

双目系统的岩体结构面产状非接触测量方法

周春霖¹, 朱合华¹, 赵文²

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 提出一种改进的摄像机姿态获取方法, 并据其实现岩体结构面产状的非接触测量。主要步骤为: (1) 将摄像机安置于云台上, 令摄像机坐标系与云台坐标系重合, 然后将其固定; (2) 通过规范拍摄过程将摄像机姿态参数减少为 2 个, 然后以云台平面产状测量结果换算得到; (3) 通过摄像机姿态参数完成坐标系转换, 于岩体三维数字模型上测量并得到结构面产状。对该方法中摄像机姿态测量误差造成的目标岩体结构面产状测量传播误差进行分析, 通过对边坡和隧道开挖掌子面岩体的现场试验, 发现该方法简便易行、精度与传统测量方法接近并有较大提升空间。此方法可以方便地实现岩体结构面产状完全非接触测量, 并有效扩大测量范围、提高测量效率, 避免测量人员暴露于裸露岩体下的危险。

关键词: 岩石力学; 岩体结构面; 双目系统; 摄像机姿态; 产状; 非接触测量

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2010)01-0111-07

NON-CONTACT MEASUREMENT OF ROCK MASS DISCONTINUITY OCCURRENCE WITH BINOCULAR SYSTEM

ZHOU Chunlin¹, ZHU Hehua¹, ZHAO Wen²

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China)

Abstract: A modified pose acquiring method is advanced, which can realize non-contact measurement of rock mass discontinuities occurrence with following steps: (1) setting camera on the cloud platform, adjusting to let camera coordinate system and cloud platform coordinate system be coincidence and fixing them; (2) reducing the number of pose parameters with regular photographing procedure, and getting them from the occurrence of platform extended plane; and (3) translating 3D digital model of rock mass generated by binocular system from local coordinate system to world coordinate system and measuring the discontinuities occurrences. After the above-mentioned steps, propagation error caused by pose measuring error is analyzed. The suggested method is used to survey the rock mass discontinuities occurrences of slope and rock tunnel excavation face in field. Compared with traditional method, the proposed method is convenient to be used in field to achieve complete non-contact measurement with good precision, and the precision can be advanced easily. With this method, the measuring range of rock mass discontinuity occurrence is expanded, and the efficiency can be advanced; and the risk of survey crew exposing under rock mass can also be avoided.

Key words: rock mechanics; rock mass discontinuity; binocular system; camera pose; occurrence; non-contact measurement

1 引言

在岩土工程中, 岩体结构面产状是重要的基本

地质信息, 对其进行的量测和统计对勘察、设计、施工工作的开展具有指导意义, 传统的产状测量工具为地质罗盘仪。双目三维重构技术可以通过立体像对重构岩体三维点云模型, 并据其对结构面产状

收稿日期: 2009-06-26; 修回日期: 2009-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40672184); 教育部东北大学博士访学计划

作者简介: 周春霖(1981-), 男, 2003年毕业于大连理工大学土木水利学院港口航道及近海工程专业, 现为博士研究生, 主要从事数字照相技术在土木工程中的应用等方面的研究工作。E-mail: fy.zcl@163.com

进行测量,具有安全、高效、记录永久保存等优势^[1],可以避免地质罗盘仪因磁场干扰和传统摄影测量方法由于目标点选择不当所带来的误差^[2-3]。

近年来,该技术得到了国内外科研、技术人员的高度重视^[4~10],并已被成功应用于岩体三维重构和产状测量^[11~13]。

在完成岩体结构面三维重建后,需要将模型从摄像机坐标系(CCS)转换到世界坐标系(WCS)才行产状测量,因此必须得到2个坐标系间的转换关系,即摄像机姿态参数。常用方法有3种:(1)直接对摄像机在WCS中的姿态进行测量。其代表方法为令摄像机保持水平状态拍摄,使用罗盘确定其方位角。此方法不能调整摄像机仰俯角,有较大局限性。(2)使用全站仪和GPS等辅助手段进行确定。此方法精度较高,但实施过程较麻烦,不利于快速测定。(3)通过在重构模型中指定参考物以确定。具体实施方法较多,但都无法回避在待测岩体面上进行操作,其过程繁琐且具有一定危险性^[1]。

