

OpenMVG : 打开多视图几何

皮埃尔·穆隆¹, 帕斯卡·蒙纳斯 (Pascal Monasse) ², 罗穆德·佩罗特 (Romuald Perot) ³, 和Renaud Marlet²

¹↑Zillow集团 pierrem@zillowgroup.com

²LIGM , UMR 8049 , UPE , 法国马恩河畔尚普 , 巴黎高等商学院

{pascal.monasse , renaud.marlet} @ enpc.fr

³大学 e de Poitiers-Laboratoire XLIM , UMR CNRS 7252 , 法国Futuroscope
romuald.perot@univ-poitiers.fr

抽象。OpenMVG C ++库提供了大量的多视图几何工具和算法，以传播计算机视觉和运动结构技术的使用。它接近其领域的最新技术，可轻松访问从图像进行3D重建的常用工具。遵循“保持简单，保持可维护性”的信条，该库被设计为算法，库和二进制文件的模块化集合，可以独立使用，也可以作为砖块来构建更大的系统。由于其严格的测试驱动开发，该库与单元测试代码示例打包在一起，使该库易于学习，修改和使用。自2013年以MPL2许可的第一版发布以来，OpenMVG聚集了来自众多领域的活跃用户和贡献者社区，涉及爱好者，学生，计算机视觉专家，

关键字：可重现的研究，计算机视觉，多视图几何，3D重建，Motion from Motion，C ++，开源

1引言

如今，由于我们的智能手机，即使在我们的袖珍设备中，计算机视觉也得到了广泛使用。他们执行的某些计算机视觉任务包括使用基于图像内容的搜索检索（条形码，类似产品搜索）拼接图像以创建平面马赛克和球形全景图，以及根据照片执行3D重建。此外，越来越多地使用图像创建3D内容：例如，

将我们的世界数字化（例如调查，制图，VFX）或在线应用程序（游戏，AR / VR），将游戏的动态元素数字化（Kinect）以及车辆的自动导航都是时髦的话题。

关于与3D重建相关的广泛应用范围和计算机视觉技术的各种需求，很明显，如果可以使用通用框架进行交流，进行实验和构建新原型，则可以从社区中受益匪浅。通常，高级和通用工具（例如Matlab或Intel IPP）⁴

使用过，但它们并不是最佳选择，因为除了价格昂贵之外，它们还没有全部

⁴英特尔集成性能基元 <https://software.intel.com/zh-cn/intel-ipp/>

实现所需的算法。它们仅包括主要的多视图几何 (MVG) 算法的子集，并且不专门用于运动结构 (SfM)。其他替代方案（例如OpenCV）可能很有吸引力，但同样，仅存在部分实现。由于这些替代方案希望覆盖很大的应用范围，因此它们不关注有效视图中的多视图几何和从图像进行3D重建。

2摄影测量软件的替代品

摄影测量学是从照片进行测量的科学，特别是用于恢复表面点的精确位置。域已成熟；在互联网上见证⁵列出了80多种软件解决方案（商业，免费或开源）。由于无人机的出现正真正掀起土地测量领域的革命，如今，利用图像进行3D重建已成为现实，如今低空图像的获取已成为一项廉价而简单的任务。

我们在这里对多视图几何 (MVG) 和多视图立体视觉 (MVS) 软件进行了区分。前者与从数据（图像和相机内在特征）中恢复相机的位置和方向有关。它还提供了稀疏的3D点集，这些点是通过对照片中观察到的特征点进行三角剖分而建立的。后者处理密集的3D重建；其输出可以是密集的点云，刻面表面（网格）或一组平面，可以将其可视化为场景的逼真的3D渲染。它依靠MVG来实现。

商业软件。 该解决方案将MVG和MVS集成在单个产品中，围绕着它们所针对的市场进行了集群：Pix4D产品解决了无人机土地勘测问题⁶和DroneDeploy软件⁷，而大型近距离摄影测量市场主要由Bentley ContextCapture解决⁸和捕捉现实⁹软件。

