

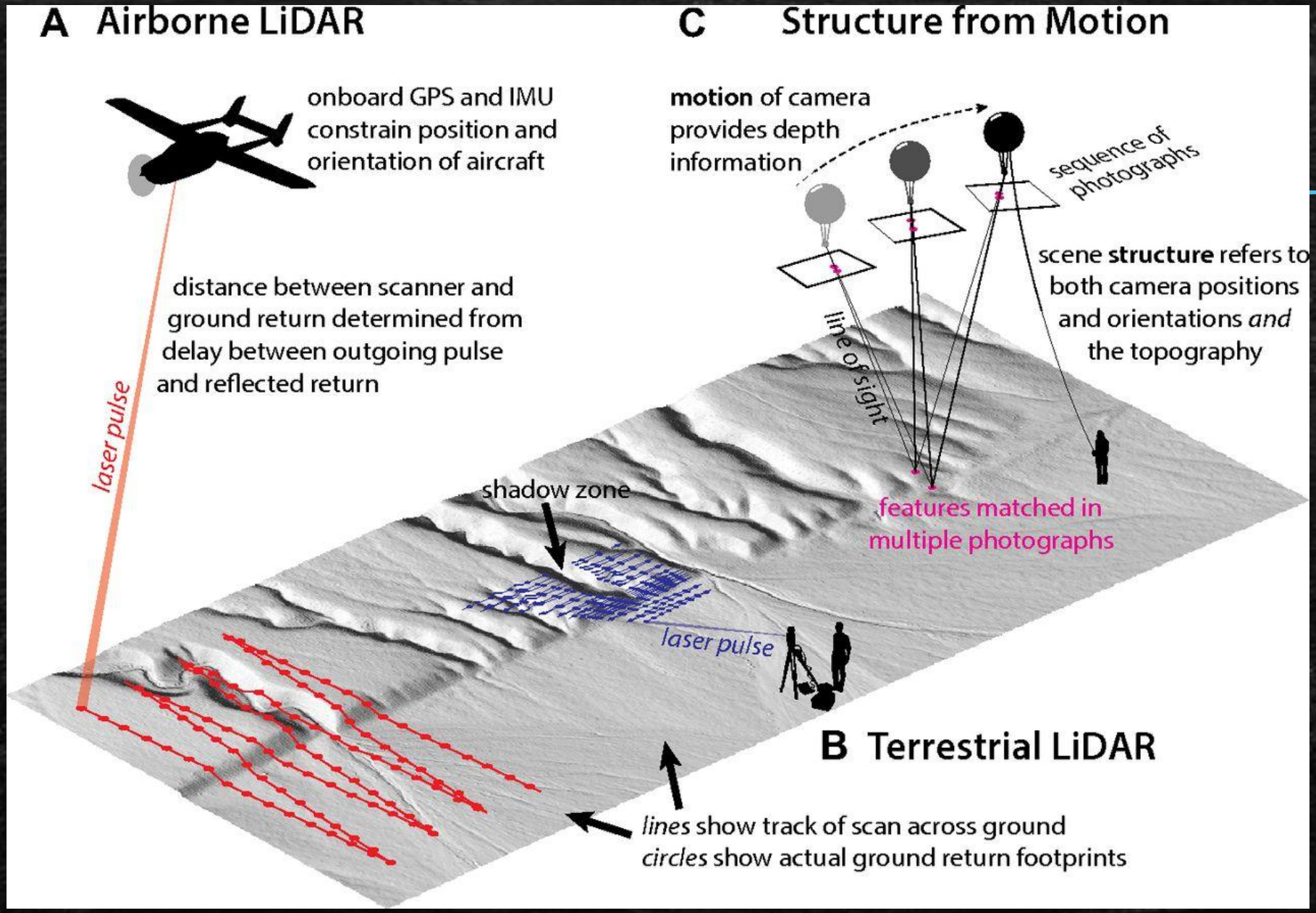
SfM方法原理



SfM-MVS原理流程 (修改自Carrivick et al, 2016)

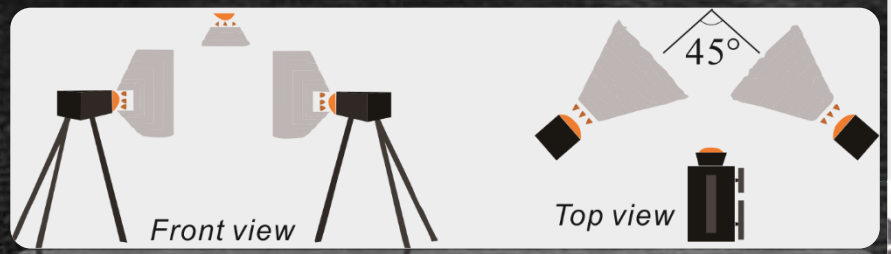


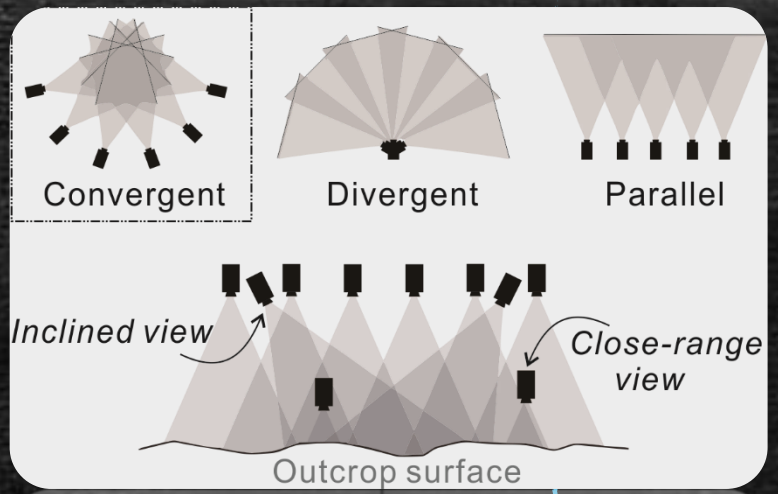


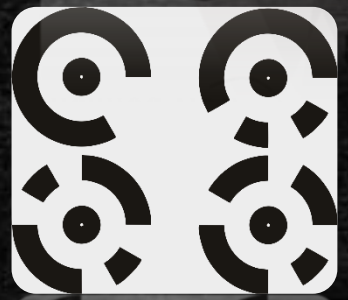


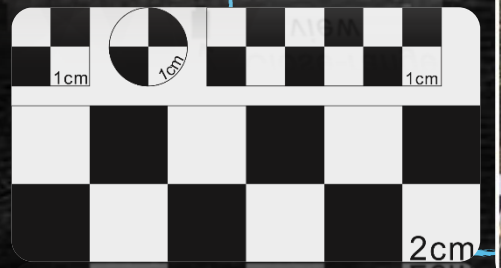
(Kendra Johnson, Geosphere 2014)(原理附后)

SfM野外拍摄


45°
Front view
Top view


Convergent
Divergent
Parallel
Inclined view
Close-range view
Outcrop surface




1cm
1cm
1cm
2cm


b
Nikon
手持相机
六旋翼无人机
c
固定翼无人机
d
氢气球
e
风筝
f
伸缩杆
g
直升机
h
车载
i
延时照相

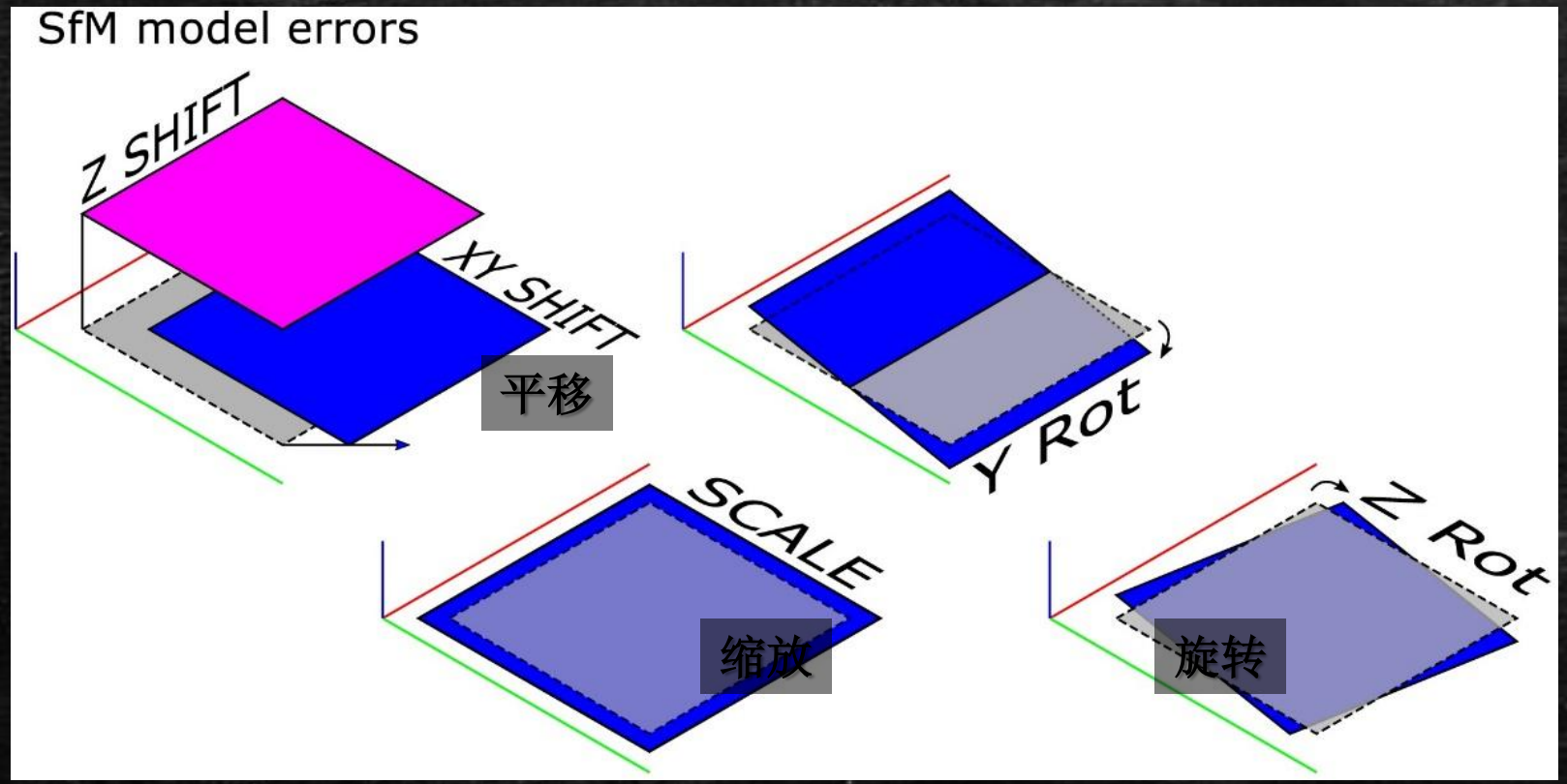


野外作业场景

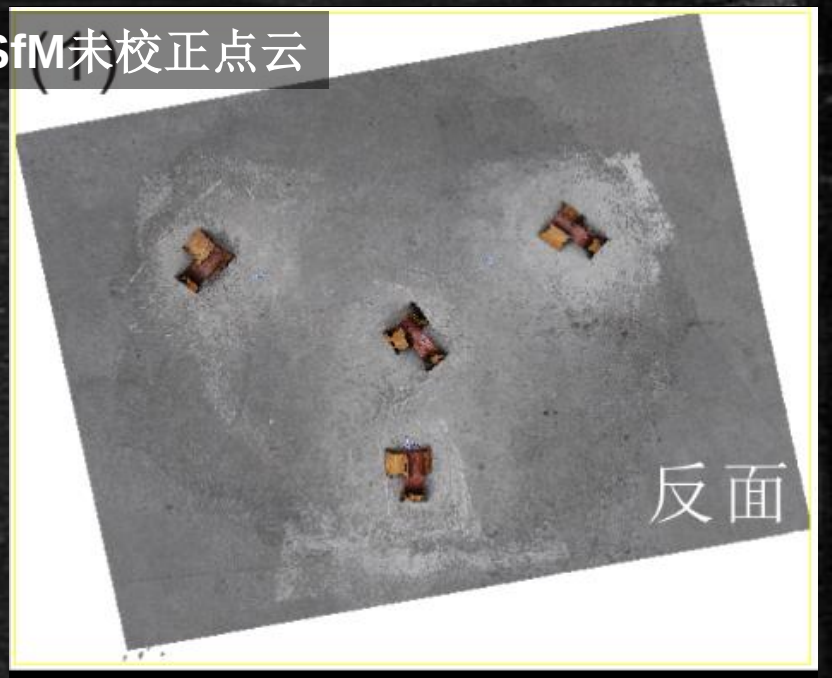
关键环节

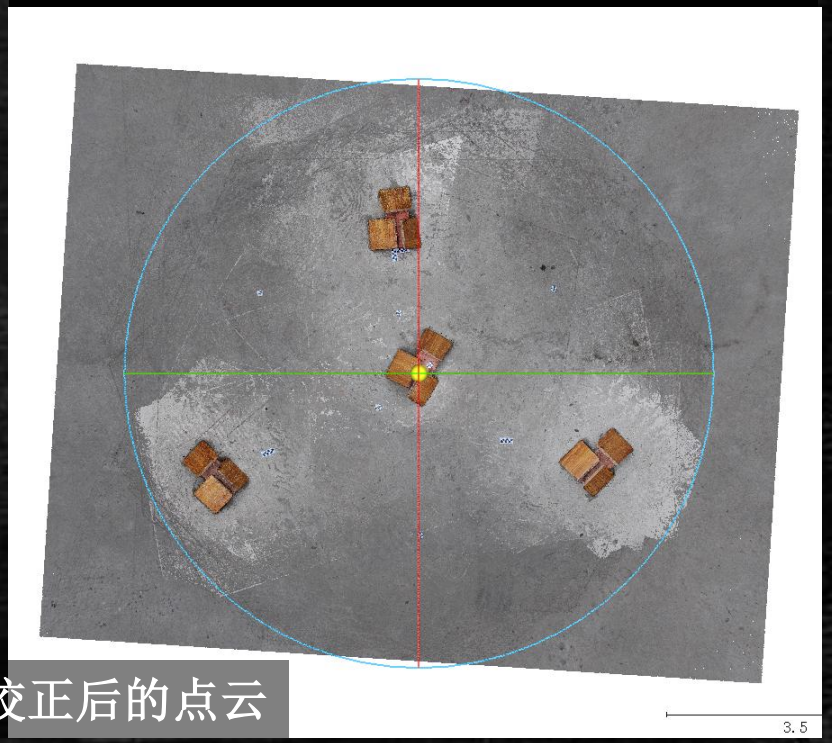
模型姿态校正

SfM因算法固有的特点，生成的三维点云和DSM模型必将**旋转和缩放**，需要使用**RTK-GPS坐标值**校正



SfM模型的缩放、旋转及畸变问题 (修改自Carbonneau et al. 2017)