本文提出一种改进的摄像机姿态获取方法,据其实现了基于双目重构技术的岩体结构面产状非接触测量,对该方法中摄像机姿态测量误差造成的产状计算传播误差进行分析,并通过现场试验对其精度和实用性进行验证。

2 双目系统和产状测量

2.1 双目系统

双目系统由2个已知内参和相对位姿的摄像机组成,2个摄像机同时对目标进行拍摄以获取立体像对,通过像对中像素点的匹配计算生成视差图,进而得到各像素点的三维坐标,以三维点云实现目标重构^[14]。双目系统重构精度受左右摄像机光心距离(基线长度)限制,当拍摄物体较大或较远时,可使用单摄像机于不同位置进行拍摄,得到立体像对后通过角点匹配计算摄像机相对位姿,以弥补双目系统基线长度不足的缺陷^[15]。

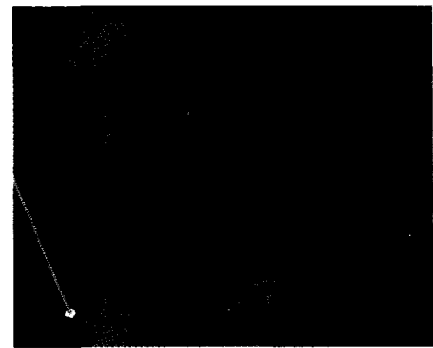
使用双目系统对目标物体进行三维重构需要根据极线校正后的立体像对进行稠密匹配生成视差图(见图1(a),(b)),结合摄像机内参和位姿参数计算匹配像素的三维坐标值,将图像灰度值赋予对应三维坐标得到岩体三维模型(见图1(c))。双目重构技术根据图像像素匹配结果生成三维点云,因此重构精度与图像解析度及成像清晰程度直接相关^[16]。



(a) 左视图



(b) 右视图



(c) 双目重构得到三维模型

图1 使用双目系统立体像以及生成的三维模型

Fig.1 3D model generated from stereo images with binocular system

2.2 岩体结构面产状测量

从三维点云模型中通过平面拟合可以得到CCS下岩体结构面法线方向^[17],将其转换到WCS下以计算其结构面产状。如图2所示, N 为岩体结构面法线向量,其起点为原点,终点WCS坐标值为 $\{OA, OB, OC\}$,结构面倾向线为 N 于 OXZ 平面上的投影线 ON' 。令 Z 方向为北,则结构面倾向 d_a 为 $\angle ZON'$,倾角 d_e 为 $\angle ONN'$,计算过程如下:

令 α 为 $\angle AN'O$, β 为 $\angle ONN'$,则有

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \arctan \frac{\overline{OA}}{\overline{OC}} \\ \beta &= \arctan \frac{\overline{ON'}}{\overline{OB}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

结构面倾向可由 α , β 表示:

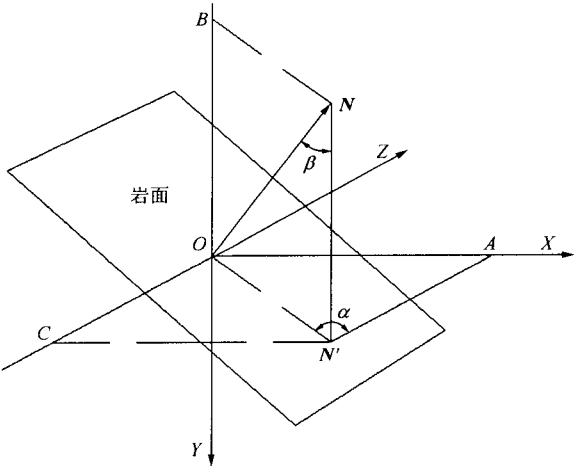


图 2 由世界坐标系下结构面法线计算产状

Fig.2 Computation occurrence with the normal direction of discontinuity in WCS

$$d_a = \begin{cases} \alpha & (\overline{OA} > 0, \overline{OC} > 0) \\ 180^\circ + \alpha & (\overline{OA} > 0, \overline{OC} < 0) \\ 180^\circ + \alpha & (\overline{OA} < 0, \overline{OC} < 0) \\ 360^\circ + \alpha & (\overline{OA} < 0, \overline{OC} > 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$d_a = \beta \quad (3)$$