免费软件。 Visual SfM (VSfM [13]) 是一种广泛使用的解决方案。简化其使用的要点是由于该软件附带图形用户界面（GUI），并且在CPU和GPU上使用多线程来提高效率。

开源解决方案。 虽然有些解决方案提供了软件程序（Bundler [1]，ColMap [39]，MicMac [40]，PMVS [35]，CMVS [34]），但其他解决方案同时提供了库和软件的集合（MVE [37]），OpenMVG，OpenSfM [41]，OpenMVS [42]，TheiaSfM [38]）¹⁰。将OpenMVG与OpenMVS或MVE结合使用可提供端到端的开源摄影测量流程。

⁵ [# 比较](https://zh.wikipedia.org/wiki/比较_照相测量法_软件)

⁶ <https://pix4d.com/>

⁷ <https://www.dronedeploy.com/>

⁸ <https://www.bentley.com/cn/products/brands/contextcapture>

⁹ <https://www.capturingreality.com/>

¹⁰ 看到 https://github.com/openMVG/awesome_3DReconstruction_list

从用户的角度来看，商业和免费软件解决方案就像无法根据用户需求进行调整或修改的黑匣子，而开源解决方案则提供了完整的流水线和可修改和定制的多视图几何算法的接口。

关于可重现的研究方面，开源替代方案很有趣，因为它们提供了某些算法的透明实现，任何人都可以测试，使用，检查和修改。虽然以正确的方式实现算法不容易，但是一些软件准则规则可以帮助为相应的算法或书面实现提供透明性和公平性。

有趣的是，Bundler（引用了2000多个）和VSfM（引用了200多个）项目帮助将Structure的使用从Motion传播到了计算机视觉社区。Bundler已根据开放源代码许可证的博士学位代码转储发布。它提供了易于使用的命令行软件，因此吸引了很多吸引力。不幸的是，自最初发行以来，它没有得到任何重大的改进，清理或更新。尽管OpenMVG最初也是在博士准备阶段开发的[2]，但它的设计初衷是提供一系列工具，受测试驱动的高质量库，定期支持和最新功能。

3 OpenMVG设计

本节概述了OpenMVG¹¹功能和设计。OpenMVG的目标是多重的，为计算机视觉社区提供：(i)轻松访问多视图几何算法的准确实现；(ii)易于理解的源代码库；(iii)一套用于构建完整应用程序的工具，例如SfM管道。OpenMVG包括用于图像加载和处理，特征检测和匹配，多视图几何求解器的功能，并为线性代数和优化框架提供了轻松访问。它提供了排列在小型库（表1）中的模块化核心功能的集合，这些功能可以独立使用，也可以在整个管道中用作构建块，以执行从图像（SfM）进行3D重建或将图像定位到现有3D重建中。

OpenMVG用标准C++11编写，并使用CMake构建系统在x86，x86 64和ARM目标上实现可移植构建。它依靠Eigen [10]库执行高性能的线性代数运算，使用Ceres-solver [9]解决大规模非线性最小化（例如束调整），以及OSI-CLP [14]作为线性规划求解器。得益于完善的文档和透明的界面，OpenMVG可以扩展或与其他软件接口，甚至可以通过几个简单的步骤使用自定义数据。

OpenMVG目标。 OpenMVG的目标是双重的：

- 教育方面：提供易于阅读和准确实施的，被社区视为“公知常识”的“经典算法”。
- 知识传播方面：通过提供易于使用的代码，库，示例和管道，将计算机视觉技术的用法传播给社区。

¹¹ <https://github.com/openMVG/openMVG/>

OpenMVG理念。为了以最佳方式完成其愿景，OpenMVG遵循信条作为准则“保持简单，保持可维护性”。OpenMVG作者认为，对于可重现的研究而言，拥有易于阅读和使用的代码比快速但由于繁琐的优化而难以编辑的代码更为重要。

