

基于近景摄影测量的多模型盾构管片检测方法^{*}

何春辉¹, 肖东升^{1,2}, 戴小军¹

(1. 西南石油大学 土木工程与测绘学院, 成都 610500;
2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要:针对传统管片检测方法费时费力、检测结果可识别程度低、以圆为基础模型的检测方法存在较大误差等问题,提出了一种基于近景摄影测量的自动化管片检测方法。在盾构管片上设置标志点,通过近景摄影测量获取标志点空间坐标,以此为依据同时使用圆和椭圆两种基础模型拟合管片,求解管片特征值,对管片拼装质量和管片姿态进行检测。实验结果表明,两种模型对管片中心点检测结果误差都在2.7 cm以内,均满足管片检测精度要求,结合自定义用户界面,该方法能够高效便捷地完成管片检测;通过比较两种模型的检测结果,椭圆模型检测精度高0.5 cm左右,以椭圆为基础模型可以提高盾构管片检测精确度。

关键词:近景摄影测量;椭圆模型;管片检测;拟合精度比较

中图分类号:U25

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2021)03-0840-08

A Method of Shield Segment Detection Based on Close Range Photogrammetry

He Chunhui¹, Xiao Dongsheng^{1,2}, Dai Xiaojun¹

(1. School of Civil Engineering and Surveying, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P. R. China;
2. State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, P. R. China)

Abstract: Traditional segment testing methods has several problems. It is a waste of time and energy. The test result is of low degree of recognition, and the method based on circle as basic module has relatively large error. In order to solve the above problems with the high precision, this paper proposes a new automatic testing method for segment testing based on close-range photogrammetry. The method tries to obtain the space coordinates of marks on the segments by close-range photogrammetry. Then it builds different modules for shield segments testing and compares their calculation accuracy. After writing the program to achieve data autonomous solver calling, test results and images will be displayed on the user interface in real time. Through experiments, basic module based on oval can improve the result accuracy of shield segments testing by about 0.5 cm. This method can get the segment testing results effectively and conveniently, which meets the precision requirement.

Keywords: close range photogrammetry; ellipse model; segment detection; comparison of fitting accuracy

0 引言

在大规模隧道工程建设中,盾构法具有掘进速度快、劳动强度低、对外影响小等优势,逐渐成为隧

道施工重要方法之一^[1]。传统的盾构管片检测采用水平标尺观测法,通过测量水准尺长度和隧道设计半径解算隧道中心位置,操作繁琐,精确度低,有较大的局限性^[2],且检测结果难以及时反馈给施

^{*} 收稿日期:2020-11-02(修改稿)

作者简介:何春辉(1993—),男,四川泸州人,硕士生,主要从事近景摄影测量及隧道安全研究。

E-mail:201722000502@stu.swpu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(51774250,41804077,41801399,41801297);四川省科技创新(苗子工程)培育项目(2019109);四川省科技计划项目(2019JDR0112);工程结构安全评估与防灾技术四川省青年科技创新研究团队(2019JDTD0017);西南石油大学测绘遥感地信青年科技创新团队(2019CXTD07)

工人员,存在较大的滞后性,不能够满足现代化隧道施工的需求。传统的管片检测方法为了便于计算,常以圆为盾构管片横截面基础模型,实际盾构管片环受外部压力荷载作用难以保持标准的圆形,导致计算结果存在偏差。对管片进行高效准确的检测,实时转化为能够直接识别使用的图像和数据,对加快施工速度和保证隧道安全有一定的实际意义。

近景摄影测量技术采集数据具有非接触性的优势,能够在恶劣条件下作业,数据获取效率高^[3],已被广泛应用于建筑物沉降检测、铁路运营状况检测、桥梁变形监测等多个领域,同时获取多个观测点的瞬间变形信息,成果精度可以达到3/1 000,是测量领域重要的发展方向,具有较好的实用效果^[4-6]。目前通过近景摄影测量技术采集人工标志点,三维坐标误差可以控制到1 mm以内,能够满足盾构管片检测的需求^[7-8]。