3 摄像机姿态获取

固定摄像机于三维云台平面, 考虑摄像机的平动仅会造成三维重构模型平动而不会影响模型产状测量结果, 假设摄像机坐标系(CCS- $X''Y''Z''$)与云台坐标系(TCS- $X'Y'Z'$)重合或相差 $\beta=180^\circ$ (见图 3), Z' 为摄像机光轴方向。云台坐标以 3 个调节杆调节

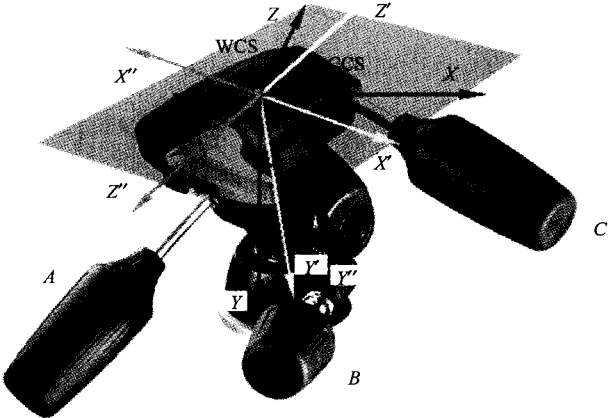


图 3 云台与世界坐标系

Fig.3 Rotational cloud platform station and WCS

姿态, 其中 A, B, C 杆分别控制云台绕 X'', Y'', Z'' 轴进行旋转。建立世界坐标系(WCS- XYZ), 其 X 轴指向东向, Z 轴指向北向, Y 轴竖直向下。考虑平动不影响岩体结构面产状识别, 可认为 3 个坐标系原点重合于点 O 。

以上关于 CCS 与 TCS 重合或相差 $\beta=180^\circ$ 的假设可以通过 2 个步骤来实现: 首先通过对摄像机与云台连接部分高度的微调来实现 Y' 与 Y'' 轴即 $X'OZ'$ 与 $X''OZ''$ 平面的重合, 然后通过摄像机在云台上的安装方向的微调来实现 X', Z' 轴与 X'', Z'' 轴重合。具体操作为:

- (1) 在较大平面(如墙面)上分别设置位于同一水平、竖直线上的若干标志点。
- (2) 调整云台高度并调平云台使水平标志点接近摄像机图幅中心, 令云台绕 Y'' 轴旋转并拍摄, 微调使拍摄所得图像中的标志点保持在同一水平扫描线上。
- (3) 令云台绕 X'' 轴旋转并拍摄, 微调使拍摄所得图像中的标志点保持在同一竖直扫描线上。
- (4) 重复步骤(2), (3)直至达到所需精度。

在调节完成后可将云台与相机固定以避免重复工作量。通过编制程序可以在拍摄时同步识别并定位标志点^[14], 方便完成调节过程。

设三维重构模型的初始坐标系使用左摄像机坐标系, 在使用左摄像机对准目标的过程中遵循以下步骤:

- (1) 将云台调至水平, 即令三坐标系 Y 轴重合。
- (2) 固定 A, C 杆, 转动 B 杆令摄像机绕 Y 轴转动调整水平角对准目标。
- (3) 固定 B, C 杆, 调节 A 杆令摄像机绕 X'' 轴转动调整俯角对准目标。
- (4) 在此过程中 C 杆始终保持固定状态, 即不发生绕 Z'' 轴的旋转, $\gamma=0$, 摄像机姿态仅由 2 个参数决定——绕 X'' 轴的旋转角度 α 和绕 Y'' 轴的旋转角度 β 。对云台引出面直接测量可以换算得到这 2 个参数, 并实现摄像机坐标系到世界坐标系的转换。测量方法有多种选择, 本文使用地质罗盘仪。

4 误差分析

摄像机姿态的测量误差会引起产状计算传播误差。根据式(2), 产状计算公式为

$$\left. \begin{aligned} d_d &= A + \arctan \frac{N_w[1]}{N_w[3]} \\ d_a &= \arctan \frac{\sqrt{N_w[1]^2 + N_w[3]^2}}{|N_w[2]|} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: A 是角度常量, 可以忽略; $N_w[i](i=1\sim3)$ 是 WCS 下的结构面单位法向量, 它由 CCS 下法向量依次绕局部坐标系 X, Y 轴旋转 α, β 角度而得到。

