

基于图像三维建模快速求解岩石破裂面面积的新方法及其应用

卜志凌, 侯哲生*, 刘媛媛

烟台大学土木工程学院, 山东 烟台

收稿日期: 2023年8月3日; 录用日期: 2023年9月5日; 发布日期: 2023年9月14日

摘要

精准确定岩石力学试样中岩石试件破坏后不规则破裂面的面积对试验结果的可靠性具有重要影响, 克服现有方法过程复杂、投入大以及耗时长弊端, 提出了一种基于图像的三维建模快速求解岩石试件破裂面面积的新方法。该方法仅需使用相机在不同空间位置获得一组同一目标的图像, 然后用实景建模软件 Reality Capture 计算图像数据得到目标表面的三维坐标信息, 生成点云数据, 完成三维模型构建, 再结合具有测量功能的软件如 Auto Cad 和 3ds Max, 即可快速完成岩石试件破裂面面积等数据的测量。精度评估试验表明, 通过该方法获得的不规则破裂面积与真实面积的平均误差仅为 1.77%, 具有令人满意的精确程度。以室内岩石劈裂试验应用为例, 显示该方法具有操作简单、高效快捷的特点, 在岩土工程试验等领域确定不规则破裂面面积方面具有值得期待的应用前景。

关键词

三维建模, 岩土体破裂面面积, Reality Capture

The New Method for Rapid Determining Rock Fracture Surface Area Based on Image 3D Modeling and Its Application

Zhiling Bu, Zhesheng Hou*, Yuanyuan Liu

School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai Shandong

Received: Aug. 3rd, 2023; accepted: Sep. 5th, 2023; published: Sep. 14th, 2023

Abstract

To accurately determine the area of irregular fracture surface of the rock specimen in rock me-

*通讯作者。

文章引用: 卜志凌, 侯哲生, 刘媛媛. 基于图像三维建模快速求解岩石破裂面面积的新方法及其应用[J]. 理论数学, 2023, 13(9): 2605-2613. DOI: 10.12677/pm.2023.139266

mechanical test has an important impact on the reliability of the test results. Overcoming the disadvantages of existing methods, such as complex process, large input and long time consuming, a new method is proposed for rapidly determining the area of the fracture surface of the rock specimen based on image 3D modeling. The method only needs to use an camera to obtain a set of images of the same target at different spatial locations, and then use the real-world modeling software Reality Capture to calculate the image data to obtain the 3D coordinate information of the target surface, generate the point cloud data, and complete the 3D model construction, and then combine with software with measurement functions such as auto cad and 3ds Max to quickly complete the area of the fracture surface of the rock specimen. The measurement of the fracture surface area of the rock specimen can be done quickly by combining with software such as Auto Cad and 3ds Max. The results of accuracy assessment test show that the average error between the irregular fracture area obtained by this method and the real area is only 1.77%, which has a satisfactory degree of accuracy. Applied to the indoor rock splitting test, the results show that the method is easy to operate, efficient and fast, and has promising applications prospect in determining the area of irregular fracture surfaces in geotechnical engineering tests and other fields.

Keywords

Three-Dimensional Modeling, The Area of Fracture Surface of Rock, Reality Capture

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

就岩石材料而言,岩石的剪切、劈裂等试验是确定岩石物理力学参数的有效途径,在这些室内试验中,破裂面面积计算的准确性直接影响到岩石强度计算的精确度。目前破裂面面积常用的确定方法是直接取试件的横截面面积[1],这是考虑到岩石试件不规则破裂面面积确定困难而做出的一定简化,而这样处理势必会造成试验所得物理力学参数结果与真实值之间存在一定的偏差[2]。

考虑到现有确定岩石试件不规则破裂面面积方法的不准确性,国内外学者就此做了大量的修正工作和改进尝试,美国材料与试验协会(American Society for Testing and Materials, ASTM)曾建立了剪切面面积随倾角变化的修正模型[3];蔡毅等(2017)提出基于节理面完整三维特征数据的剪切面面积计算方法[4][5];国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics, ISRM)建议对于不规则形状截面,可跟踪剪切面轮廓后使用平面计等类似设备测量或使用三维非接触式测量剪切面面积[6]。其中,目前运用较多的三维非接触式测量多依赖于人工三维建模[7][8][9]和基于点云数据的激光扫描仪建模[4][10][11][12][13]。