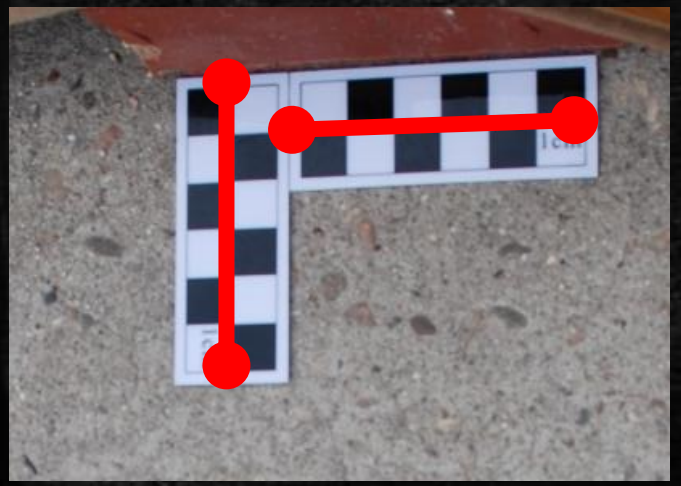


步骤1：针对待测场景，布设控制点或控制面，进行坐标或产状测量

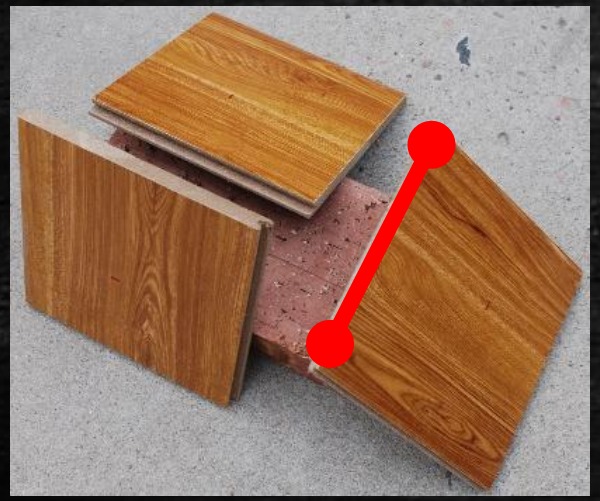
①单组双面



②单水平面



③单倾斜面



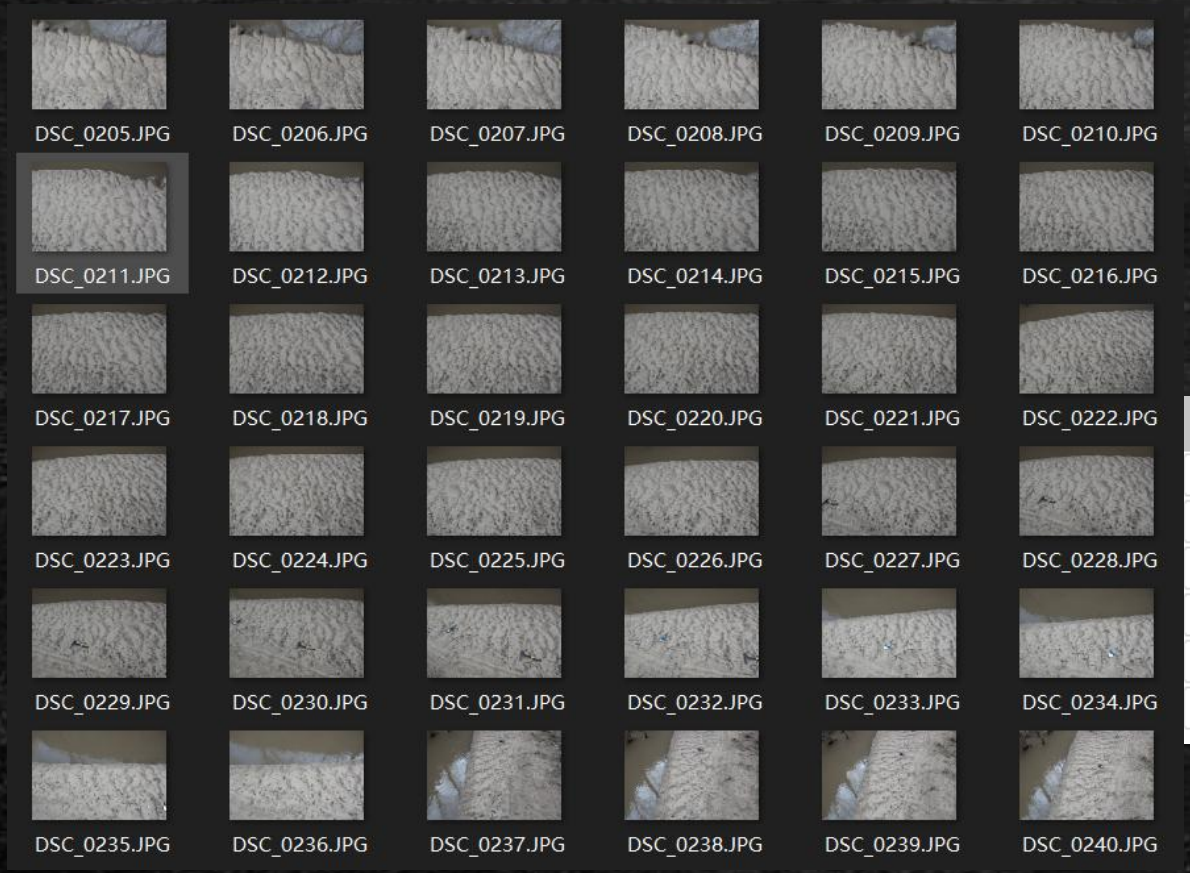






步骤2：照片采集

得到高质量的照片或者影像集



输入

照片集 + GPS坐标或产状值

标记	东距 (m)	北距 (m)	海拔高度 (m)	精度 (m)
point 1	587247.555000	3789572.3520...	381.202200	**0.001200**
point 2	587248.265300	3789572.2690...	381.208100	**0.001400**
point 3	587249.046900	3789572.4190...	381.200500	**0.002500**
point 4	587248.403200	3789571.1410...	381.214800	**0.003000**
point 5	587248.171700	3789571.7890...	381.213500	**0.001500**
point 6	587248.435500	3789572.0190...	381.258100	**0.002500**

步骤3：输入软件进行三维建模

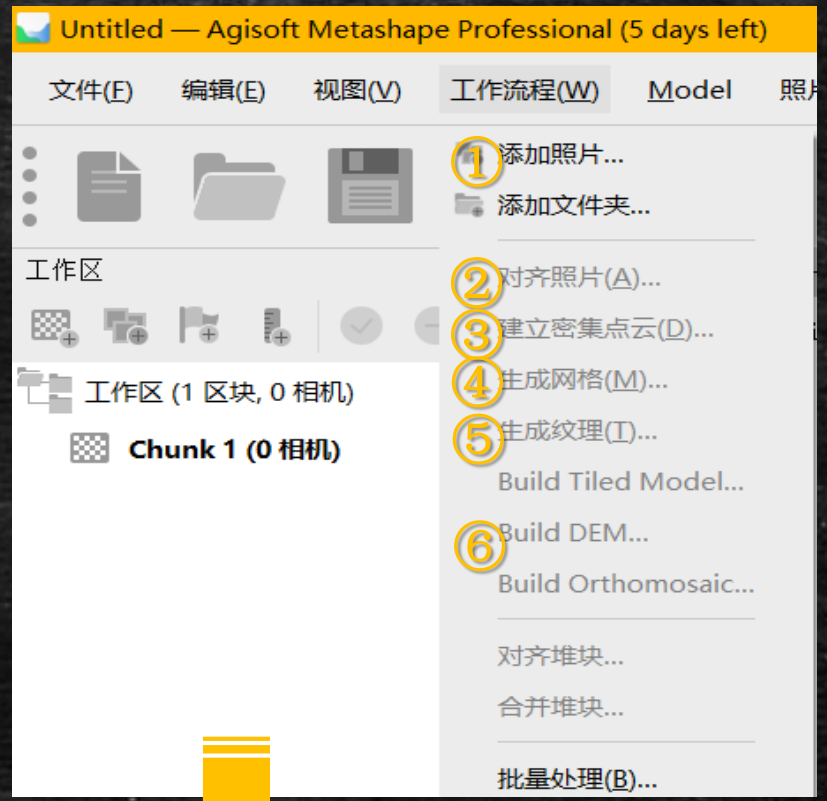
注：可选的软件如PhotoScan

（1）照片质量检查

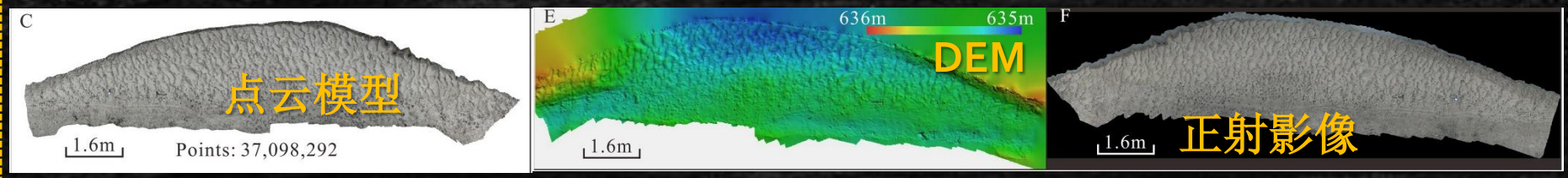
（2）照片对齐（生成稀疏点云）

（3）生成密集点云

（4）生成DEM和正射镶嵌图



输出



校园场景模拟实验建模结果

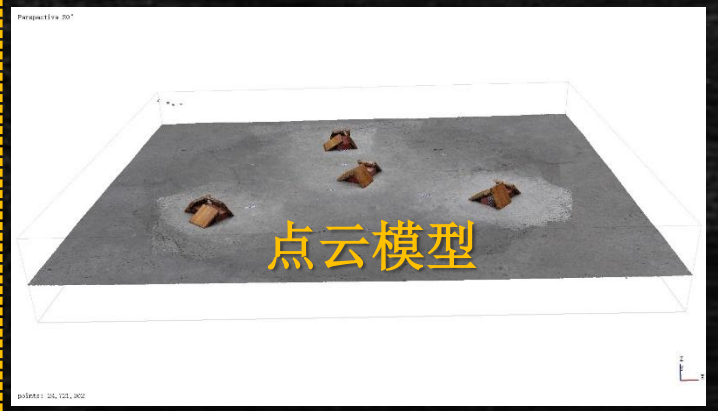
照片采集和模型建立两阶段

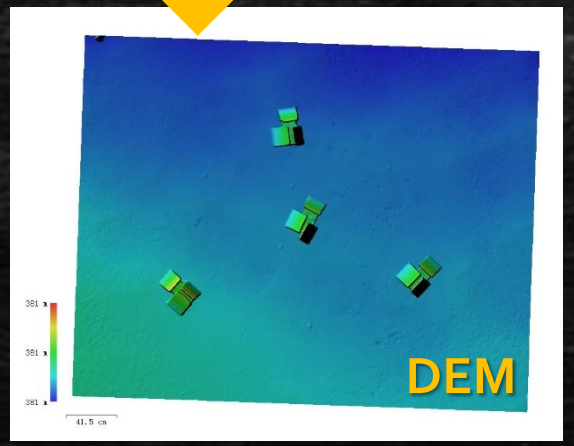
照片采集

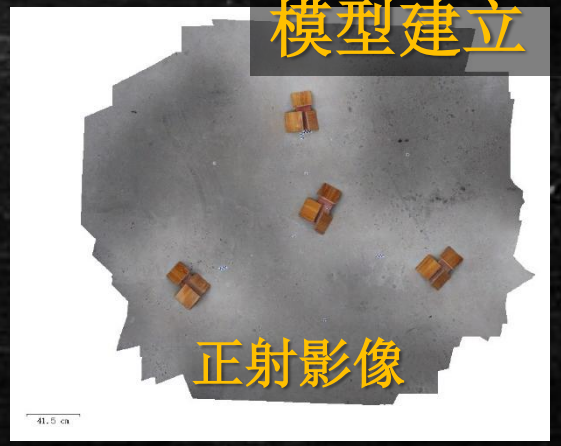


标记	东距 (m)	北距 (m)	海拔高度 (m)	精度 (m)
point 1	587247.555000	3789572.3520...	381.202200	0.001200
point 2	587248.265300	3789572.2690...	381.208100	0.001400
point 3	587249.046900	3789572.4190...	381.200500	0.002500
point 4	587248.403200	3789571.1410...	381.214800	0.003000
point 5	587248.171700	3789571.7890...	381.213500	0.001500
point 6	587248.435500	3789572.0190...	381.258100	0.002500