设 α, β 角度测量分别存在误差 $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 。令岩体表面法向量与 Y 轴的夹角为 R_y , 在 OXZ 平面(见图 2)投影与 X 轴夹角为 R_x , 取图像上岩体面主要测量范围 $R_y = -60^\circ \sim 60^\circ$, $R_x = 30^\circ \sim 150^\circ$ 。测量误差间影响为高阶小量, 可忽略, 下面对 α, β 的测量误差所造成产状测量误差进行分析。

4.1 $\Delta\beta$ 误差传播分析

对绕 Y 轴旋转角度 β 的情况有

$$N_{w\beta} = \begin{cases} X \cos \beta + Z \sin \beta \\ Y \\ -X \sin \beta + Z \cos \beta \end{cases} \quad (5)$$

式中: $N_{w\beta}$ 为绕 Y 轴旋转后单位法向量。

由此可得到下式:

$$\left. \begin{aligned} d_{d\beta} &= \arctan \left(\frac{X \cos \beta + Z \sin \beta}{X \sin \beta + Z \cos \beta} \right) \\ d_{a\beta} &= \arctan \left[\frac{\sqrt{(X \cos \beta + Z \sin \beta)^2 + (-X \sin \beta + Z \cos \beta)^2}}{|Y|} \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $d_{d\beta}, d_{a\beta}$ 分别为绕 Y 轴旋转角度 β 后的倾向、倾角。

计算 β 的传播误差为

$$\left. \begin{aligned} \Delta d_{d\beta} &= \frac{\partial d_{d\beta}}{\partial \beta} \Delta \beta = 0 \\ \Delta d_{a\beta} &= \frac{\partial d_{a\beta}}{\partial \beta} \Delta \beta = \Delta \beta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由此可见, β 角测量误差 $\Delta\beta$ 对倾向测量无影响, 对倾角测量的传播误差 $\Delta d_{a\beta} = \Delta\beta$ 。

4.2 $\Delta\alpha$ 误差传播分析

对绕 X 轴旋转 α 角的情况有

$$N_{w\alpha} = \begin{cases} X \\ Y \cos \alpha - Z \sin \alpha \\ Y \sin \alpha + Z \cos \alpha \end{cases} \quad (8)$$

式中: $N_{w\alpha}$ 为绕 X 轴旋转后单位法向量。

由此可得

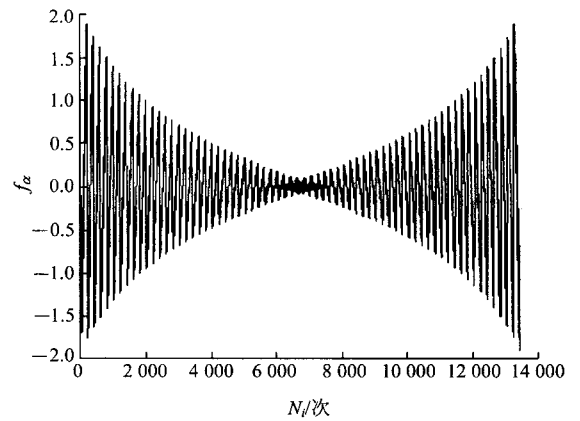
$$\left. \begin{aligned} d_{d\alpha} &= \arctan \left(\frac{X}{Y \sin \alpha + Z \cos \alpha} \right) \\ d_{a\alpha} &= \arctan \left[\frac{\sqrt{X^2 + (Y \sin \alpha + Z \cos \alpha)^2}}{Y \cos \alpha - Z \sin \alpha} \right] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $d_{d\alpha}, d_{a\alpha}$ 分别为绕 Y 轴旋转角度 α 角后的倾向、倾角。