近些年,随着计算机技术的提高,基于图像的三维建模技术得到快速发展并在岩土和地下工程领域不规则表面面积测量方面有了一定的应用。Torok 等人(2013)提出了一种基于图像的裂缝三维剖面重建方法,测量了受损结构的几何特征[14]。葛丽娜等(2020)用数字摄影测量技术获取结构面信息并三维建模,实现了二维结构面信息的真三维表征[15];张宇等(2021)用单反相机采集隧道图像并进行建模,进行超欠挖检测和初期支护变形监测[16][17]。

然而,三维激光扫描技术存在设备昂贵、不便携带、采集的数据冗杂等缺点;人工处理照片获取点云数据并进行坐标系变换虽然可以得到具有绝对坐标系和尺寸的模型,但计算复杂,并且成像过程中易受外界环境影响而产生噪声和畸变,这些不便之处均限制了此类方法的应用和推广。基于此,本文提出

一种运用 Reality Capture 和 3ds Max 软件进行三维建模并快速求解岩石试件破裂面面积的新方法, 佐以褶皱坐标纸面积求解试验和室内岩石劈裂试验破裂面面积求解, 评估该方法的测量精度和适用性。

2. 数字建模及测量方法

基于图像的三维建模也称被动式三维重建, 是利用目标反射的光或发射的光, 通过摄像机成像, 然后从二维图像中逆向恢复三维模型的过程[18]。该方法主要由图像采集、图像对齐、模型建立和数据测量四部分组成, 见图 1。其中图像采集由相机实现, 图像对齐和模型建立由 Reality Capture 实现, 数据测量由 3ds Max 完成。

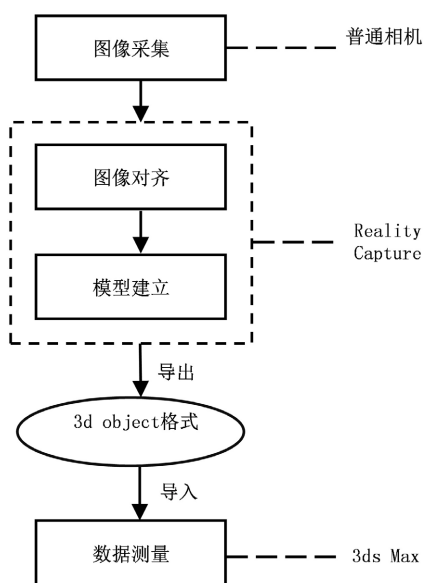


Figure 1. Operating process

图 1. 操作流程

2.1. 图像采集

图像采集质量是后期图像处理的关键, 图像采集的设备为具有拍照功能的手机或相机。影响模型效果的因素包括: 1) 照片数量; 2) 照片像素; 3) 照片拍摄角度; 4) 凹凸阴影面; 5) 光线; 6) 软件参数设置。

显然, 拍摄的照片数量越多, 像素越高, 点云就越密集, 模型也就越精细, 相邻照片拍摄角度的调整应尽量在 10° 以内, 两张照片重合的范围越大, 则找到的特征点越多, 便于下一步的图像对齐。

2.2. 图像对齐

将拍摄的照片上传至 Reality Capture 软件后即可开始图像对齐, 对齐的质量可由点云和特征点数量反映。特征点是从不同照片中获取到相同的点, 当寻找到特征点后, 图像会自动匹配。若少数图片未找到相同的特征点, 也可以人工设置控制点, 告诉程序两张照片中哪个点是相同的, 从而完成匹配, 获得反映待测物体轮廓图像的点云图。

2.3. 模型建立

获得点云图后, 可以调整坐标系, 调整建模范围, 再根据精度需求和电脑配置情况, 选择高、中、

低三种精细程度进行建模。

2.4. 数据测量

由于 Reality Capture1.0 不具备面积测量功能,将模型以 3D object 类型导出后,用软件 3ds Max 打开,可以看到模型是由大量相邻的点连结成的三角面组成,面越多,则模型越精细,同样的,对电脑配置要求也就越高。删除背景,选中待测面,即可测得不规则破裂面的面积等轮廓参数。

3. 测量精度评估试验

为评估本文提出的基于图像三维建模的快速求解岩石破裂面面积方法的精度,选取 5 张坐标纸(18.5 cm × 26.6 cm)作为试验对象,将其任意揉搓至表面褶皱程度各不相同来模拟不同岩石破裂面的凹凸起伏程度,并根据纸的褶皱程度将其编号为 Z-1 至 Z-5,采用本方法进行建模求解不规则表面面积,将求解结果与原面积对比,得到本方法的计算误差。以下以 Z-5 为例进行介绍。