模型建立



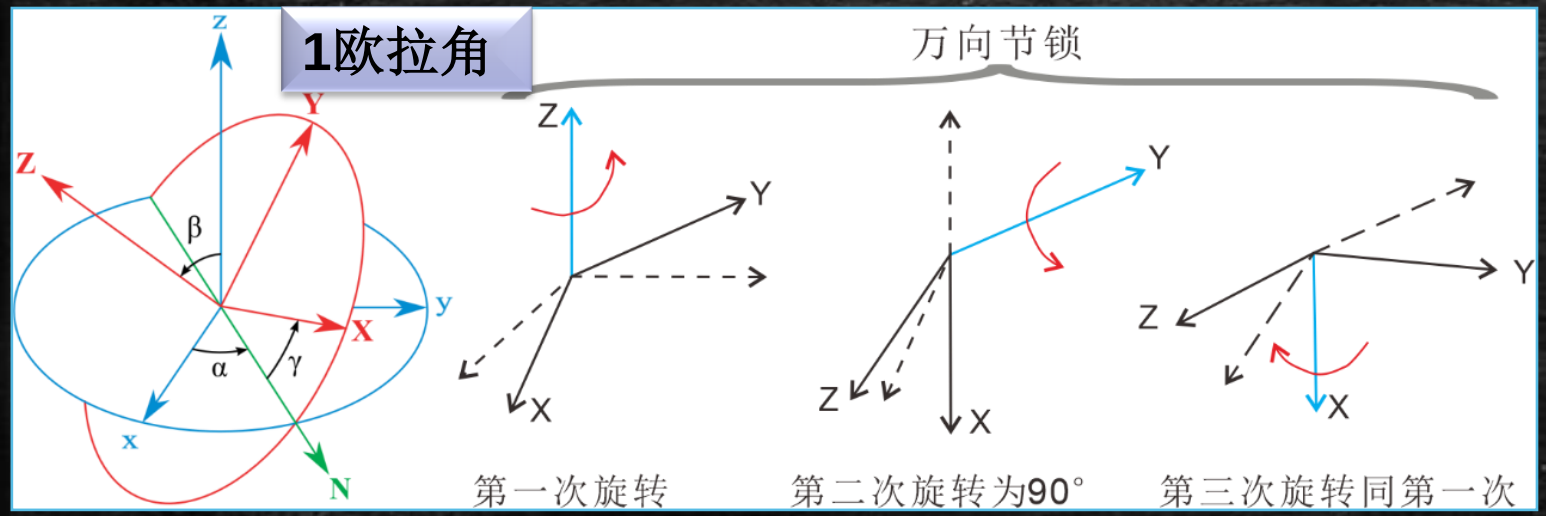


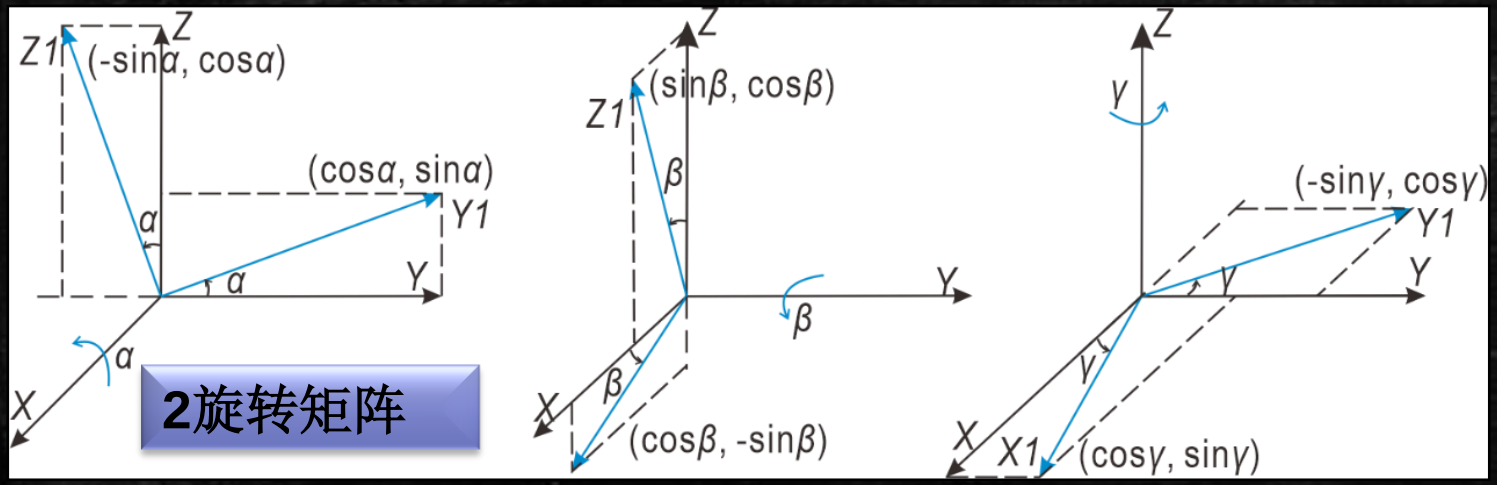


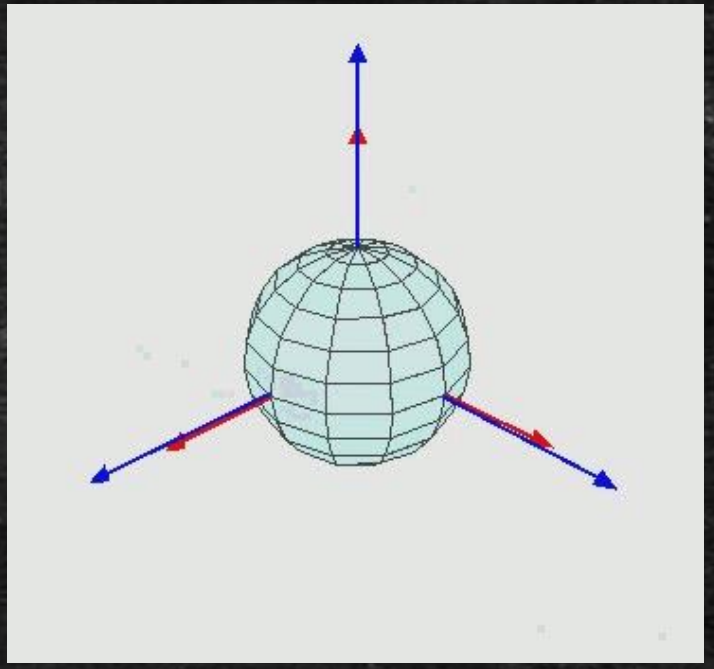
刚体三维旋转

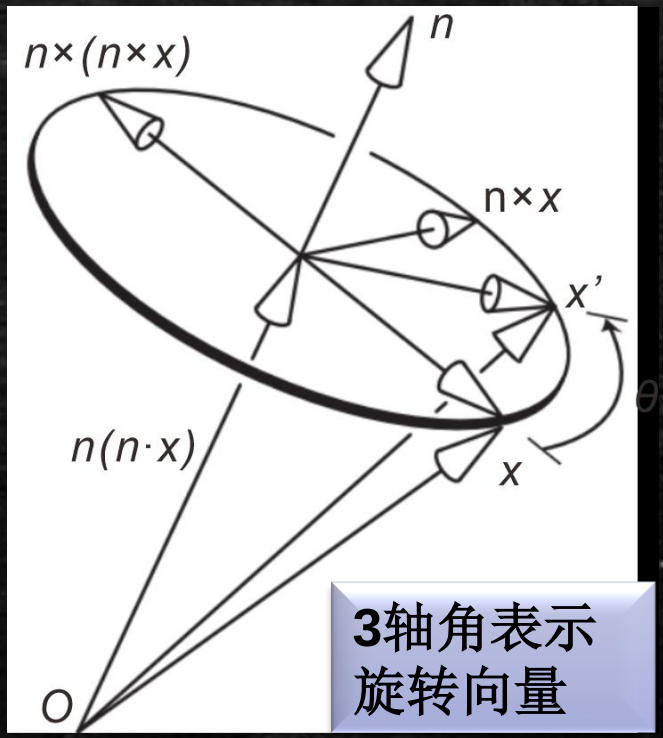
SfM模型→刚体，模型旋转→刚体三维旋转

常见的刚体三维旋转表达方式









产状系统转换：倾向-倾角→NED系统

(1) Trend = strike − 90; Plunge = 90 − d

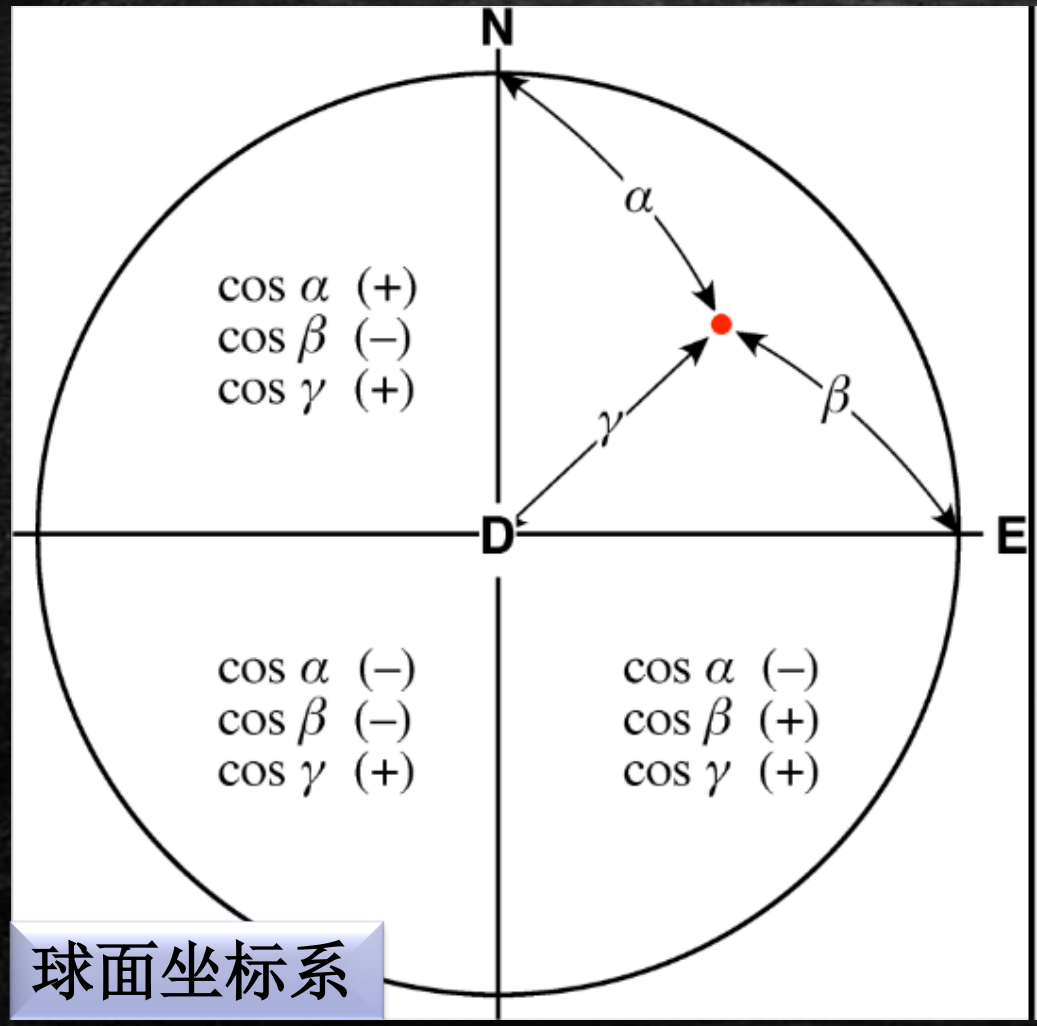
(2) α = Trend; β = 90 − trend; γ = 90 − pl

(3)

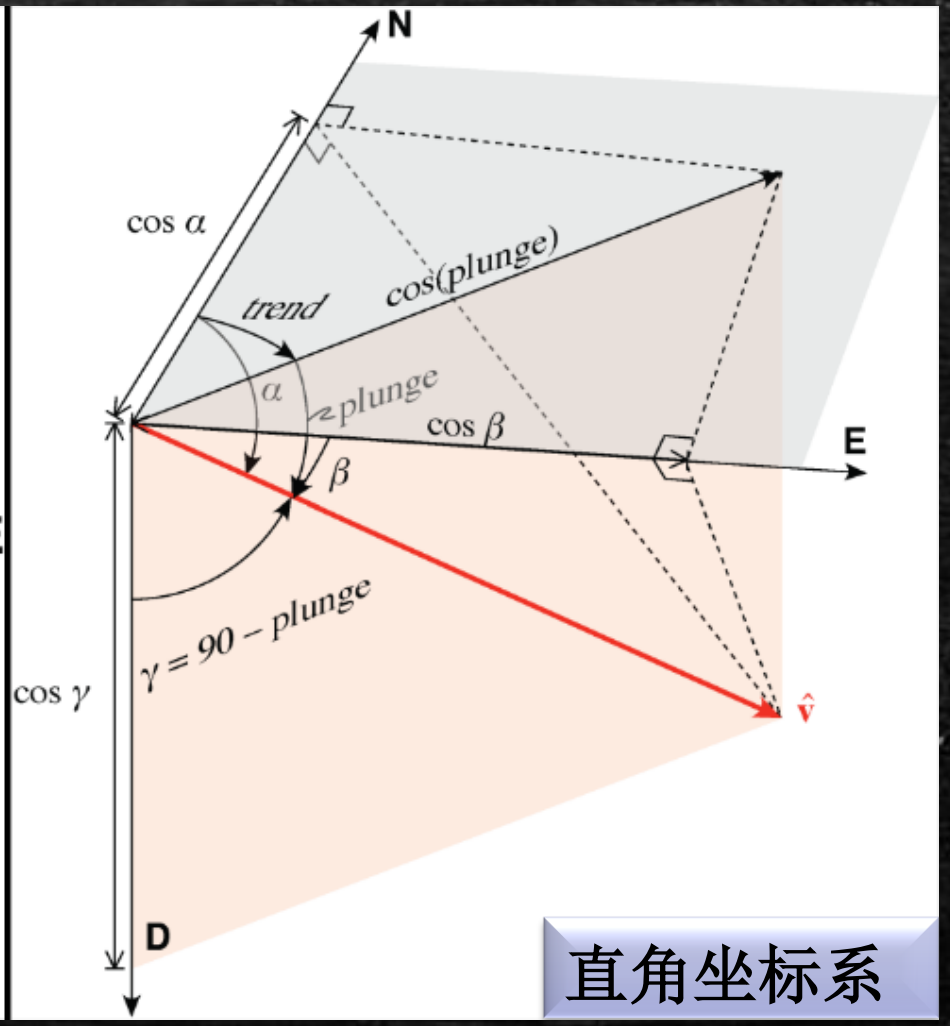
N = cos(β)*cos(α) =sin(strike)*sin(dip)

E = cos(β)*sin(α) = −cos(strike)*sin(dip)

D = cos(γ) = cos(dip)