盾构管片在衬砌施工完成之后,由于受到上覆土水压力的作用,管片环横截面常会发生椭圆化变形^[9-10]。本文提出一种基于近景摄影测量的管片检测方法,结合现有的图像处理软件,利用MATLAB编写程序完成数据调用和处理,在短时间完成管片检测。文中同时使用圆模型和椭圆模型对盾构管片横截面进行拟合,比较计算结果,得出具有更高计算精确度的模型,提高检测的精确性。该方法步骤如图1所示。

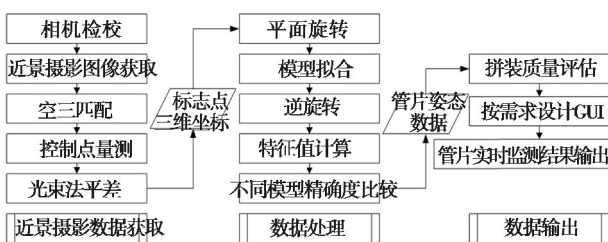


图1 盾构管片检测方法流程图

Fig. 1 Flow chart of shield segment detection method

1 模型构建原理与管片检测方法

1.1 近景摄影数据获取

近景摄影测量的核心是确定空间物体表面点与其在图像中对应点之间的关系,通过空间后方交会计算出外方位元素,再利用空间前方交会解算待求点在物方坐标系中的坐标。将非量测相机用于近景摄影图像获取,应先在固定焦距下测得相机的主距、像主点坐标、畸变参数。

区域网光束法平差是摄影测量的一种重要解

析方法,本质上是一种线性最小二乘平差法。以一束摄影光线作为平差的基本单元,共线条件方程为计算的理论基础,在全区域内统一进行平差处理,联合解算出各张像片的外方位元素和加密点的地面坐标,有效提高三维重建精度^[11]。共线方程形式为:

$$\begin{cases} x = -f \frac{a_1(X-X_0)+b_1(Y-Y_0)+c_1(Z-Z_0)}{a_3(X-X_0)+b_3(Y-Y_0)+c_3(Z-Z_0)} \\ y = -f \frac{a_2(X-X_0)+b_2(Y-Y_0)+c_2(Z-Z_0)}{a_3(X-X_0)+b_3(Y-Y_0)+c_3(Z-Z_0)} \end{cases} \quad (1)$$

求解共线方程的原则是使各观测值的改正数 V 满足 $V^T V$ 最小^[12],一个图像点坐标误差 $V = [V_u \ V_v]^T$ 可表示为:

$$V = [B \ C] \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta t \end{bmatrix} - L \quad (2)$$

式中: B 和 C 分别为相机外方位元素和控制点三维坐标的一阶偏导数矩阵; δt 和 δx 分别为控制点坐标改正数和外方位元素改正数。由于控制点坐标改正数为0,所以法方程可写为:

$$\begin{bmatrix} B^T B & B^T C \\ C^T B & C^T C \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta t \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B^T L \\ C^T L \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

通过式(3)求解出外方位元素改正数并与初值进行叠加,反复迭代计算,直到改正数达到符合要求的阈值为止。多基线摄影测量的方法能够兼顾匹配和交会,通过大重叠度的序列影像缩短摄影基线长度,减小交会角度,并创造出大量多余观测值,进一步提高空间点三维坐标标准度^[13]。

1.2 模型构建与特征值计算

空间圆形物体特征量不能直接测得,需要采集空间圆形物体上的点按一定模型拟合后求得。计算方法主要有两种:一是构建一个新坐标系,使空间点尽量处于同一坐标轴平面内,把三维空间坐标点视作二维平面中的点进行拟合并求得相关特征量,再转换回原坐标系中^[14];二是通过将空间圆形物体视为圆球和空间平面的交线,联立求解空间圆方程,两种方法拟合结果基本一致^[15]。由于涉及椭圆模型的计算,本文选择使用前一种方法求取盾构管片的特征量。

建立用于拟合的坐标系时,将空间点通过平移和旋转转换到新坐标系中,建立起两坐标系之间的转换关系。以 x 轴与空间点所在平面法向量方向一致为例,Pitch旋转和yaw旋转公式分别为:

$$\begin{cases} R_y(\varphi_y) = \begin{bmatrix} \cos\varphi_y & 0 & \sin\varphi_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi_y & 0 & \cos\varphi_y \end{bmatrix} \\ R_z(\varphi_z) = \begin{bmatrix} \cos\varphi_z & -\sin\varphi_z & 0 \\ \sin\varphi_z & \cos\varphi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