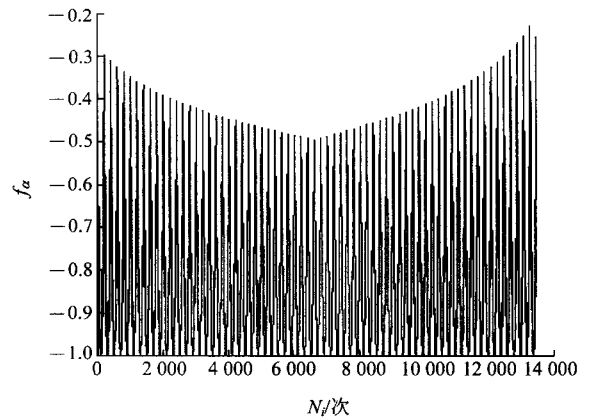
计算 α 角测量误差对倾向的传播误差, 考虑 $\{X, Y, Z\}$ 为单位向量, 有

$$\left. \begin{aligned} \Delta d_{d\alpha} &= \frac{\partial d_{d\alpha}}{\partial \alpha} \Delta \alpha = f_\alpha \Delta \alpha \\ f_\alpha &= \frac{X(-Y \cos \alpha + Z \sin \alpha)}{1 - (-Y \cos \alpha + Z \sin \alpha)^2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

在岩体面主要测量范围内对 X, Y 和 α 随机取值 N 次 ($N=14\ 000$), 计算函数 f_α 值如图 4(a) 所示。 f_α 均值为 0, 方差为 0.48, 定义域内函数值在 $[-1, 1]$ 范



(a) α 测量误差对倾向计算的传播误差



(b) α 测量误差对倾角计算的传播误差

图 4 α 测量误差对倾向、倾角计算的传播误差

Fig.4 Propagated error of dip direction and dip angle caused by the measuring error of angles

围内的比例为 96.96%, 即 α 角的测量误差 $\Delta\alpha$ 对倾向的传播误差 Δd_{aa} 有 96.96% 的概率低于 $\Delta\alpha$, 最大值为 $1.8976\Delta\alpha$ 。

同样, 可计算 α 角测量误差对倾角的传播误差, 有

$$\left. \begin{aligned} \Delta d_{aa} &= \frac{\partial d_{aa}}{\partial \alpha} \Delta \alpha = f_{\beta} \Delta \alpha \\ f_{\beta} &= \frac{1}{1+B^2} \frac{Y \sin \alpha + Z \cos \alpha}{[X^2 + (Y \sin \alpha + Z \cos \alpha)^2]^{3/2}} \\ B &= \frac{Y \cos \alpha - Z \sin \alpha}{\sqrt{X^2 + (Y \sin \alpha + Z \cos \alpha)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

以类似的变量定义域, 计算并绘制 f_{β} 函数如图 4(b) 所示。此时有 $f_{\beta} = -0.2311 \sim -1$, 其均值为 -0.8201 , 方差为 0.8358 。即 α 角测量误差 $\Delta\alpha$ 对倾角的传播误差小于 $\Delta\alpha$ 。

4.3 综合误差分析

由以上分析可知, 通常情况下由云台产状测量误差造成的掩体结构面产状计算误差为

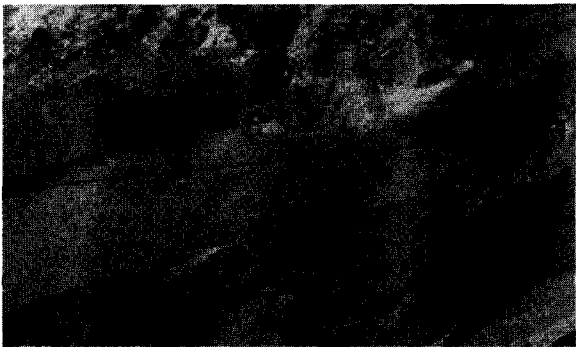
$$\left. \begin{aligned} \Delta d_a &\leq 1.8976 \Delta \alpha \\ \Delta d_a &\leq \Delta \alpha + \Delta \beta \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