球面坐标系



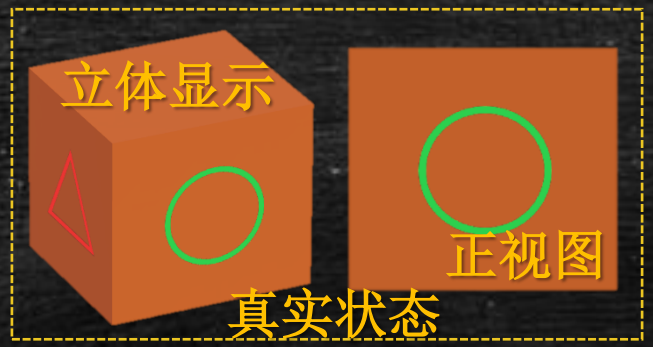
直角坐标系

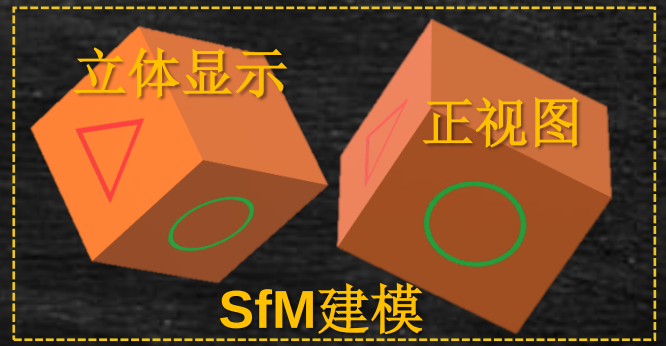
模型姿态校正基本原理

GPS点：至少需要非共线的三个点方可完成模型校正

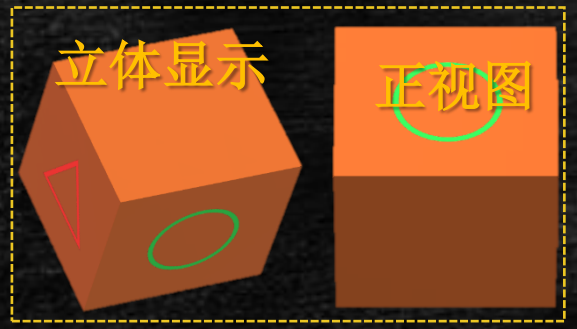
→ **线和面**也可以用来校正 →至少需要<u>两个非平行面</u>！

第一次旋转校正，基本原理如图



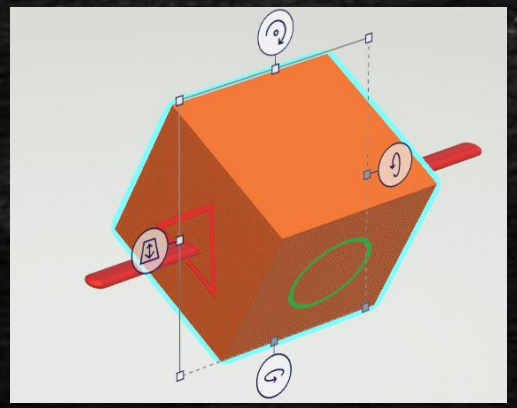


步骤一：单面校正



旋转矩阵R1

步骤二：以三角形所在面的法向量为旋转轴，旋转角度递增来计算最佳旋转角



旋转矩阵R2

旋转角0~360，1°递增

$$R2 = [F1(1), F1(2), F1(3), rMIN]$$

两次旋转矩阵的乘积就是整体的旋转矩阵

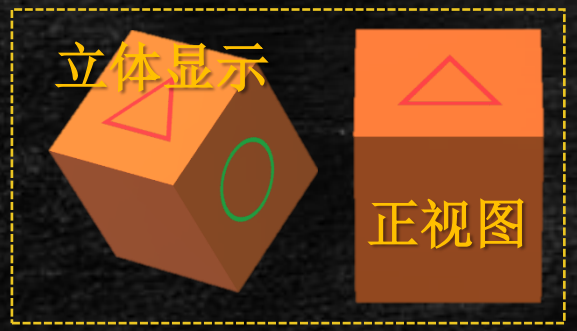
$$R_{total} = R1 \cdot R2$$

第二次旋转校正

基本原理如图



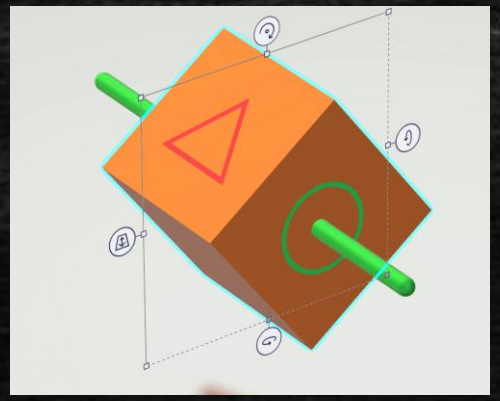
步骤一：单面校正



旋转矩阵R1

步骤二：以圆形所在面的法向量为旋转轴，旋转角度递增来计算最佳旋转角

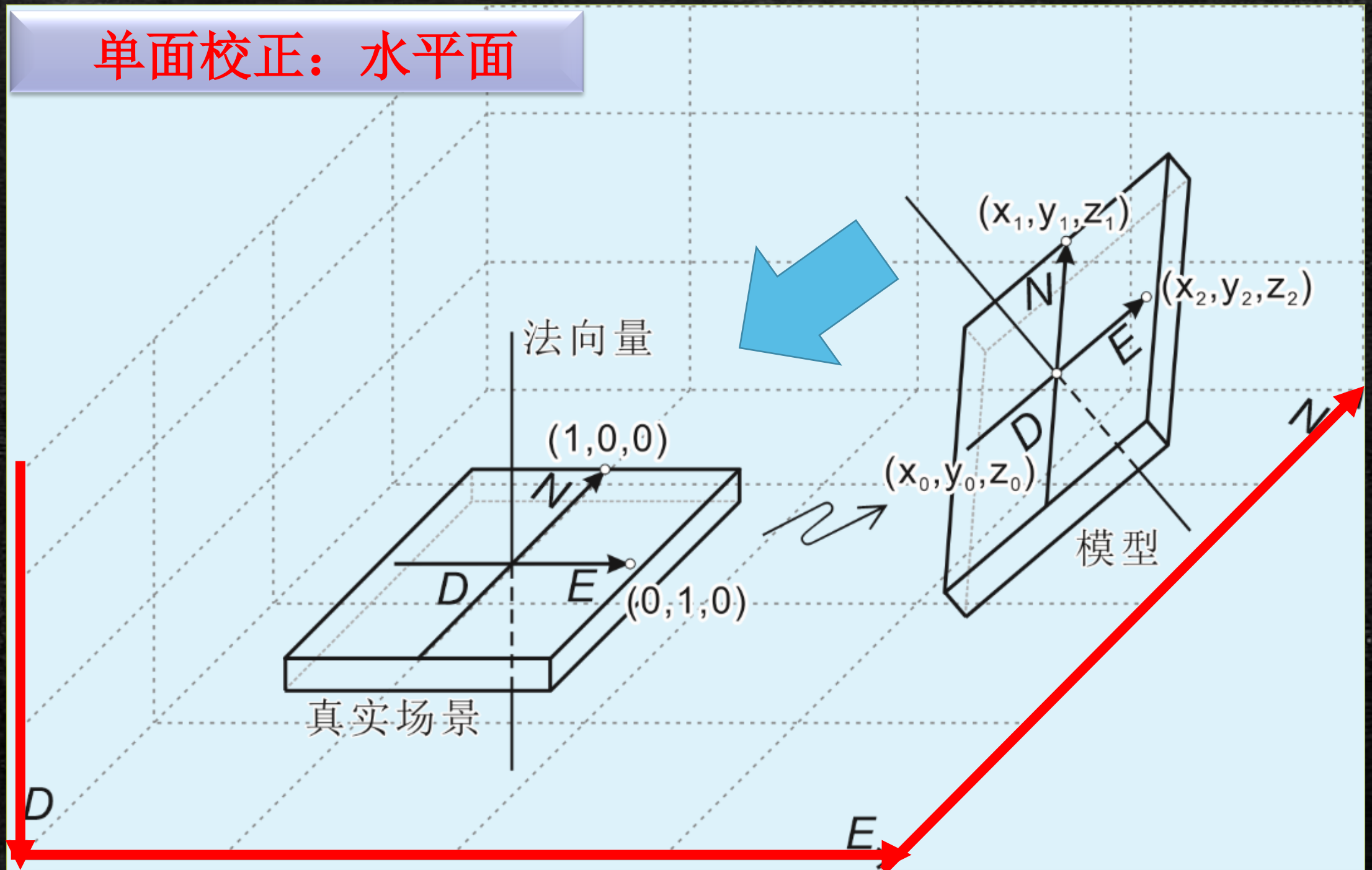
旋转角0~360，1°递增



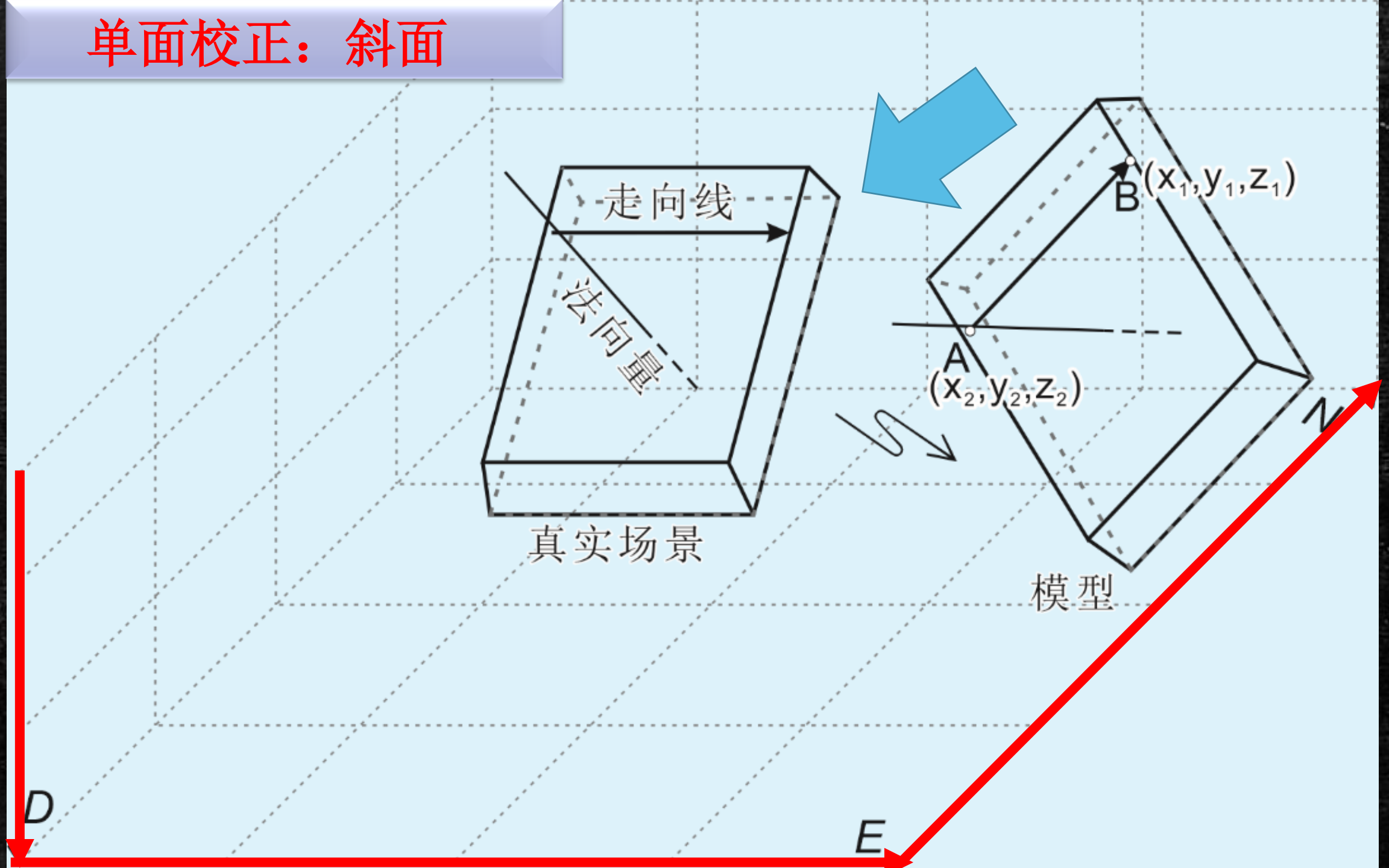
旋转矩阵R2

两次旋转矩阵的乘积就是整体的旋转矩阵

单面校正：水平面



单面校正：斜面



在前人MATLBA代码的基础上，笔者进一步进行了补充完整，使其可适用不同的三种情况。

附录代码

```
clc;clear;
% 选择单面校正或组面校正
prompt = {'校正面个数','是否倾斜'};% 0代表不倾斜，1代表倾斜
dlg_title = '';
num_lines = 1;
defaultans = {'1','0'};
S = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,defaultans);

① % 单个水平面校正，即水平面上存在两相交直线
if S{1} == '1' && S{2} == '0'
    a = input('输入线段真实走向a和b：'); % a和b从现场获取线段走向，例如[0,90]
    p = input('输入线段模型向量p1和p2：'); % p1和p2则从CC软件中选择两点得出，例如
[3.6803,0.0353;0.1335,-2.0803;-0.3132,-0.4633]
    F1 = [sind(a(1));cosd(a(1));0]; % 外业NED坐标,a和b为走向
    F2 = [sind(a(2));cosd(a(2));0];
    N1 = p(:,1)/norm(p(:,1)); % 室内NED坐标,p1和p2为对应向量
    N2 = p(:,2)/norm(p(:,2));
    VecRot = Rigid_rotation(F1,F2,N1,N2);

② % 单个倾斜面（包括垂直）校正，即控制板表面标注有一走向线
elseif S{1} == '1' && S{2} == '1'
    a = input('输入线段真实走向a：'); % a直接从现场获取，例如60
    p = input('输入线段模型向量p：');% p从模型获取如[3.6803;0.1335;-0.3132]
    dipdir = input('依次输入野外和室内倾向：');% 例如[300,275]
    dip = input('依次输入野外和室内倾角：');% 例如[30,48]
    NC = zeros(2,1);
    EC = zeros(2,1);
    DC = zeros(2,1);
    for i = 1:2
```

```
③ % 多组双面校正
elseif S{1} == '2'
    dipdir = input('依次输入野外和室内倾向：');% 例如[300,225,275,224]
    dip = input('依次输入野外和室内倾角：');% 例如[30,30,48,43]
    NC = zeros(4,1);
    EC = zeros(4,1);
    DC = zeros(4,1);
    for i = 1:4
        NC(i) = (cosd(dipdir(i)))*(sind(dip(i)));
        EC(i) = (sind(dipdir(i)))*(sind(dip(i)));
        DC(i) = cosd(dip(i));
        i = i+1;
    end
    F1 = [EC(1); NC(1); DC(1)];
    F2 = [EC(2); NC(2); DC(2)];
    N1 = [EC(3); NC(3); DC(3)];
    N2 = [EC(4); NC(4); DC(4)];
    VecRot = Rigid_rotation(F1,F2,N1,N2);

else
    disp '校正面数量输入失误'
end

function VecRot = Rigid_rotation (F1,F2,N1,N2)

NR1 = vrrotvec(N1,F1); % F1至N1的旋转向量
d = 360;
angle = zeros(d,1);

二次旋转

for a = 1:d;
    NR2test = [F1(1);F1(2);F1(3);degtorad(a)];% 以F1法向量为第二次旋转轴
    test1mat = vrrotvec2mat(NR1); % F1至N1的旋转矩阵
    N2rot = test1mat*N2; % 对N2面进行第一次旋转
    test2mat = vrrotvec2mat(NR2test); % F1法向量转为旋转矩阵
    N2rot2 = test2mat*N2rot; % 模型第二次旋转
    diffvec = vrrotvec(N2rot2, F2); % 计算N2面与实际差异
angle(a) = diffvec(4);
end

[M,I] = min(angle); % 记录最小角度差异值及其索引
NR2real = [F1(1);F1(2);F1(3);degtorad(I)]; % 第二次旋转的最佳旋转向量

mat1 = vrrotvec2mat(NR1);
```



证书号第4041770号

发明专利证书

发明名称：一种用于SfM三维建模的加载激光无级比例尺的水平指南针

发明人：王冉;林靖愉;李路;肖宙轩;惠元秀;辛永辉

专利号：ZL 2019 1 1001388.6

专利申请日：2019年10月21日

专利权人：长安大学

地址：710054 陕西省西安市南二环路中段

授权公告日：2020年10月23日　　授权公告号：CN 110672080 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。

局长
申长雨

2020年10月23日

第 1 页 (共 2 页)