除了可读性标准外，还必须证明算法的有效性。使用测试驱动开发可以实现此目标。使用单元测试的主要动机是：

- 断言算法和代码按预期工作；
- 在代码更新后执行非回归测试；
- 提供真实情况下的用法示例；
- 人们去实施新事物。

由于大量的单元测试，外部用户可以集成他们的新方法，测试它是否按预期工作，然后在更大的上下文中使用它，而无需任何新代码。

OpenMVG许可证。OpenMVG已获得MPL2许可（ Mozilla公共许可证2 ）。

尽管已经选择了最大限度地利用它的方法，即使是业界合作伙伴也可以这样做，但是以某种方式迫使其回馈现有的库文件。该许可证类似于众所周知的LGPL，但是它具有一定的范围：现有文件中的修改或错误修复必须在同一许可证下共享。但是，许可证允许以不同的条款发布更大的作品，因此可以在商业应用程序中使用OpenMVG支持的代码。如外部捐款数量所示，社区对此许可证感到满意（ 31 贡献者， 100 拉取请求 500

已处理的问题）。

4 OpenMVG功能

OpenMVG提供的算法可以执行图像加载和处理，特征检测和匹配，多视图几何求解器以及轻松访问线性代数和优化框架等任务。表1列出了不同的模块/库。

4.1通用摄影测量数据描述

OpenMVG处理管道围绕 SfM_Data 容器。它起着脊柱的作用，并在整个过程中允许工具之间的顺畅沟通。此数据容器存储图像及其相关数据之间的关系：**抽象视图**（ 图像元数据，相机型号和姿势的ID ），**抽象相机模型** 摄影机的姿势 结构地标和图像观测ID。由于具有通用的I / O接口，该容器可以二进制形式保存（ 紧凑和快速读取/保存 ），也可以JSON / XML形式保存（ 以便轻松传输到第三方项目 ）。借助此容器，可以为不同目的构建有效的管道，例如根据图像进行3D重建。

模块名称	用法
摄影机	抽象相机模型
特征	抽象区域描述（点位置，描述符）
几何	3D转换（相似度，3D姿势）
匹配	抽象最近邻居接口
多视图	多视图几何求解器
稳健估计_	稳健的估算框架
stl	C ++ STL扩展
轨道	无序特征跟踪
exif	Exif数据解析
大地测量学	大地测量转换
图形	图分析工具
线性规划	抽象线性编程接口
匹配图片集 _ _	匹配图像集合的抽象界面
数字	线性代数工具
sfm	重建管道（SfM和本地化）
系统	标杆工具

表1：OpenMVG模块集

4.2图像处理

OpenMVG提供了一个简单的图像处理模块。通用图像类充当基于本征矩阵结构的2D模板像素容器。它允许所有本征优化可用于执行有效的图像处理操作。在此类的基础上，用户可以访问：

- 图片I/O（png，jpeg，tiff）；
- 图像采样（最近，线性，三次，样条）和变形；
- 基本图形（线，圆，椭圆）；
- 色彩空间转换；
- 图像滤波（梯度计算，线性卷积，非线性扩散[22]）。

4.3特征提取与描述

检测独特的，可重复的图像点和描述符是计算机视觉的基本方面。这是对象检测，图像识别和多视图立体视觉应用程序的关键步骤。OpenMVG允许通过区域集合来描述图像。由于OpenMVG中的区域概念是抽象的，因此可以将自由选择的属性嵌入到点描述中（例如，（例如点的位置，比例和方向）以及任意长度的二进制描述符。当前的实现允许检测并描述：

- 斑点区域（尺度不变点）：SIFT [11]（基于ViFeat [20]和Sift Anatomy [12]），AKAZE [22]。
- 角落区域：快速关键点[25]。
- 细微恒定区：基于树的莫尔斯区（TBMR）[23]，最大稳定末梢区（MSER）[24]。

4.4 特征和图像集合匹配

OpenMVG提供了一个抽象的最近邻居搜索框架，可以与任何向量维一起使用。具体的实现方式是：(i) BruteForce；(ii) ANN-kD树[19]；(iii) 级联哈希[21]。通过匹配一系列图像对中的特征，可以将它们用于计算最接近的3D点或找到场景的相应点。