在特殊情况下拍摄参数选取超过上述范围, 这时误差传播结果不稳定, 需要在得出结果的同时给出参数取值对应的传播误差值。

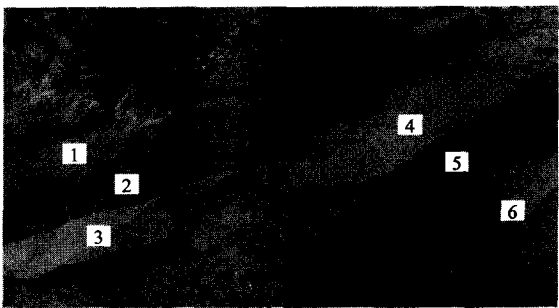
5 试验论证

5.1 边坡岩体试验

图 1 中左摄像机姿态参数为 $\alpha = -7^\circ$, $\beta = 230^\circ$ 。在三维模型中对所选择的结构面进行产状测量, 如图 5(a) 所示。由于摄像机姿态有上仰 ($\alpha < 0$), 因此倾向看起来偏高。



(a) 在三维模型上选择结构面进行产状测量



(b) 岩体主要结构面

图 5 基于双目系统的岩体结构面产状测量
Fig.5 Discontinuity occurrence measurement based on binocular system

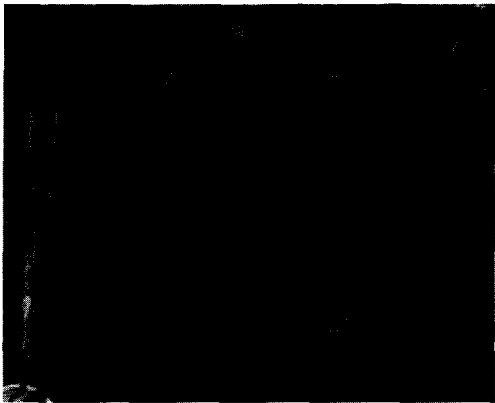
在图 5(b) 岩体面上选择 6 个明显结构面使用上述方法进行产状测量, 同时以地质罗盘仪进行测量, 产状以倾向/倾角记录, 结果比较如表 1 所示。可见 2 种方法测量结果接近, 倾向、倾角最大误差分别为 3.0° 和 3.7° 。

表 1 边坡岩体产状测量结果比较

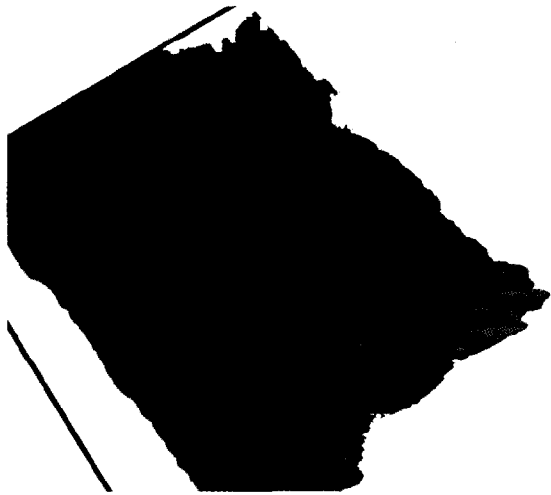
结构面编号	地质罗盘测量结果				双目重构测量结果			
	倾向 / (°)	倾角 / (°)	误差绝对值 / (°)	传播误差	倾向 / (°)	倾角 / (°)	误差绝对值 / (°)	传播误差
1	239	34	2.8	-0.02	237.2	33.8	0.2	0.04
2	209	87	0.8	0.24	208.2	83.3	3.7	0.04
3	235	34	0.8	0.15	235.8	33.0	0.7	0.05
4	230	30	2.3	0.68	232.3	28.3	1.7	0.02
5	186	63	3.0	1.21	189.0	63.9	0.9	0.03
6	228	37	0.4	1.54	227.6	36.1	0.9	0.03

5.2 隧道掌子面岩体试验

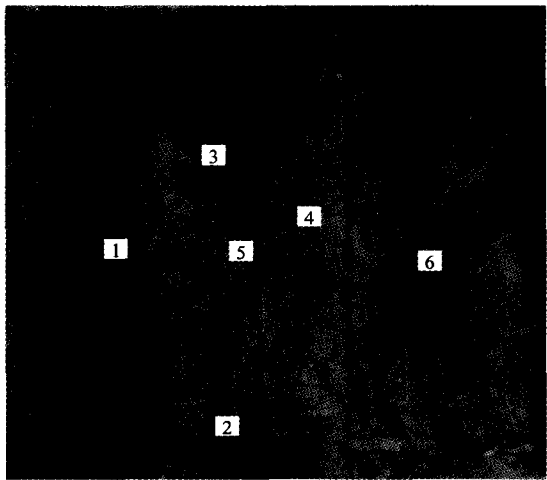
使用双目重构技术根据岩石隧道掌子面立体像对进行三维建模。图 6(a) 为福建机场二期工程金鸡山隧道掌子面立体像对左视图, 框选主要岩体部分