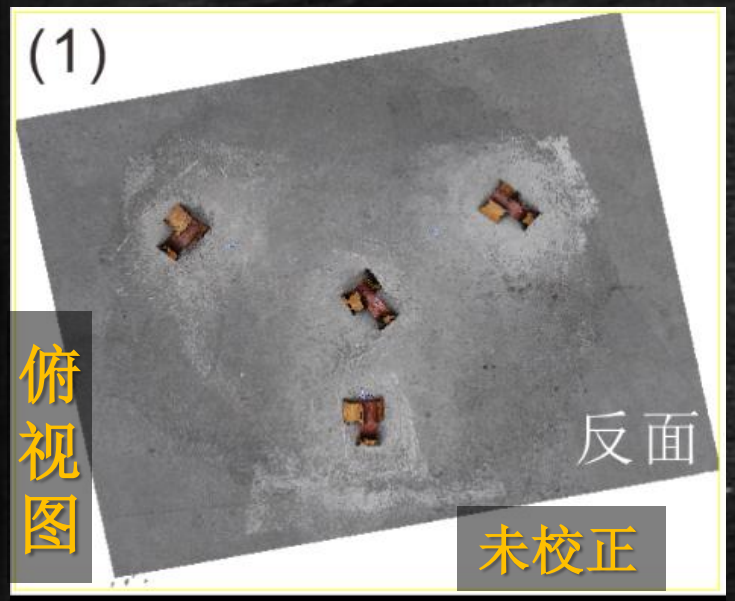
其他事项参见续页

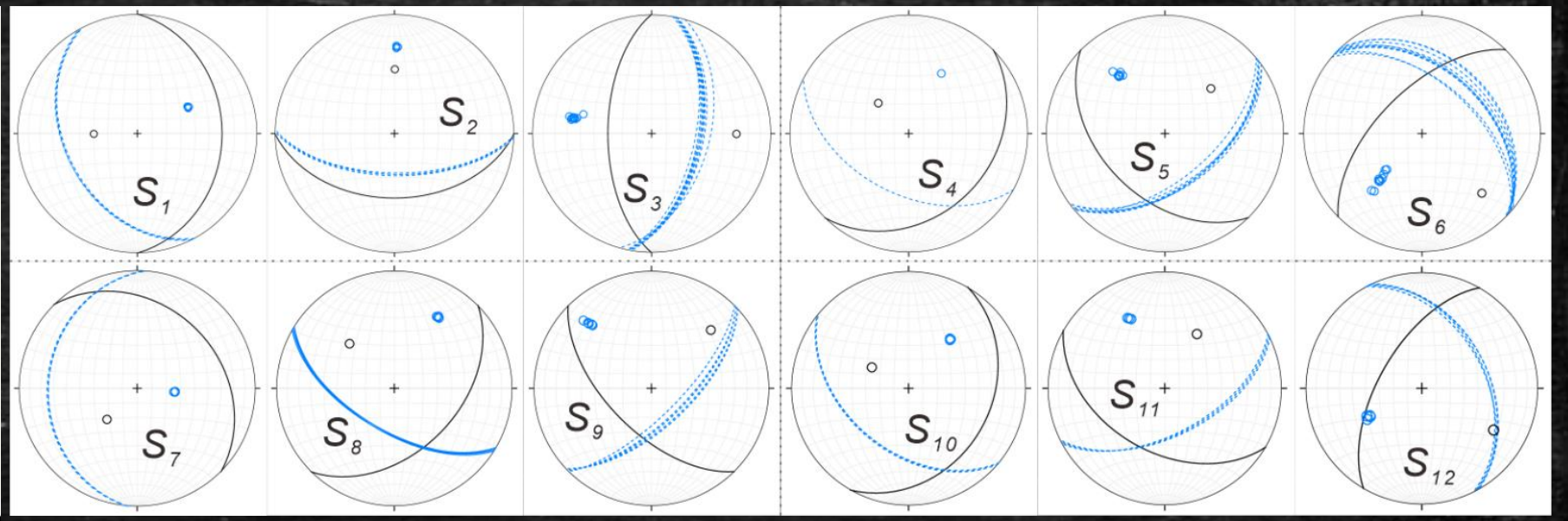
MATLAB代码，林靖愉和王冉，2020，软件著作权在审

Ran Wang, Jingyu Lin , Lu Li , Zhouxuan Xiao , Yuanxiu Hui, Yonghui Xin. A revised orientation-based correction method for SfM-MVS point clouds of outcrops using ground control planes with marks. Journal of Structural Geology，2020，中修改回.

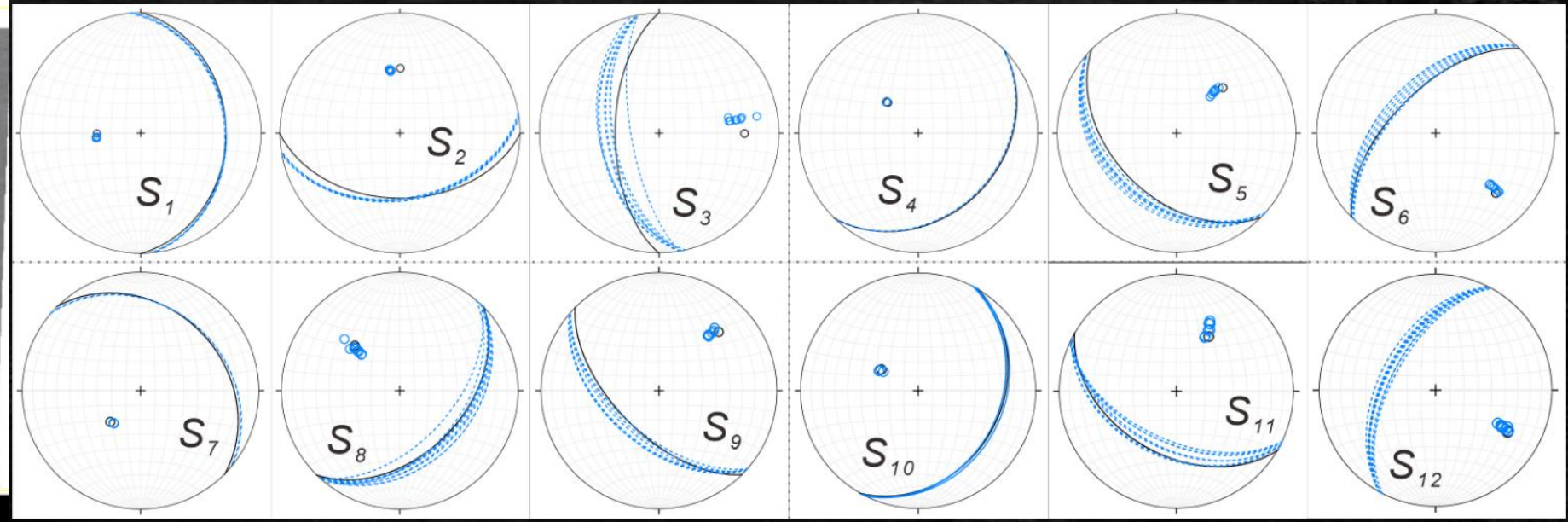
校园场景模拟实验建模结果

十二个面产状极射赤平投影图









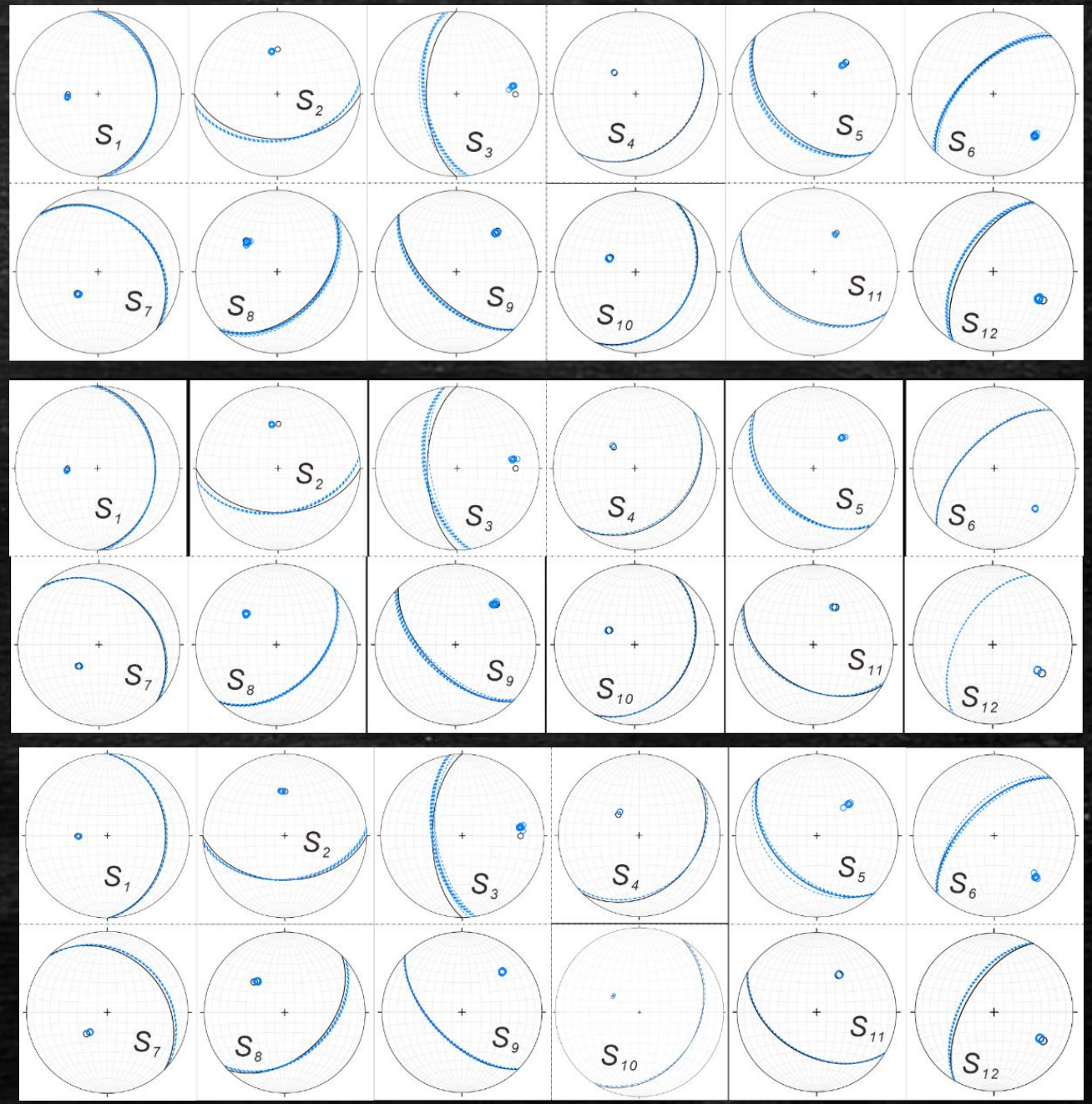
姿态校正结果展示

姿态校正精度足以满足地质工作要求

产状偏差统计表

	倾向偏差	倾角偏差
RTK校正	4.74°	3.02°
单组双面	2.707°	1.983°
单水平面	2.7°	1.683°
单倾斜面	2.592°	1.989°

十二个面的产状极射赤平投影图

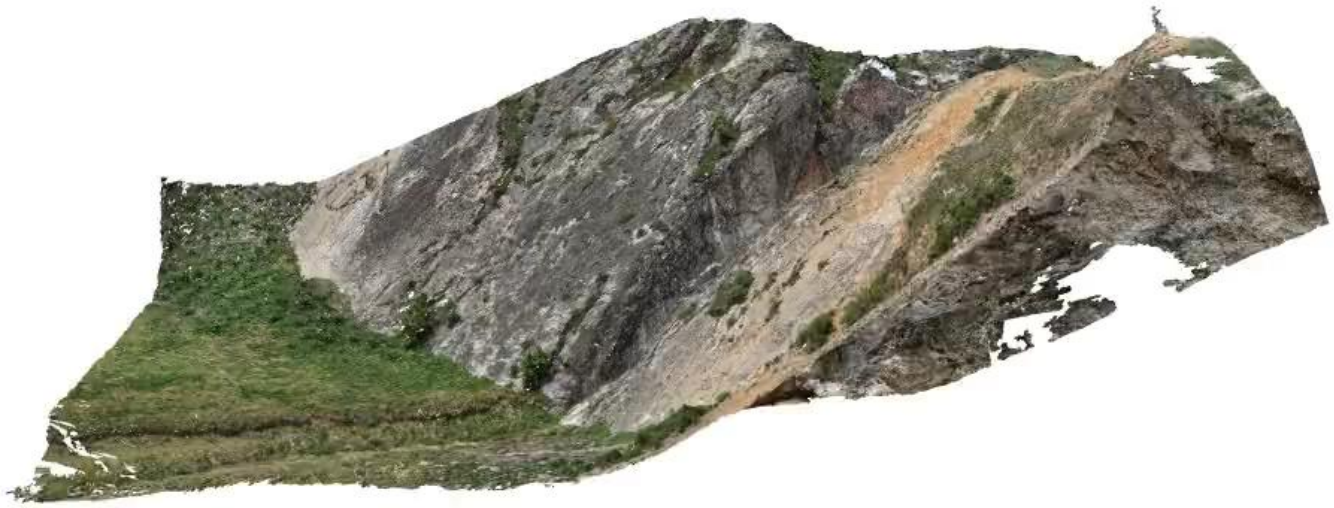


单组双面

单水平面

单倾斜面

实例1：口镇断层



- **王冉**. 基于三维数字露头模型的野外地质教学方法讨论[J]. 中国地质教育，2019，（第四期，ISSN 1006-9372 CN 11-37777/G4）.