3.1. 图像采集



Figure 2. Z-5 photo after rubbing
图 2. Z-5 揉搓后照片

坐标纸 Z-5 揉搓褶皱后照片如图 2 所示,由于揉搓前纸张平整,易确定其面积为 492.1 cm^2 ,则根据面积相等原理可知揉搓后的面积也为 492.1 cm^2 。将褶皱后的坐标纸靠在墙面,从纸张单面 180° 范围内用手机拍摄图片 40 张,拍摄距离约 30 cm,照片像素大小为 3024×4032 。为便于后期测量,这里在坐标纸前放置一把直尺作为标识。

3.2. 图像对齐

对齐结果显示有 1 张照片未找到控制点,需人工对这 1 张照片选取共有的点设置成控制点,生成点云图如图 3 所示。

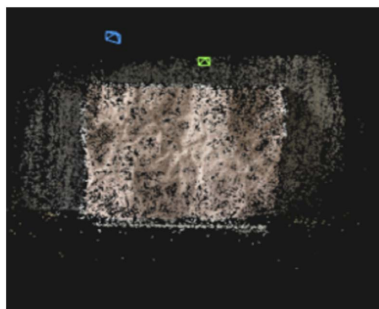


Figure 3. Z-5 point cloud map
图 3. Z-5 点云图

3.3. 模型建立

选择中等精细程度进行建模, 模型图片如图 4 所示, 属性显示该模型点云数量为 9,162,320, 面(三角形)数量为 3,054,130。

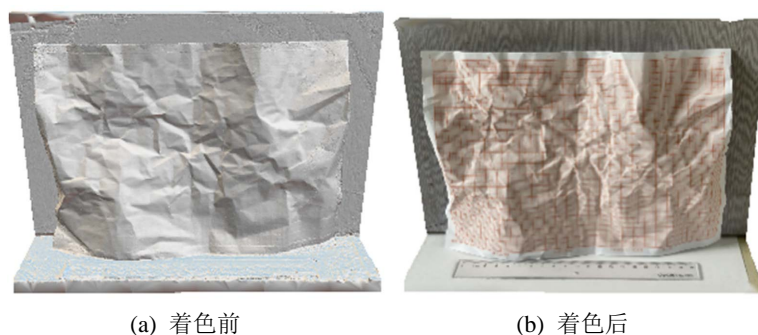


Figure 4. Z-5 model
图 4. Z-5 模型

3.4. 计算

从 Reality Capture 导出常规的三维 obj 格式, 导入 3ds max 软件中, 用切片工具将背景删除, 仅保留褶皱纸张, 如图 5 所示, 即可测量得到待测褶皱纸张的面积为 496.79 cm^2 , 与真实面积的差值为 0.95%。

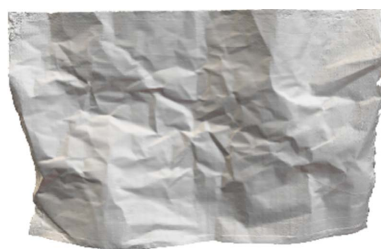


Figure 5. Folded paper
图 5. 褶皱纸张

其余 4 张坐标纸的处理方法与上类似, 最后将 5 张坐标纸的计算数据列于表 1。由计算结果可知, 本文提出的求解方法的最大误差为 3.47%, 最小误差为 0.66%, 平均误差为 1.77%, 可见用该方法获得的面积计算值与纸张真实面积基本一致。

Table 1. Results of graph paper
表 1. 坐标纸计算结果

编号	点云 数量	三角面 数量	切割后 顶点数	切割后 面数	计算面积 (cm^2)	实际面积 (cm^2)	面积差值 (cm^2)	误差 (%)
Z-1	10,645,206	3,548,402	81,395	160,628	487.08	492.1	-5.02	1.02
Z-2	11,065,086	3,688,362	131,322	260,808	495.34	492.1	3.24	0.66
Z-3	12,649,986	4,216,662	145,897	288,894	505.66	492.1	13.56	2.76
Z-4	9,705,594	3,235,198	167,922	333,691	509.18	492.1	17.08	3.47
Z-5	9,162,320	3,054,130	214,944	427,405	496.79	492.1	4.69	0.95

4. 应用案例

为验证基于图像的三维建模快速求解岩石破裂面面积方法的适用性,选取文献[19]中室内劈裂试验获取的破裂岩石试样作为应用对象,以下以该文献中 PX-2 试样为例对该方法的应用予以介绍。

4.1. 图像采集

编号为 PX-2 的劈裂试验岩样为立方体,边长为 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$,自顶面至底面中心处预钻直径为 2 cm 的圆孔,并在顶面孔口两侧沿对角线方向各加工长度为 40 mm 、深度为 5 mm 的预切槽用于引导破裂面的方向,之后试件在钻孔内部劈裂力的作用下被分离成 2 块,破裂面凹凸不平,呈典型的张拉型破坏特征,如图 6 所示。