(a) 岩石隧道掌子面立体像对左视图



(b) 选择区域三维数字模型



(c) 4 条纵向节理(1~4)与 2 条横向节理(5, 6)

图 6 福建机场二期工程金鸡山隧道掌子面立体像
Fig.6 Stereo image pair of working face of Jinjishan tunnel in Fujian Airport project II

建模得到三维数字模型(见图 6(b)), 摄像机在世界坐标系中姿态参数为 $\alpha=0.3^\circ$, $\beta=172^\circ$ 。该岩体上有 4 条主要纵向节理和 2 条主要横向节理(见图 6(c)), 岩石隧道掌子面岩体产状测量结果比较如表 2 所示。考虑现场岩体本身的凹凸不平, 使用地质罗盘测量的位置与模型测量位置有一定的差异, 此算例精度略低于上例中边坡岩体, 而纵向节理测量精度高于横向节理, 这是由于纵向节理暴露面较大, 更易于拟合和测量。

与一些现有研究结果比较(见表 3)可见, 本文所提出方法精度至少不低于同类方法, 但这些研究主要针对大型边坡, 相比之下本文所研究的目标较小、距离较近, 这是一个提高精度的有利条件。

表 2 岩石隧道掌子面岩体产状测量结果比较
Table 2 Comparison of rock tunnel working face occurrence measuring results

结构面编号	地质罗盘测量				双目重构测量			
	倾向 / (°)	倾角 / (°)	误差绝对值 / (°)	传播误差	倾向 / (°)	倾角 / (°)	误差绝对值 / (°)	传播误差
1	18	88	3.4	0.05	21.4	89.7	1.7	0.98
2	25	89	2.9	-0.01	22.1	87.4	1.6	1.00
3	17	86	2.5	-0.05	14.5	87.8	1.8	0.97
4	24	88	1.3	0.01	22.7	89.1	1.1	0.98
5	298	44	6.3	0.05	304.3	45.8	1.8	0.97
6	325	38	4.3	0.01	329.3	32.8	5.2	0.98

表 3 与其他 3 种方法重构产状测量结果的比较
Table 3 Measuring results reconstruction occurrences with other three kinds of methods (°)

方法	倾向		倾角	
	最大误差	误差均值	最大误差	误差均值
M. Sturzenegger 和 D. Stead ^[1]	8.90	2.82	13.72	2.62
L. K Krosley ^[6]	5.40	1.85	13.50	4.00
R. Hartley 和 A. Zisserman ^[15]	10.00	5.40	15.00	8.00
本文	6.30	2.60	5.20	1.77

6 结 论

本文使用数字照相技术实现了对岩体结构面产状的非接触测量。主要完成了以下工作:

- (1) 使用单摄像机双目重构技术实现了对边坡、隧道岩体的三维重构, 生成岩体三维数字模型。
- (2) 通过规范拍摄过程减少姿态自由度, 直接对云台引出面进行测量以获取摄像机姿态参数。
- (3) 通过相机姿态参数将岩体三维数字模型转换到世界坐标系下, 实现对岩体结构面产状的非接触测量。

该方法避免了 Adam 技术^[11]中使用全站仪的繁琐工作、GPS 方法在待测岩面上放置标志点以及 ShapeMetrix 3D^[12]中对目标岩体面进行辅助测量的过程, 并减少了对摄像机姿态自由度的限制, 彻底回避了目标岩体面上的人工操作, 真正实现了完全非接触岩体结构面产状测量, 有效地避免测量人员暴露于裸露岩体下的危险。

该方法仍存在一些有待改进的问题:

(1) 通过地质罗盘仪测量云台引出面产状并换算得到摄像机姿态的方法受到地质罗盘测量精度的限制, 致使该方法测量精度略低于地质罗盘仪直接测量结果。尽管如此, 对云台引出面产状的测量可以容易的通过安置高精度罗盘和测斜仪实现, 同时提高测量精度与自动化程度。