实例2：水平地层（雅丹地貌）



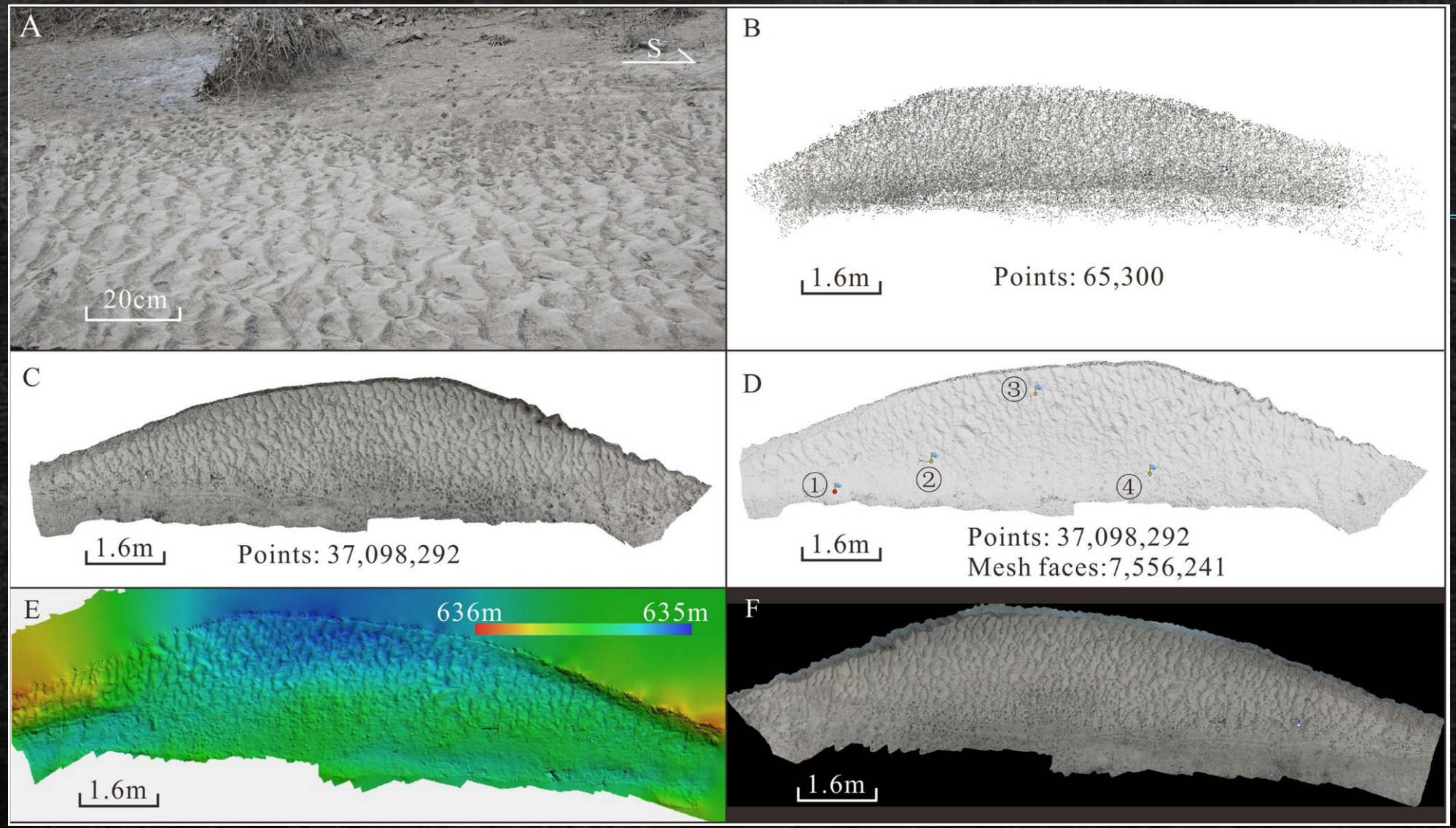
- 肖宙轩，王冉等，2020，待发表，请勿传播

s: 6,876,602 vertices: 3,442,463

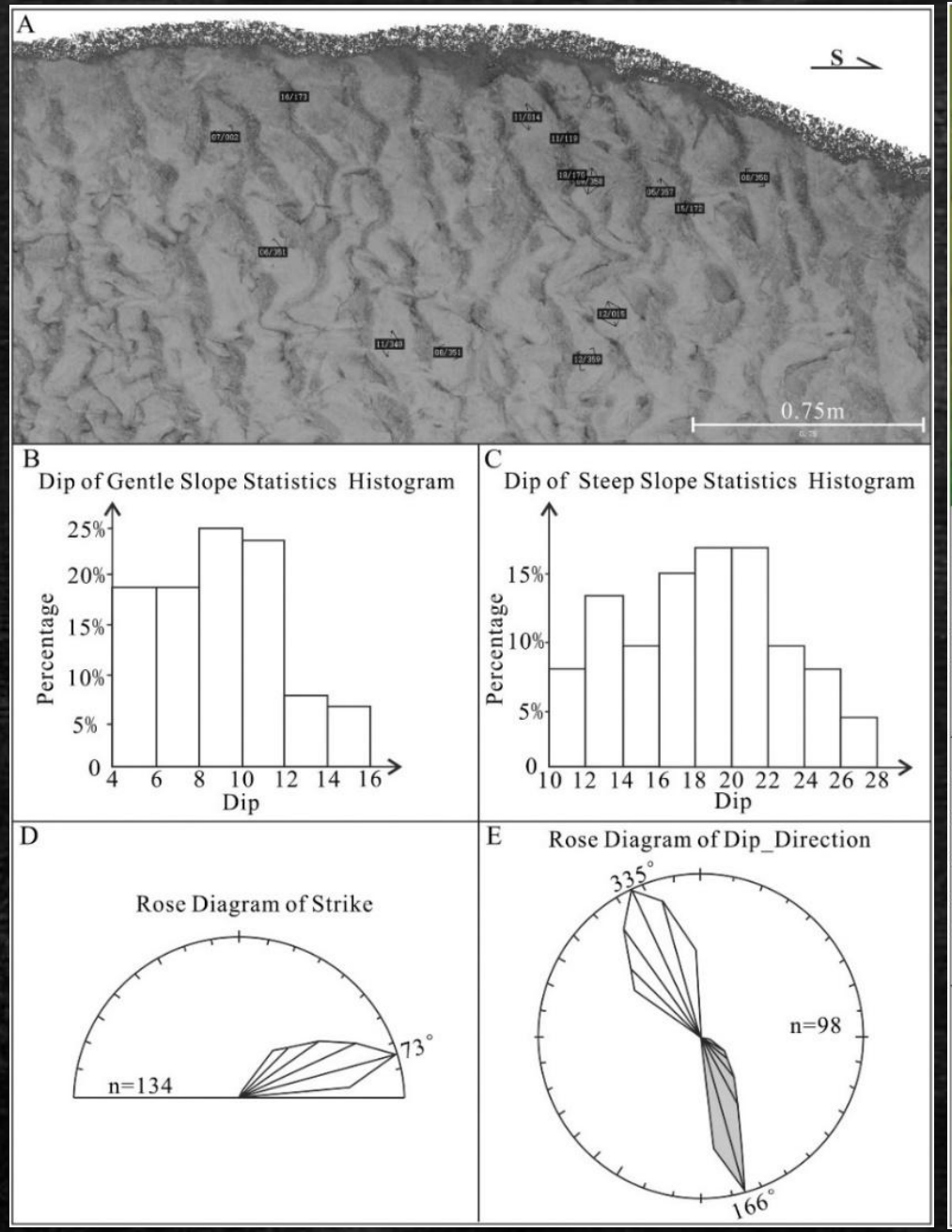
实例3：波痕构造

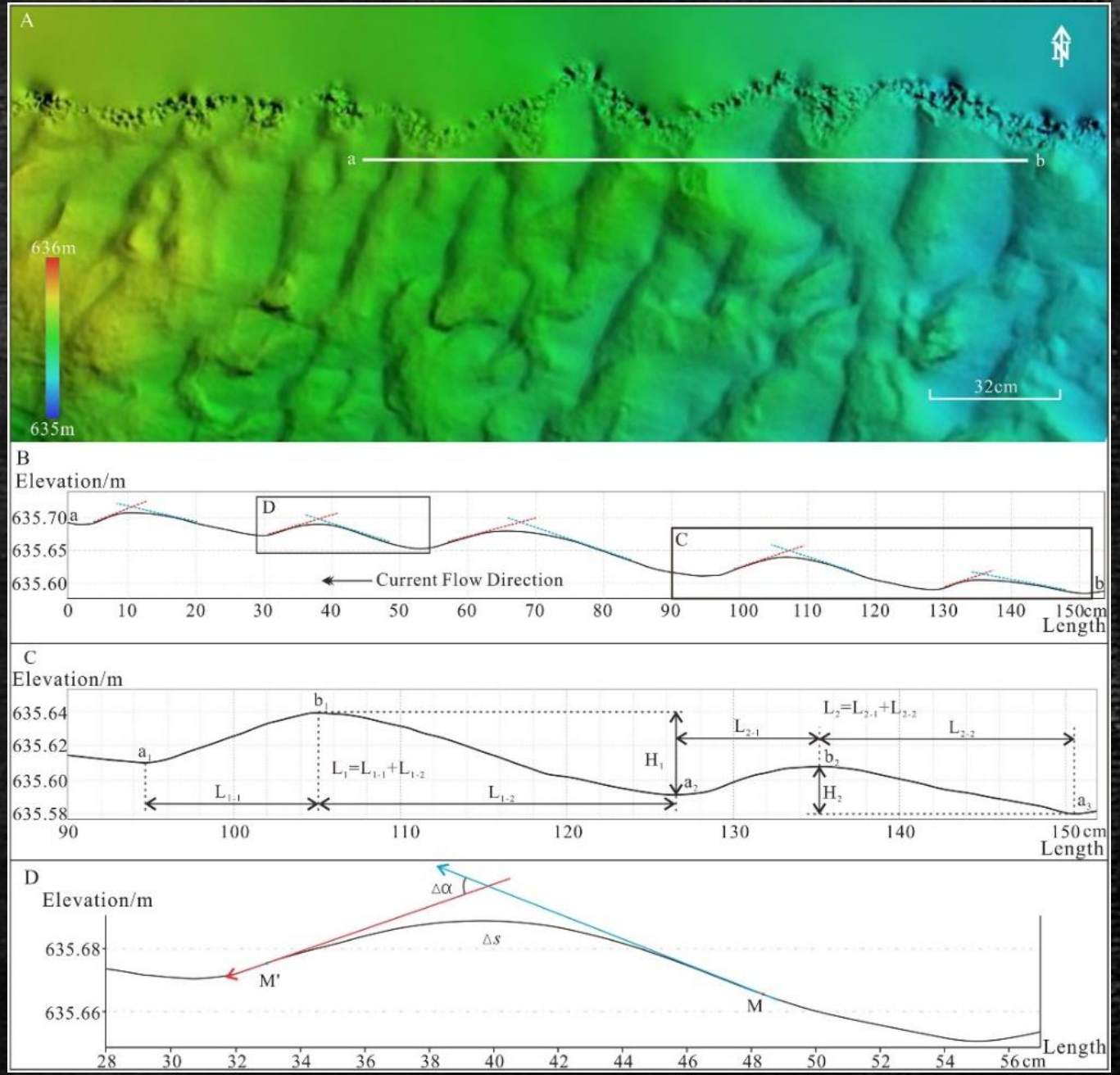


- Lu Li, **Ran Wang***, Jingyu Lin, Zhouxuan Xiao, Yuanxiu Hui. A Novel Approach for Extraction of Ripple Mark Parameters Based on SfM. Sedimentary Geology, 2019, https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.105523.



Lu Li, **Ran Wang***, Jingyu Lin, Zhouxuan Xiao, Yuanxiu Hui. A Novel Approach for Extraction of Ripple Mark Parameters Based on SfM. Sedimentary Geology, 2019, https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.105523.



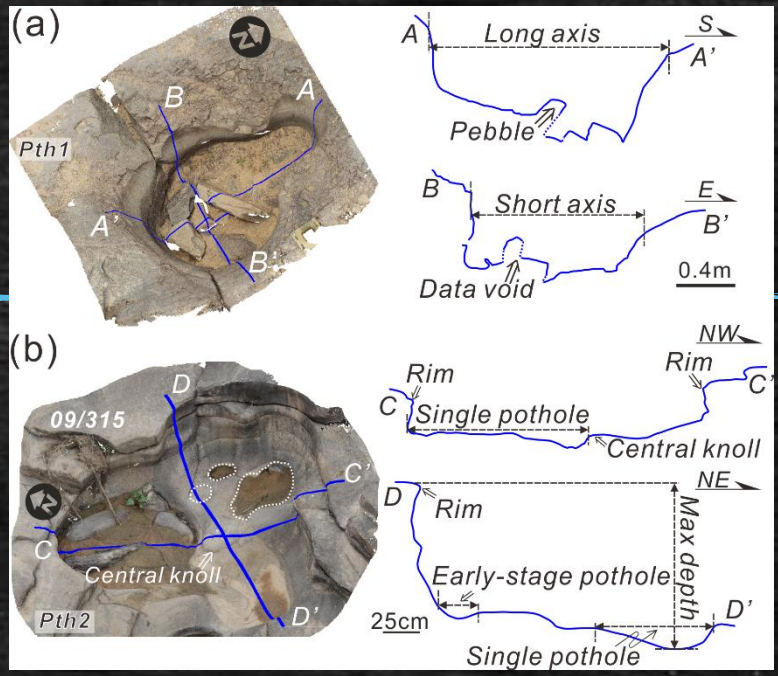


Lu Li, **Ran Wang***, Jingyu Lin, Zhouxuan Xiao, Yuanxiu Hui. A Novel Approach for Extraction of Ripple Mark Parameters Based on SfM. Sedimentary Geology, 2019, https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.105523.

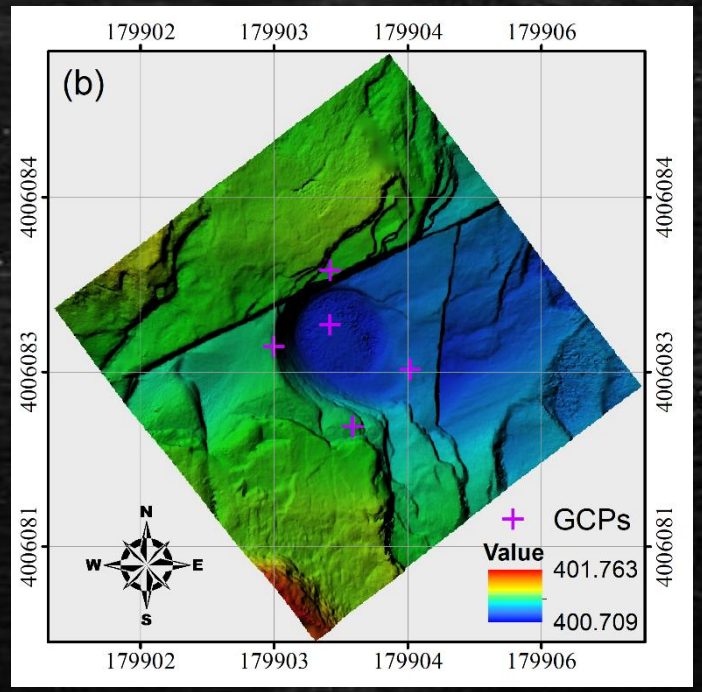
实例4：晋陕峡谷基岩河道中的壶穴

Wang Ran，Lin Jingyu et al.，2020，审稿中

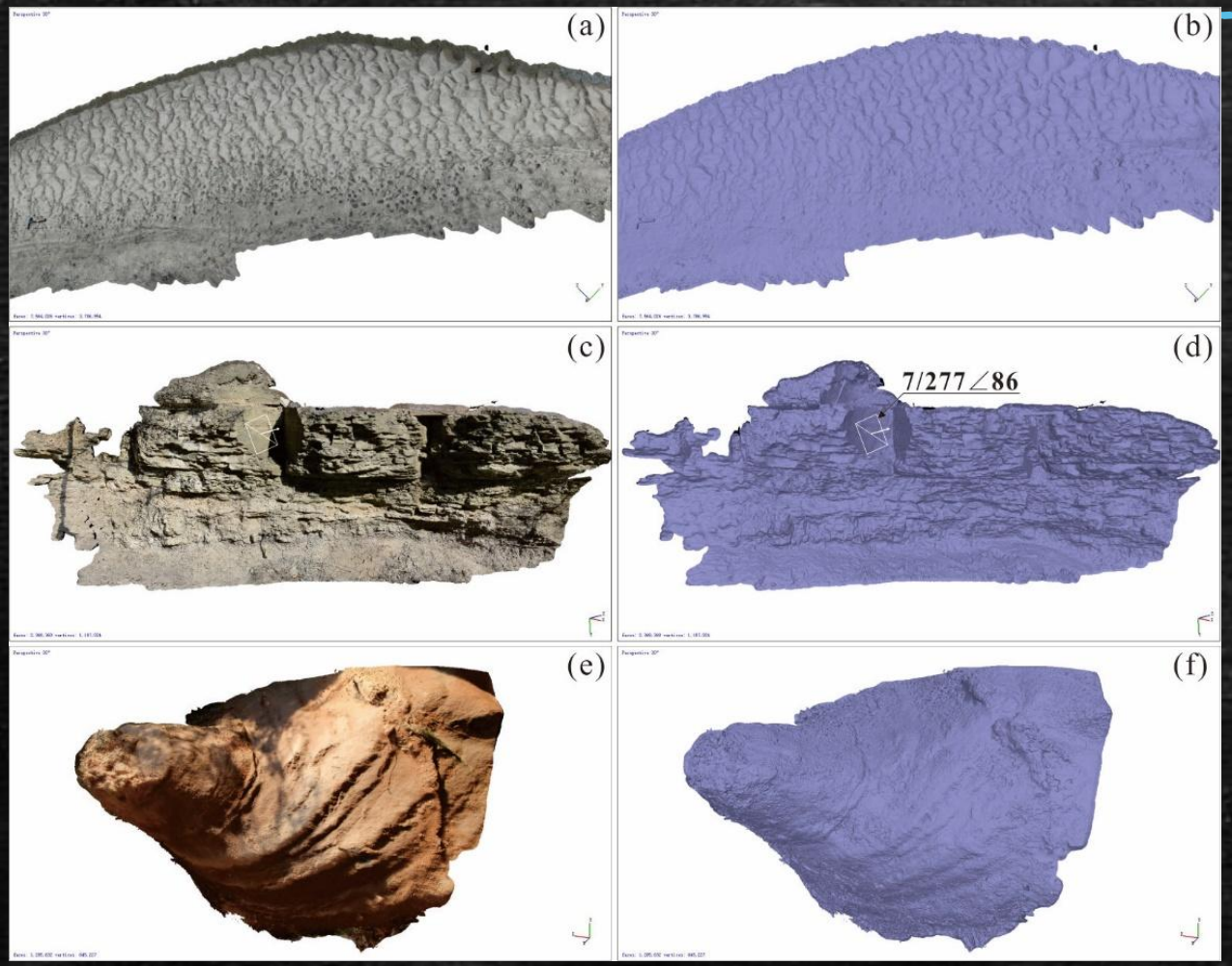
M1—砂岩，地层产状近水平，垂直节理发育
M2—流水携带泥沙砾石
P——机械磨砺
E——气候干燥，干旱少雨
T——初生河谷（绝对年龄未知）