可以通过以下方式自定义图像集合匹配：(i) 选择适当的最近邻居方法；(ii) 发送自定义对列表。通过这种定制，用户可以控制精度与检索任务的时间，或者轻松配置详尽的，滑动的窗口，循环匹配甚至是自定义匹配（即通过基于词汇树的相似性搜索选择对[33]）。

然后，使用接口来稳健地拟合多视图几何模型，将“光度”推定匹配项过滤为几何相干匹配项。

为了更好地理解和可视化图像与计算数据（特征，匹配项）之间的关系，OpenMVG导出了一些SVG数据，如图1所示。由于其矢量性质，使用SVG格式可以在缩放时保留细节。查看成对匹配非常有用，因为用户可以单击匹配并查看匹配功能。

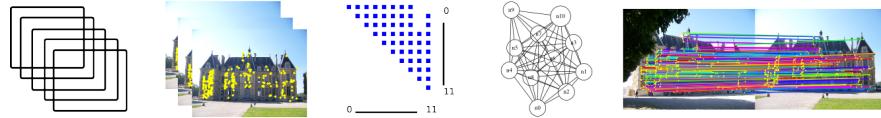


图1：在图像采集匹配任务期间（从左到右）导出的OpenMVG SVG文件：图像采集，计算特征，邻接矩阵，可见性图[36]，配对。

4.5 多视图几何

在匹配对的顶部，可以检查一些多视图几何约束。例如，可以使用它来过滤图像之间的匹配特征点集。OpenMVG提供了各种模型和求解器，如图2所示：

- 相对姿势 来自成对的图像-图像匹配点，例如单应性（用于平面场景或在纯旋转下观看的场景的变换的4点算法[6]），基本矩阵（在情况下为7/8点算法[6]）相机内部参数的无知），必要矩阵（在已知相机内部参数的情况下为5点[8]）。
- 绝对姿势 从3D-2D匹配点对通过不同的算法，P3P（从3点透视）[16]，DLT（直接线性变换）[6]（6对），ePnP [15]（ n 对）。

- 相似度转换 从3D-3D匹配空间点开始，具有7个自由度的模型。
- 三角剖分 通过线性方法[6]从两个视图投影中提取3D点，非线性 大号₂距离[7]。
- 结构与运动 与 大号₂规范[7]。

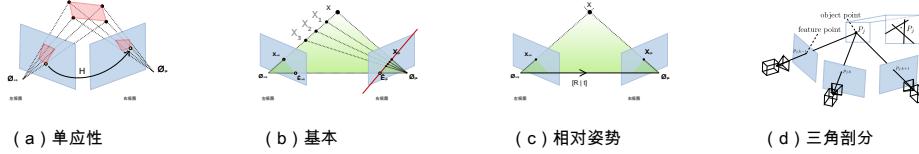


图2：多视图几何模型估计。

对于每种模型，OpenMVG提供了一种简单直接的方法来计算结果姿态。例如，估计两个对应点集之间的单应性 左 和 右 可以用几行代码执行：

```
//向左坐， 正确的池塘点和解决方案
openMVG::单应性左( 2, 4 ), xRight( 2, 4 );
/// 单应性求解器的实例
使用 H_Solver = openMVG::单应性::内核::FourPointSolver;
//按表单模型求解
标准 : : vector<openMVG::Mat3> Hs; //多 溶胶。
对于一些求解器
openMVG : : H_Solver : : 解决( xLeft, xRight, &Hs );
```

多视图几何还可以处理运动平均。它包括根据相对运动来计算全局运动，即将所有视点和方向置于一个公共坐标系中。OpenMVG使用各种指标实现旋转和平移平均算法：

- 旋转平均与 大号₂规范，非线性 大号₂和 大号₁[18]。
- 平均翻译与 大号₂规范[17]， 大号₁， 和 大号₄5]。

4.6 稳健的估计

现实世界的数据被噪声破坏，相应的点对可能包含异常。因此，必须使用 强大的 模型估计方法。OpenMVG提出了各种方法来执行鲁棒估计。一些基于用户定义的阈值，而另一些则基于数据对模型的紧密拟合与内部数据数量之间的统计平衡自动估算最佳模型。OpenMVG实现以下方法：