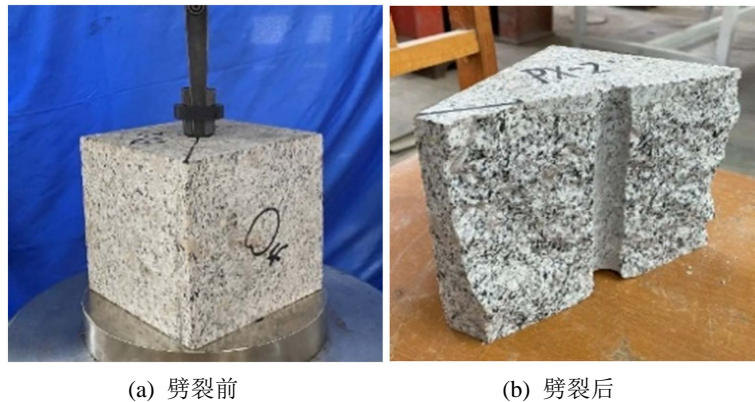


Figure 6. PX-2 rock specimen photos
图 6. PX-2 岩石试样照片

破裂试样用智能手机沿其斜向上约 45° ,距离约 30 cm ,拍摄图片 40 张(每张照片旋转约 9° ,在测量面细节较多处适当减小角度),照片像素大小为 3024×4032 。

4.2. 图像对齐

对齐结果显示 40 张照片均直接寻找到特征点,无需人工设置控制点,点云图如图 7 所示,其中环绕试样分布的是三棱锥为相机拍摄点位。拍摄角度覆盖破裂面范围越大,则获取的点越多,本次导入的照片平均每张获得 9963 个点。

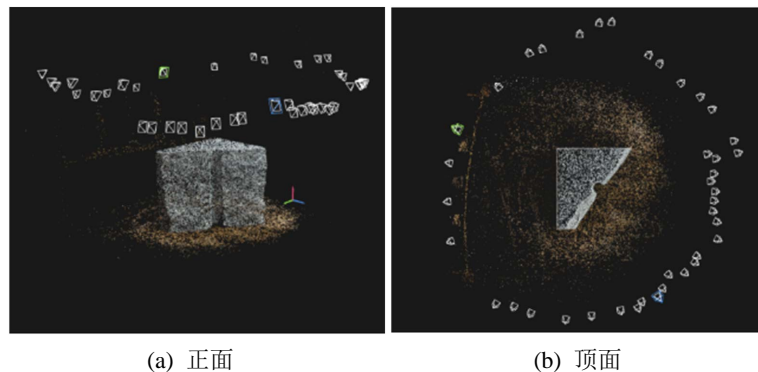


Figure 7. PX-2 rock specimen point cloud map
图 7. PX-2 岩石试样点云图

4.3. 模型建立

选择中等精细程度进行建模，由于在试验过程中立方体试样高度不变，这里可以将模型高度定义为 15 cm，模型图片如图 8 所示。

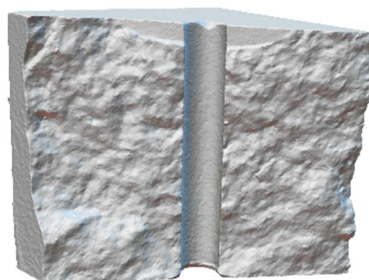


Figure 8. PX-2 model

图 8. PX-2 模型

4.4. 计算

将模型导入 3ds Max，文件属性显示该模型顶点数量为 730,687，面(三角形)数为 1,461,370，用切片工具将其余面删除，仅保留待测破裂面，如图 9 所示，可测量得到该破裂面的面积为 258.38 cm²。如果采用文献[1]当中的传统方法，此时得到的该破裂面面积约为 233.64 cm²，误差达 9.58%。

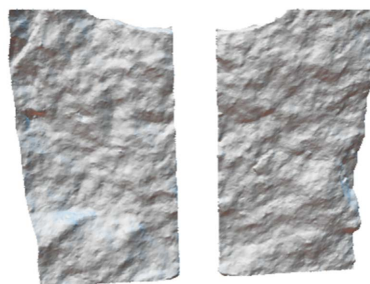


Figure 9. PX-2 fracture surface

图 9. PX-2 破裂面

采用同样的方法，对文献[19]中所有 8 个岩石试件破裂后的破裂面进行面积求解，结果列于表 2。可以看出，采用本文方法确定的岩石试件破裂面与采用文献[1]方法确定的破裂面最大误差为 14.10%，最小误差为 0.86%，平均误差为 7.31%，从而可以认为本文提出的方法能显著提高岩石不规则破裂面面积的计算精度。