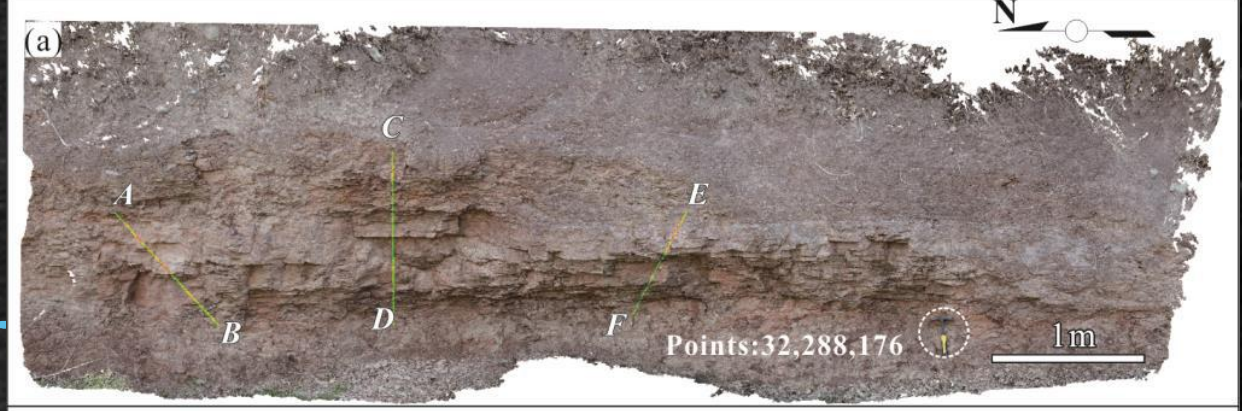


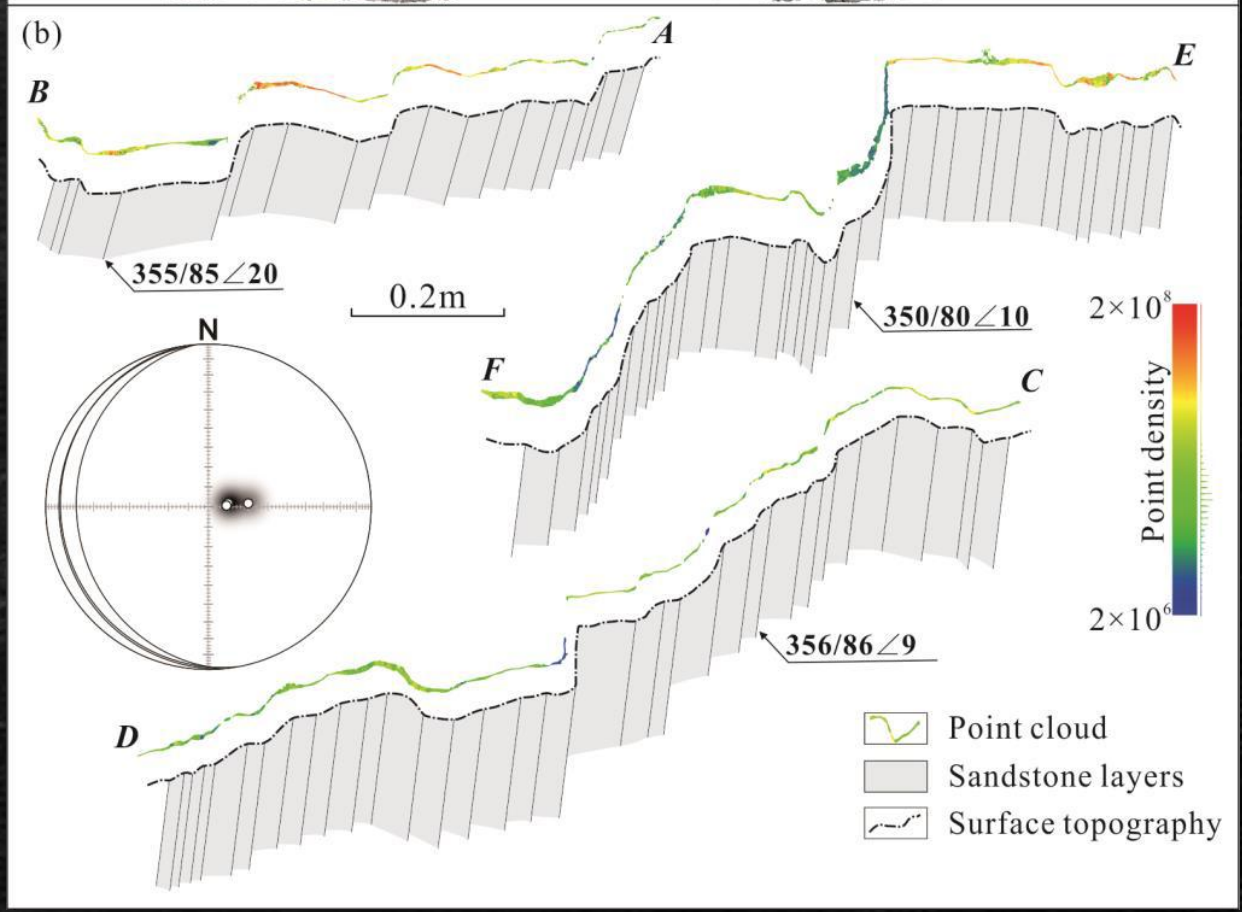




实例5：任意方位剖面图







- Lu Li, **Ran Wang***, Jingyu Lin, Zhouxuan Xiao, Yuanxiu Hui and Wei Zeng. Arbitrary Oriented Outcrop Section Measurement using 3D Point Cloud. ICIVC 2019 conference.
- Jingyu Lin, **Ran Wang***, Lu Li and Zhouxuan Xiao. A workflow of SfM-based digital outcrop reconstruction using Agisoft PhotoScan. ICIVC 2019 conference.

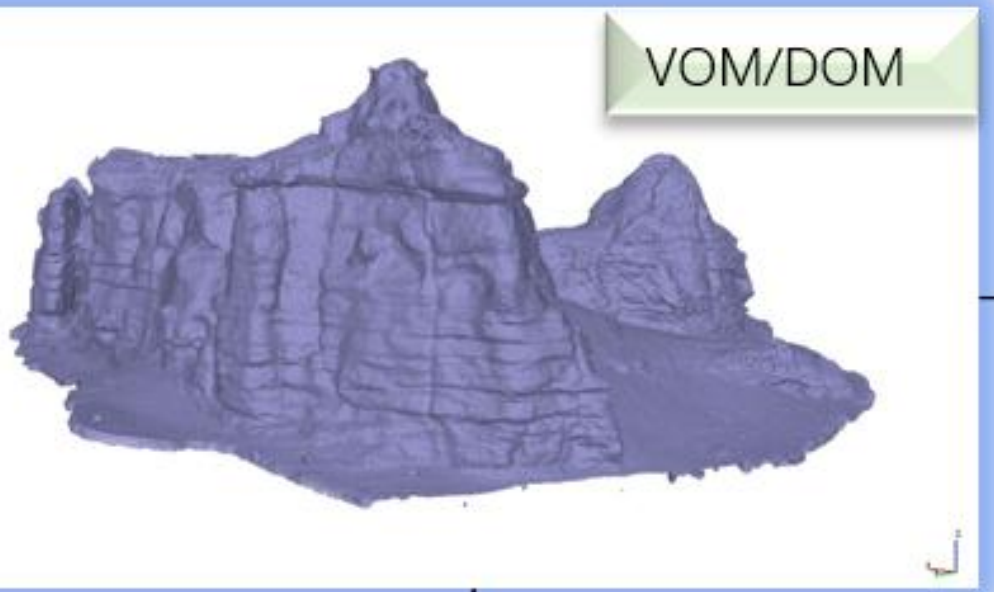
实例6：无信号环境露头建模：隘谷（雕岩谷）





记录和存储

VOM/DOM



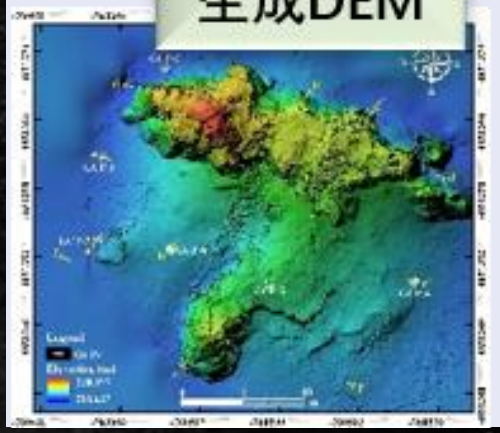


展示和可视化



教学演示

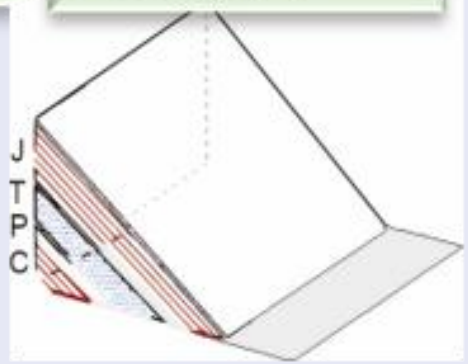
生成DEM



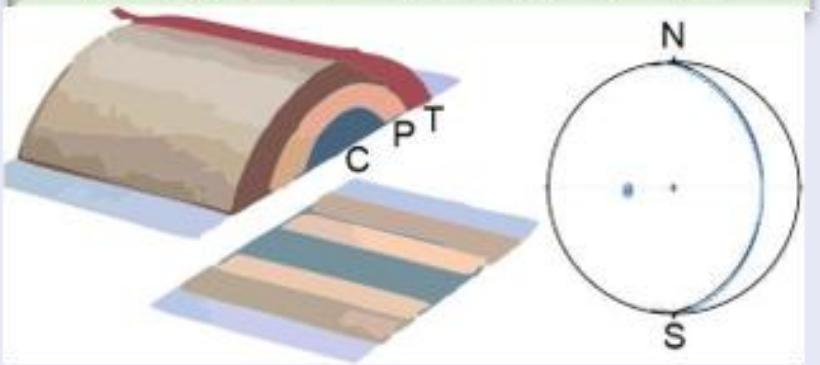
地质勘查和岩土工程



地质填图



对象信息和几何学特征提取



3. 小结

① SfM-MVS点云只能用于具有凹凸性、不反光的静物。

② LiDAR点云相对昂贵，适合大范围地物三维建模；SfM-MVS点云技术非常廉价仅需一台相机，但需姿态校正，适合复杂环境露头地质研究。

③ 通过理论分析，在不考虑大小只考虑姿态的情况下，面和线的产状转换为NED坐标，可替代点的三维直角坐标系坐标。相应地，SfM的姿态校正可有罗盘产状和RTK-GPS坐标两种方式，前者大大降低了成本并提高了野外作业的灵活性。

④ LiDAR点云所测即所得，但SfM点云需要室内较长时间的运算处理，未来可能的解决方案是网络SfM-MVS点云。

⑤ 点云地质应用才刚刚开始，方兴未艾。露头尺度的地质研究，可借助于3D点云在任意视角和某一尺度范围的任意缩放，尤其是产状提取合地质剖面的生成已经可行，应该在实际工作中大力推广。

致谢

- 本成果受以下课题资助：

  ①陕西省高等学校教改项目（**19BY034**），基于真三维模型和视频讲解的野外地质教学改革

  ②广东省矿物物理与材料研究开发重点实验室2020年度开放基金

  ③陕西省基金面上项目，基于主动遥感技术反演雕岩谷发育的构造控制作用

  ④中央高校基金，基于点云数据的数字雕岩谷研究

沁园春——地球信息科学与技术

作者：尼玛修斯，2020年9月4日

巡天遥看，征途何去？万里苍穹。
览行星卫星，风情万种；上帝之眼，行者悟空！

忆想当年，望叹绝壁，只堪图画不堪行。
谁曾想，立天地之间，四海驰骋。
化重磁电震光，感万千物相仪一能。

地气水土生，不在话下；恒星银河，可睹芳容。
莘莘学子，地球信息，观测建模构系统。

思明日，带大智移云，模拟运动。

谢谢！



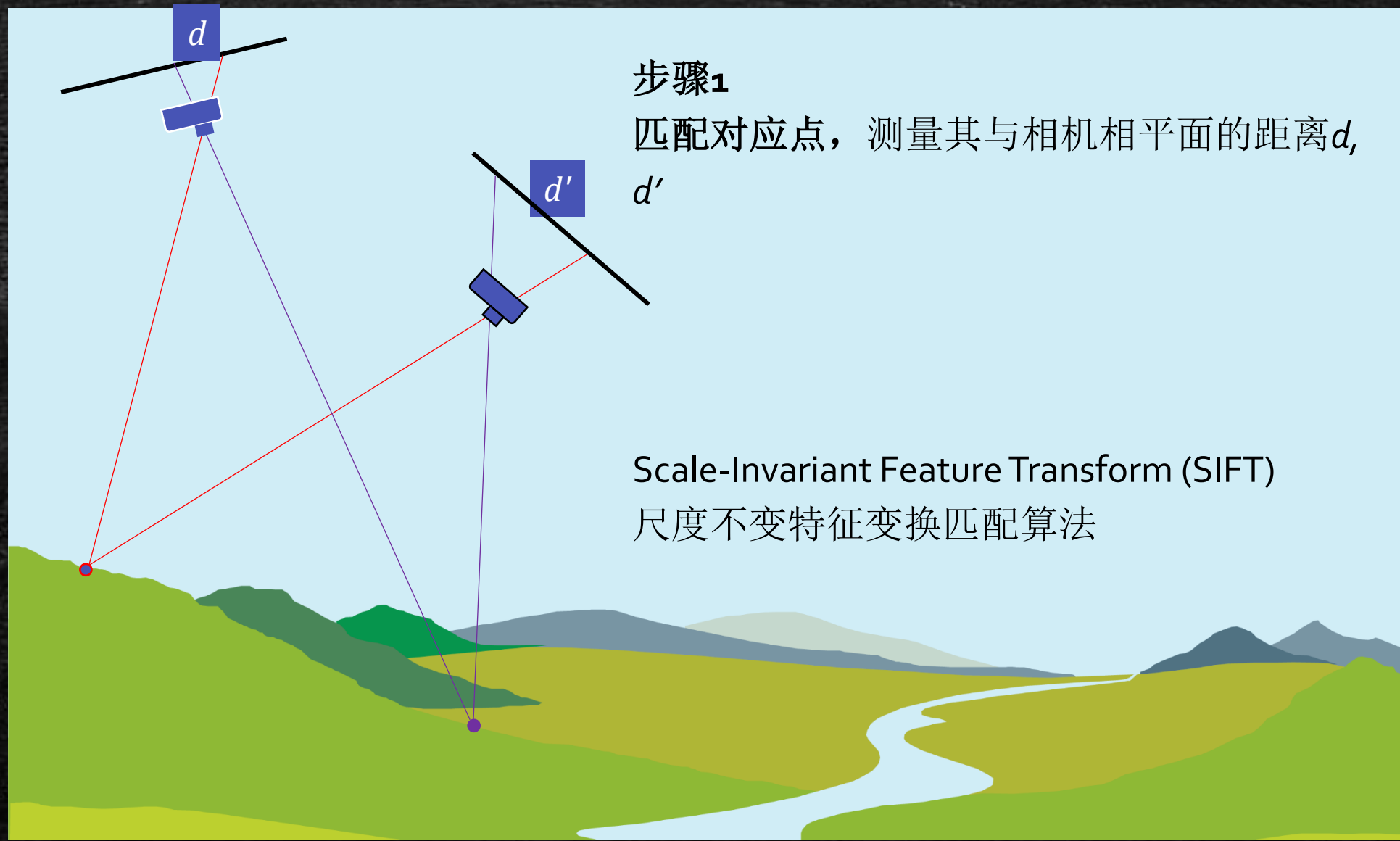
我们都曾青涩，但终将拥有自己的颜色。

古城玫瑰
Ochrosia elliptica Labill.