- 阈值先验 通过MaxConsensus和RANSAC (随机抽样共识) [26]

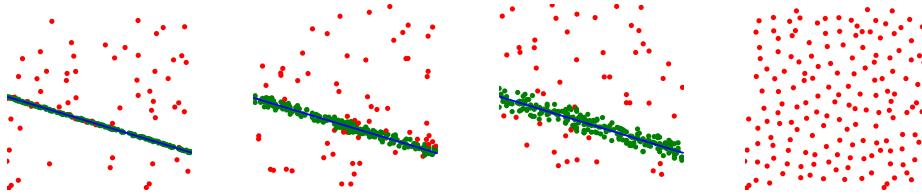


图3：相反 RANSAC 单元测试示例：用于线路估计的自动阈值适应性。右侧：在纯噪声数据中没有幻觉出检测到的模型。

- 无门槛 均方根 (LMedS) 和 反相 RANSAC [27,28]。

图3中显示了到2D点的稳健线回归的示例。稳健估计框架使用内核概念来保持通用性。内核是一个模板对象，它嵌入了模型求解器和错误度量（即模型和数据之间拟合误差的度量）。

```
/// -- Robust to contrainf不可分割的矩阵示例 --
使用 KernelType = ACKernelAdaptor <基本的：：内核：：SevenPointSolver, /// 所以

基本的：：内核：：SymmetricEpipolarDistanceError, /// 指标
UnnormalizerT, Mat3>;

// 在点数据池中建立对象
内核类型内核 ( xLeft, leftImageWidth, leftImageHeight, xRight, rightImageWidth,
rightImageHeight,
真正 ); // 配置为点
线错误模型。

// Robust 证明
Mat3 F;
const size_t max_iter = 1024;
标准：：向量<size_t> vec_inliers; openMVG::ACRANSAC ( 内核, vec_inliers, max_iter 和 &F );
```

4.7 相机型号

OpenMVG提供了一个抽象的相机接口，可以通过以下具体实现在整个库中无缝使用：纯针孔[6]，具有1至3个径向变形系数的针孔[31]，具有5个畸变系数的针孔（3个径向的

+ 2切线）（又名Brown-Conrady）[29,30]和鱼眼[32]。抽象的相机模型可以轻松计算从2D点到3D点投影到相机的方位向量，以及镜头畸变的应用或校正。

4.8 fromMotion的结构

使用以前的所有模块，在OpenMVG中实现了增量[3]和全局[5] 3D重构管道。第一种更适合交叉覆盖率低的图像，但是由于其顺序性质，它会受到漂移和可伸缩性差的困扰。第二种方法适用于图像重叠较大的数据集，并且具有良好的可扩展性。与其他现有的开放式解决方案相比，这两个管道已被证明非常准确[1,13]。该库随附了易于使用的Python脚本，以简化该工具链的使用。

捆绑调整 所有SfM流水线都依赖于通用的包调整模块，该模块允许通过最小化图像中的结构重新投影（残留误差）来执行SfM场景的非线性修正。它由高维空间中的非线性最小化组成。这个模块提供了一个细粒度的控制，在最小化过程中，哪些参数（本征（主要点，焦点，变形），非本征（旋转，平移），结构界标）将保持不变或可变。这个精细的晶粒控制界面是使用按位运算符完成的，该运算符使代码紧凑且表达能力强。通过Ceres-solver接口[9]提供了一种有效的多线程具体实现。

4.9本地化

该模块允许在现有重建中找到相机的姿态和图像集合的方向。这种问题在虚拟/增强现实设置中很常见，在这种情况下，人们希望将用户定位在已知的3D世界中，以便在正确的位置显示虚拟元素，或者当用户想要在现有的VFX地图/资产中定位视频帧时，问题（虚拟摄像头系统）。