设第 m 环第 i 个标志点坐标为 (x_i^m, y_i^m, z_i^m) , 旋转后平面内各点坐标值 $(x_i^{m'}, y_i^{m'}, z_i^{m'})$, 分别以圆和椭圆为基本模型进行拟合。以椭圆为例, 二次曲线及椭圆限制条件可表示为^[16]:

$$[y \quad z \quad 1] \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = YAY^T = 0 \quad (5)$$

$$\text{s. t. } a_{12}^2 - a_{11}a_{22} < 0 \quad (6)$$

式中: A 为三阶实对称矩阵, 所以需要至少 5 个点求解出椭圆方程。设椭圆两焦点 F_1, F_2 坐标为 $(y_{j1}^m, z_{j1}^m), (y_{j2}^m, z_{j2}^m)$, 焦点坐标改正数为 $(\Delta y_{j1}^m, \Delta z_{j1}^m), (\Delta y_{j2}^m, \Delta z_{j2}^m)$, 则有每个点到焦点 F_1, F_2 距离之和为定值 S 。即:

$$S_i^m = [(y_i^m - y_{j1}^m)^2 + (z_i^m - z_{j1}^m)^2]^{1/2} + [(y_i^m - y_{j2}^m)^2 + (z_i^m - z_{j2}^m)^2]^{1/2} = S \quad (7)$$

设圆半径为 R , 由椭圆基本性质可知, 当椭圆特殊化为圆形时满足:

$$S_i^m = 2R \quad (8)$$

在取一次微小项的情况下按泰勒级数展开得:

$$S_i^{m'} = \left[\frac{\partial S}{\partial y_{j1}^m} \quad \frac{\partial S}{\partial z_{j1}^m} \quad \frac{\partial S}{\partial y_{j2}^m} \quad \frac{\partial S}{\partial z_{j2}^m} \right] \begin{bmatrix} \Delta y_{j1}^m \\ \Delta z_{j1}^m \\ \Delta y_{j2}^m \\ \Delta z_{j2}^m \end{bmatrix} + S_i^m \quad (9)$$

令 $L_i = S_i^m - S'$, A_i 为 S 有关于焦点 F_1, F_2 的一阶偏导数矩阵, ΔY 为两焦点坐标改正数集合, 可将(9)式化简为:

$$A_i \Delta Y + L_i = 0 \quad (10)$$

为了进一步提高精度, 可设置多于求解方程式必须的点, 按照最小二乘平差原理进行迭代计算, 直到各参数改正值都趋近于 0。即:

$$V_i = A_i Y + L_i \quad (11)$$

通过逆旋转和坐标平移将新建坐标系中的模型数据转换回原坐标系中, 即可得到拟合空间椭圆模型的特征量。拟合空间圆模型的方法与上述方法相同, 在平面内通过三点定圆的方法进行计算, 求取圆模型对应的特征值^[17]。

1.3 盾构管片检测

目前管片检测通常仍依靠实地观察, 手工测量, 近年来出现了借助三维激光扫描仪检测管片的方法^[18], 通过扫描仪获取管片内壁点云, 经过拼接、去噪、坐标转换、非关键点剔除等步骤, 才能用于管片检测, 数据处理步骤繁复, 人工干预性强, 不能实时得出检测结果, 且受仪器限制难以大范围推广。

对盾构管片的检测主要分为管片拼装质量检测和管片姿态检测两个方面。拼装质量检测包括管片环椭圆度和管片错台量的计算; 管片姿态检测主要包括管片环中心点偏移量、中心点水平和高程误差、隧道中心线方位角和俯仰角的偏差等。