(2) 摄像机姿态测量误差对产状计算结果的影响与摄像机仰角成正比, 在岩体结构面过于倾斜时容易造成较大误差, 因此在拍摄过程中仍需尽量于岩体结构面正面令摄像机接近水平拍摄以减少姿态测量带来的传播误差。

参考文献(References):

- [1] STURZENEGGER M, STEAD D. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts[J]. *Engineering Geology*, 2009, 106(3/4): 163 - 182.
- [2] 李冬田. 摄影方法量测结构面产状的灭线法和灭点推导法[J]. *水利水电科技进展*, 2005, 25(1): 21 - 25.(LI Dongtian. Vanishing line method and vanishing point deduction method for photographic survey of strike-dip of structural surfaces[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2005, 25(1): 21 - 25.(in Chinese))
- [3] 王凤艳. 数字近景摄影测量快速获取岩体裂隙信息的工程应用[博士学位论文][D]. 长春: 吉林大学, 2006.(WANG Fengyan. Engineering application of rapid acquiring rock mass fractures information with digital close range photogrammetry[Ph. D. Thesis][D]. Changchun: Jiling University, 2006.(in Chinese))
- [4] GESSNER K, DECKERT H, DREWS M. 3D visualization and analysis of fractured rock using digital photogrammetry[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2009, 101(1): 38.
- [5] BALTSAVIAS E P. A comparison between photogrammetry and laser scanning[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54(2/3): 83 - 94.
- [6] KROSLEY L K, SHAFFNER P T, OERTER E, et al. Digital ground-based photogrammetry for measuring discontinuity orientations in steep rock exposures[M]. Golden, Colorado: [s.n.], 2006.
- [7] 范留明, 王中锋, 李 宁. 基于近景摄影测量法计算掘进隧洞中切穿顶拱的裂隙面产状[J]. *地球科学与环境学报*, 2008, 30(3): 283 - 285.(FAN Liuming, WANG Zhongfeng, LI Ning. Attitude determination of joint running through vault based on close-range photogrammetry in excavating tunnel[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2008, 30(3): 283 - 285.(in Chinese))
- [8] 张春霖. 双目序列影像三维运动物体定位跟踪[J]. *测绘学报*, 2006, 35(4): 347 - 352.(ZHANG Chunsen. 3D motion object location tracking based on binocular sequence images[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2006, 35(4): 347 - 352.(in Chinese))
- [9] OHNISHI Y, NISHIYAMA S, YANO T, et al. A study of the application of digital photogrammetry to slope monitoring systems[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(5): 756 - 766.
- [10] 刘亚文. 利用数码相机进行房产测量与建筑物的精细三维重建[博士学位论文][D]. 武汉: 武汉大学, 2006.(LIU Yawen. Real estate measuring and 3D building fine reconstruction based on digital camera[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan University, 2006.(in Chinese))
- [11] ADAM Technology. 3DM analyst 2.1[CP/DK]. Belmont, Australia: [s.n.], 2007.
- [12] 3G Software and Measurement GmbH. JointMetriX 3D[CP/DK]. Graz, Austria: [s.n.], 2006.
- [13] 夏才初, 王 伟, 丁增志. TJXW - 3D 型便携式岩石三维表面形貌仪的研制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(7): 1 505 - 1 512.(XIA Caichu, WANG Wei, DING Zengzhi. Development of three-dimensional TJXW - 3D-typed portable rock surface topography[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(7): 1 505 - 1 512.(in Chinese))
- [14] MVTec Software GmbH. HALCON 9.0[CP/DK]. Munich, Germany: [s.n.], 2008.
- [15] HARTLEY R, ZISSERMAN A. Multiple view geometry in computer vision[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [16] STEGER C, ULRICH M, WIEDEMANN C. Machine vision algorithms and applications[M]. Weinheim: Springer-Verlag, 2007.
- [17] 官云兰, 程效军, 施贵刚. 一种稳健的点云数据平面拟合方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(7): 981 - 984.(GUAN Yunlan, CHEN Xiaojun, SHI Guigang. A robust method for fitting a plane to point clouds[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2008, 36(7): 981 - 984.(in Chinese))