4.10大地测量

该模块提供了使用已知3D先验条件将3D重建拟合到给定用户空间参考系统（SRS）（例如ECEF）进行地理定位的工具。可以使用地面控制点（GCP）和GPS数据（事先摆在中心位置）进行注册，以用于（i）刚性变换或（ii）束调整框架中使用的非刚性约束。在UAV/移动测绘的情况下，姿态先验也可以用于限制成对图像的数量以匹配非常大的图像集合。

5可重复的研究

该项目尝试遵循开源软件开发的最佳实践。它使用一些严格的准则，以提供高质量的代码，使社区可以参与正在进行的任何工作。

5.1 OpenMVG基础架构

为了为社区构建项目，必须最大化其可访问性，并提供用于反馈有关图书馆状态的工具。为此，OpenMVG生态系统依靠免费工具来执行在线版本控制系统，持续集成和文档编制。以下是使用不同工具及其用途的列表：

- 项目管理：<https://github.com/openMVG/openMVG>
 - Github（版本控制系统），易于访问和协作，问题跟踪，里程碑，派生，请求请求，代码审查。
- 说明文件：
 - 用于Github集成的reStructuredText（作为格式化文档而不是代码可见），在线文档生成和托管，<http://openmvg.readthedocs.io/en/latest/>。
- 持续集成：
 - Travis-CI for Unix（Linux，OsX）。
 - 适用于Windows的AppVeyor（Visual Studio）。
 - Docker用于基于容器的部署。

5.2 发展原则

更新 依靠一个简单的规则，即它们不得破坏任何现有代码。版本被推入 **主** 带有标签的分支；每次计划新版本时，都会创建一个新分支 **发展开始**。每 **新功能开发(X)** 发生在新分支中。（i）创建Github问题，并提供完成功能所需的逐步详细说明；（ii）分行 **开发X** 从创建

发展；（iii）每个提交都与Github问题相关联；（iv）一旦通过验证，**开发X** 合并到 **发展**。

Github拉取请求（外部捐款）由社区的代码审查人员处理（代码样式，检查代码是否易于使用，具有全面的代码注释和书面参考的可读性和可读性），建议使用增强的API或使用现有功能，建议进行单元测试或样本如果缺少，则建议完成文档，进行持续集成测试和不回归，由社区进行测试和验证后合并到 **发展** 科。

创建新版本 遵循以下步骤：（i）修改 **发展** 分支API内部版本号；（ii）从 **发展** 至 **主**；（iii）创建一个发布标签；（iv）使用完整的CHANGELOG编辑Github发布标签；（v）向社区宣传新版本和功能。

由于有了这套规则，社区可以遵循任何修改后的代码行OpenMVG的质量，并可以接受评论，测试和批评。人们可以通过使用fork机制来共同开发功能并做出积极贡献。

5.3 未来展望

OpenMVG开发人员希望继续改进其算法数据库，以遵循最新技术水平，扩大用户范围，提供一流的“易

读取并使用”代码，希望引诱一些面向实时的用户添加一些SLAM算法。

另一个目标可能是建立一个受模块化启发的开放格式 SfM_Data
用于3D摄影测量的OpenMVG场景描述，可在现有产品和即将推出的产品之间无缝连接项目。

除该项目外，一些OpenMVG作者还启动了一个名为“Awesome 3DReconstruction list”的新项目，该项目从图像中收集论文（教程，会议论文）和与3D重建相关的开源资源（已收集了120多个参考文献）。¹²

6社区采用

与其他现有框架的不同之处在于，OpenMVG试图与其社区进行真正的交流。一些Github统计数据给出了社区规模的概念：

项目名称	创立年份	贡献者	观察者	明星	子捆扎机	sfm			
-	2008年	8	108	530245					
彩色地图	2016年	5	14	8234					
MVE	2012年	13	61	188131					
OpenMVG	2013年	31	156	802392					
THEIASfM	2015年	15	43	16580					