敬请指正！

附录

特征匹配



步骤1

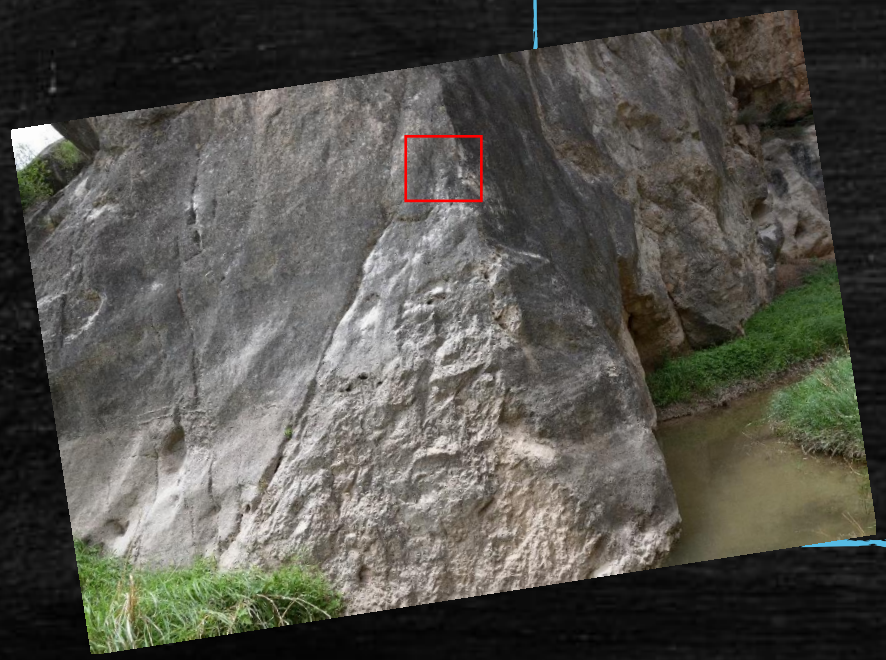
匹配对应点，测量其与相机相平面的距离d, d'

Scale-Invariant Feature Transform (SIFT)

尺度不变特征变换匹配算法

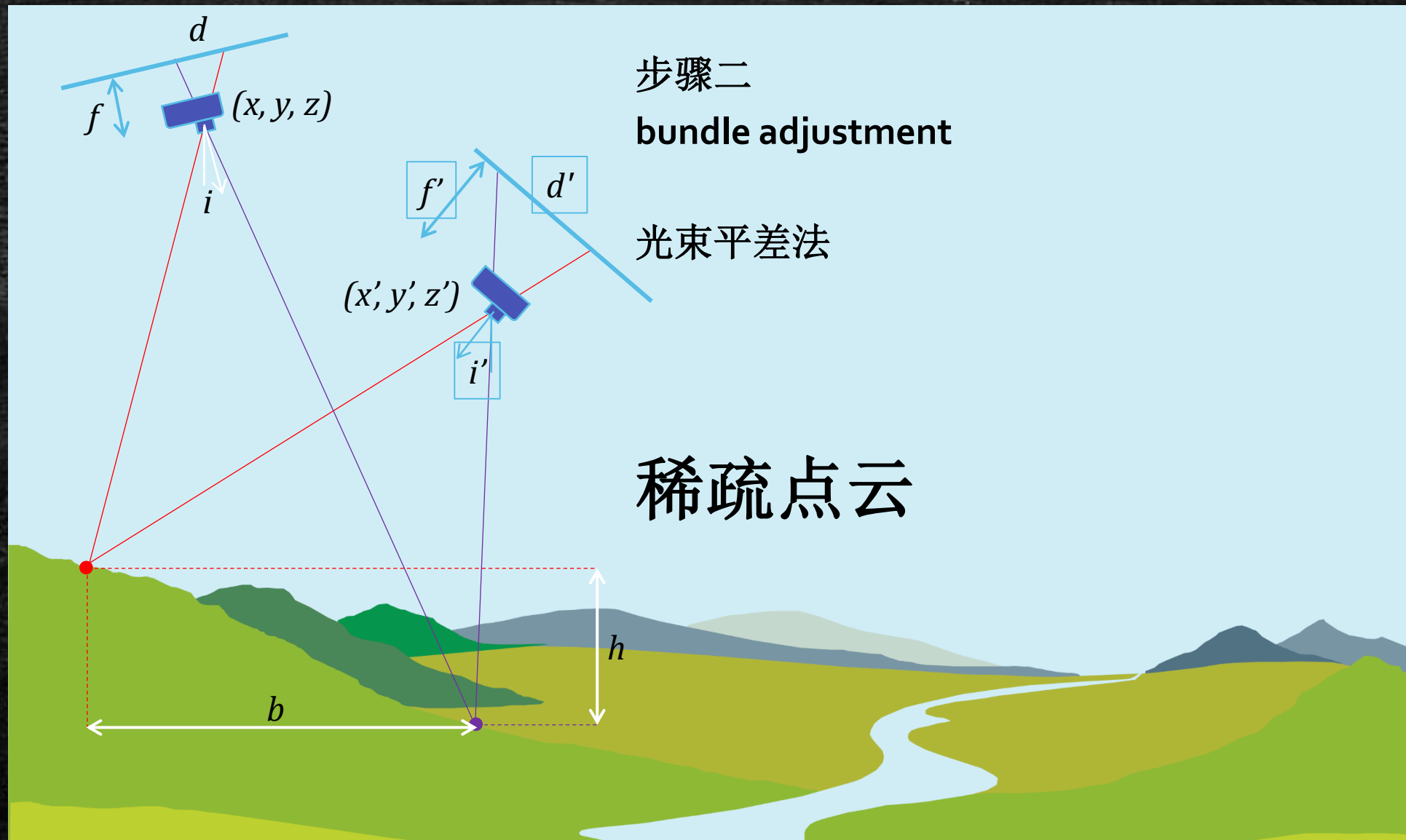








解算相机位置



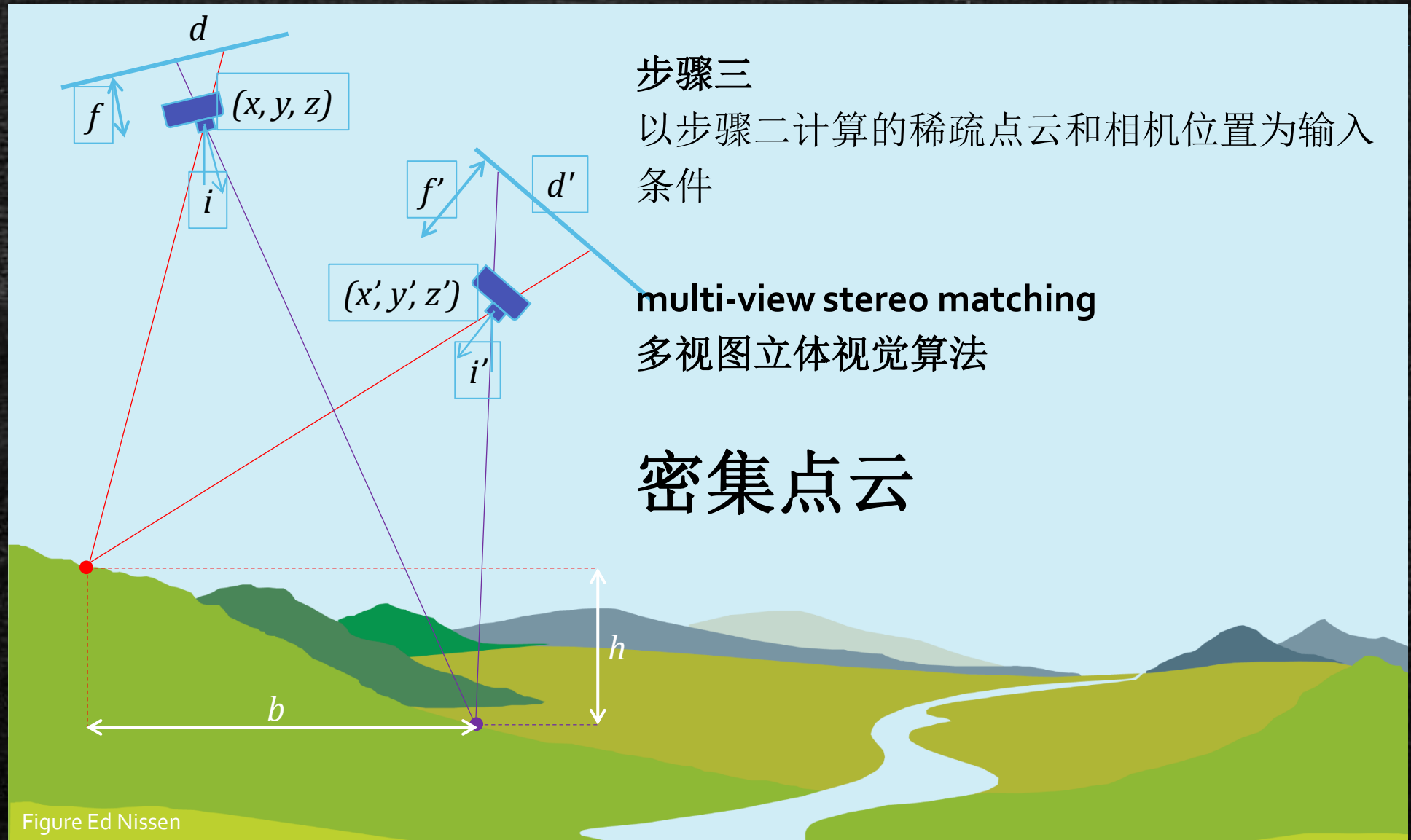
步骤二

bundle adjustment

光束平差法

稀疏点云

多视图立体视觉



步骤三

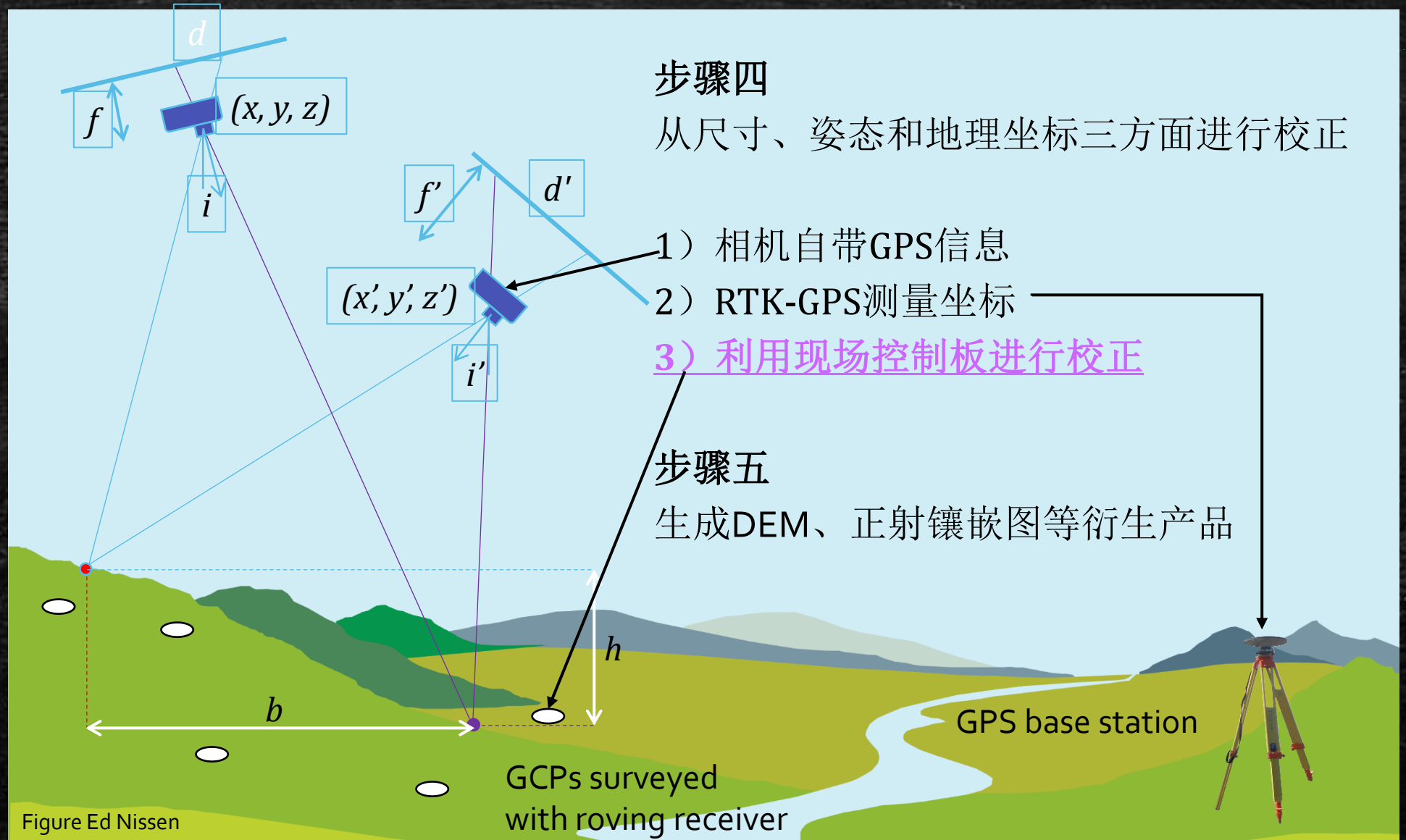
以步骤二计算的稀疏点云和相机位置为输入条件

multi-view stereo matching

多视图立体视觉算法

密集点云

模型校正



步骤四

从尺寸、姿态和地理坐标三方面进行校正

1）相机自带GPS信息

2）RTK-GPS测量坐标

3）利用现场控制板进行校正

步骤五

生成DEM、正射镶嵌图等衍生产品