Table 2. The area of fracture surface

表 2. 破裂面面积

试件 编号	破裂面面积(cm ²)		面积差 (cm ²)	误差 (%)
	本文方法	文献[1]方法		
PX-0	237.65	223.77	13.88	5.84
PX-1	275.93	268.20	7.73	2.80

Continued

PX-2	258.38	233.64	24.74	9.58
PX-3	241.31	268.25	-26.94	11.16
PZ-0	239.42	205.65	33.77	14.10
PZ-1	205.92	214.11	-8.184	4.0
PZ-2	185.95	204.85	-18.90	10.16
PZ-3	199.77	201.50	1.72	0.86

5. 结论

1) 提出了基于图像的三维建模快速求解岩石破裂面面积的新方法, 该方法由图像采集、图像对齐、模型建立和面积测量四个步骤组成, 操作简便、高效快捷。

2) 测量精度评估试验表明, 本方法求解的褶皱纸张面积与真实面积平均误差仅为 1.77%, 即可以认为由本文提出的方法确定的面积与真实面积基本一致。

3) 通过室内劈裂试验的应用表明, 本方法求解的岩石破裂面面积与传统方法确定的破裂面面积的平均误差为 7.31%, 可以显著提高岩石破裂面面积的估算精度。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50266-2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [2] 张敏江, 郭尧, 张丽萍, 邱欣. 直剪试验中对土抗剪强度的一种修正方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(2): 96-98.
- [3] ASTM (2016) Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens under Constant Normal Force: D5607-16. ASTM International, Philadelphia.
- [4] 蔡毅, 唐辉明, 葛云峰, 等. 岩体结构面三维粗糙度评价的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1101-1110.
- [5] 蔡毅. 岩体结构面粗糙度评价与峰值抗剪强度估算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(3): 648.
- [6] Muralha, J., Grasselli, G., Tatone, B., Blümel, M., Chryssanthakis, P. and Yujing, J. (2013) ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version. In: Ulusay, R., Ed., *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*. Springer, Cham, 131-142. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07713-0_10
- [7] 何满潮, 李学元, 刘斌, 徐能雄. 工程岩体三维构模中钻孔数据处理方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1821-1826.
- [8] 熊祖强, 贺怀建, 夏艳华. 工程地质三维建模及分析系统设计研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(S2): 4176-4182.
- [9] 李明超, 胡兴娥, 安娜, 刘杰. 滑坡体三维地质建模与可视化分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1355-1360.
- [10] 谢雄耀, 卢晓智, 田海洋, 等. 基于地面三维激光扫描技术的隧道全断面变形测量方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2214-2224.
- [11] 葛云峰, 夏丁, 唐辉明, 等. 基于三维激光扫描技术的岩体结构面智能识别与信息提取[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 3050-3061.
- [12] 李海波, 杨兴国, 赵伟, 黄康鑫, 周家文. 基于三维激光扫描的隧洞开挖衬砌质量检测技术及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3456-3463.
- [13] 杨荣华, 万震, 谢强, 曹志林, 杨文君. 利用 TLS 技术测定闭合节理直剪试验剪切面面积[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(1): 46-50.
- [14] Torok, M.M., Golparvar-Fard, M. and Kochersberger, K.B. (2013) Image-Based Automated 3D Crack Detection for Post-Disaster Building Assessment. *Journal of Computing in Civil Engineering*, **28**, 1-13.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000334](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000334)

- [15] 葛丽娜, 易富, 王涛. 基于数字摄影测量的结构面信息表征及应用研究[J]. 计算力学学报, 2020, 37(5): 616-622.
- [16] 阳军生, 张宇, 祝志恒, 傅金阳, 谢壮, 王立川. 基于图像三维重建的隧道超欠挖检测方法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(3): 714-723.
- [17] 张宇, 阳军生, 祝志恒, 唐志扬, 陈维, 傅金阳. 基于图像点云的多维度隧道初期支护大变形监测研究和应用[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(5): 795-802.
- [18] 黄会敏. 基于图像的三维重建及测量技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2020.
- [19] 刘媛媛. 完整硬岩劈裂机理及破岩优化研究[D]: [硕士学位论文]. 烟台: 烟台大学, 2023.
<https://doi.org/10.27437/d.cnki.gytd.2023.000131>