尽管由于每个项目的创建年份不同而难以比较统计信息，但请注意OpenMVG具有活跃的社区（OpenMVG既不是最旧的项目也不是最新的项目）。此外，专业人员和实验室使用OpenMVG进行实际应用，例如：

弧队¹³（一家专业的公司，从事从考古到研究的不同考古领域，并专门从事文化遗产项目的开源软件和硬件的使用和开发）将OpenMVG软件用于不同后勤条件下的3D考古和建筑文档：普通挖掘，水下环境，遥感，地下环境，冰川考古研究和出国考察，见图4。

依布拉福¹⁴为法医牙科和法医人类学的司法专业知识和技术援助提供了独立的替代方案。它使用OpenMVG及其与多视图立体工具的连接来构建用于3D面部重建的头骨3D模型，并通过构建精确的假体帮助受伤的动物，见图5。

¹² https://github.com/openMVG/awesome_3DReconstruction_list

¹³ <http://www.arc-team.com/>

¹⁴ 巴西法医人类学和法律牙科团队 <http://ebrafol.org/>

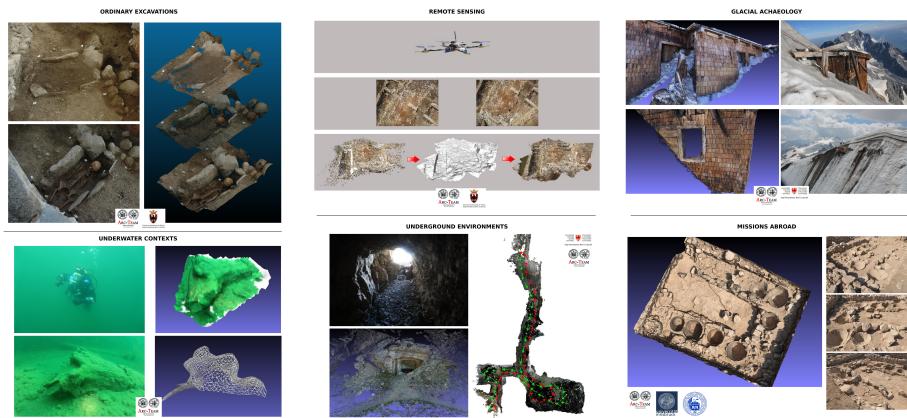


图4：考古考古团队的重建。

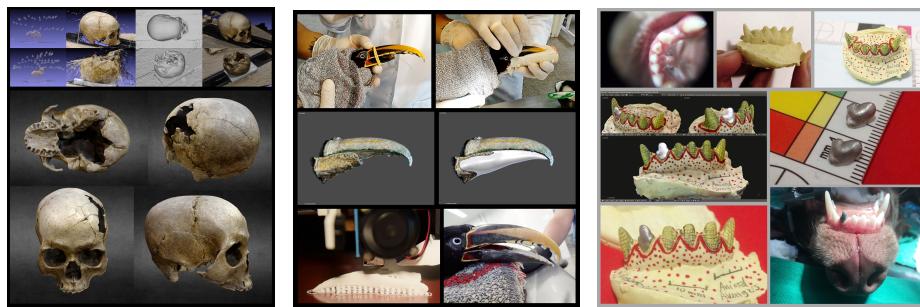


图5：使用EBRAFOL OpenMVG重建样本进行头骨重建以及精确的动物假体重建和打印。

数字人文实验室DHLAB¹⁵(一个EPFL实验室小组，负责历史和地理信息系统的研究。团队正在通过开发3D历史GIS服务器来创建基于Web的服务，从而允许查看，探索和比较SfM，LIDAR和历史手工模型。它使用OpenMVG开发可靠而强大的SfM管道，以计算稀疏密集的城市重建(利用现有的航空摄影数据库和特定的地面采集)，见图6。

社区还将OpenMVG用于非专业工作(图7)。

7结论

我们介绍了OpenMVG，这是一个用于多视图几何的通用库，旨在为社区提供参考工具。坚持代码质量和可读性

¹⁵ <http://dhlab.epfl.ch/>