椭圆度反映盾构管片环直径的变形量, 是衡量隧道结构稳定性的重要参数, 而隧道椭圆度的检测比较困难。修建中的隧道人员流动频繁, 盾构管片的椭圆度检测常采用吊铅锤法^[19], 操作困难, 计算精确度低。基于近景摄影测量的检测方法, 以椭圆为基本模型, 能较容易地计算出管片环的椭圆度。椭圆度 T 计算公式为^[20]:

$$T = 2(l_a - l_b) / D \quad (12)$$

式中: l_a, l_b 分别为拟合椭圆长短半径, D 为管片环设计外径。

管片错台是指管片拼装后同一环相邻块管片或者不同环管片之间存在的偏差^[21]。在计算管片错台量时, 可将同一环中不同管片交界处标记点到椭圆中心坐标距离的差值视为环内错台量。由于中心线方向不会在一环管片间发生重大改变, 可将管片环视为标准的柱体, 布设在相邻两管片环对应位置标志点到其各自管片环中心点的距离差值为该位置的环间错台量^[22]。由于管片环可能存在长轴角度偏差, 所以一对标志点的检测结果并不能代表该环管片的错台量符合要求, 应对尽可能多组标志点进行检验。设环内错台量为 d_i , 环间错台量为 e_i , 计算公式为:

$$r_i^m = [(x_i^m - x_0^m)^2 + (y_i^m - y_0^m)^2 + (z_i^m - z_0^m)^2]^{1/2} \quad (13)$$

$$d_i^m = r_i^m - r_{i+1}^m \quad (14)$$

$$e_i^m = r_i^m - r_i^{m+1} \quad (15)$$

由于标志点沿管片一侧边缘布设, 通过标志点三维坐标拟合获得的平面可视作管片环的横截面, 相邻管片环上所有标志点到该平面的距离应等于盾构管片的宽度, 此数值可用于检验相邻两环管片间是否存在较大缝隙。根据最小二乘原理 $V^T QV = \min$, 先求出与同一管片环所有标志点代数

距离平方和最小的平面,计算方法为:

$$Ax+By+Cz+D=0 \quad (16)$$

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n H = \frac{|A_i x_i + B_i y_i + C_i z_i + D_i|}{(A_i^2 + B_i^2 + C_i^2)^{1/2}} \right\} \quad (17)$$

$$X=(B^T Q B)^{-1} B^T Q L \quad (18)$$

式中: $X=[A, B, C]^T$; $L=[-D, \dots, -D]^T$; Q 为权矩阵。设管片宽度为 l , 计算相邻管片标志点到该平面距离的差值 Δl :

$$l_i^{m+1} = d_i^{m+1} - l = \frac{|A_i^m x_i^{m+1} + B_i^m y_i^{m+1} + C_i^m z_i^{m+1} + D_i^m|}{(A_i^{m2} + B_i^{m2} + C_i^{m2})^{1/2}} - l \quad (19)$$

在管片环中心点偏移量是管片姿态检测的基础,反映了管片实际位置与设计值的相符程度,是保证隧道贯通和安全性的重要检测量。将拟合所得的管片横截面中心点坐标与实际值相比较,利用空间距离公式进行求解,计算公式为:

$$t_0 = \sqrt{(x_0^m - x^m)^2 + (y_0^m - y^m)^2 + (z_0^m - z^m)^2} \quad (20)$$

在实际检测中如果中心点出现较大偏差时,为了进一步判断偏移方向,需要对中心点水平和高程偏移量进行分别解算。设 Δt 为中心点水平偏移量, Δh 为中心点高程偏移量,则有:

$$\Delta t^m = \sqrt{(x_0^m - x^m)^2 + (y_0^m - y^m)^2} \quad (21)$$

利用管片环首尾中心点坐标,结合管片环宽度,可以计算出隧道中心线方位角和俯仰角偏差 α 、 β ,更加直观的判断管片的姿态。计算公式为:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{\Delta d^m - \Delta d^{m-1}}{l} \right)$$

$$\beta = \arctan \left(\frac{\Delta h^m - \Delta h^{m-1}}{l} \right) \quad (22)$$

式中: $\alpha = 0$ 表示该环管片中轴线在水平方向上向左偏移, $\alpha > 0$ 表示向右偏移; $\beta = 0$ 表示中轴线在竖直方向上向上偏移, $\beta < 0$ 表示向下偏移。

通过拟合计算出了管片横截面所在平面,平面法向量方向应与隧道中轴线方向保持一致,也可据此计算方位角和俯仰角,计算公式为:

$$\tan \alpha = \frac{B}{A}$$

$$\tan \beta = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (23)$$

设管片环横截面法向量 $a = (x_1, y_1, z_1)$, 中轴线方向为 $b = (x_2, y_2, z_2)$, 则中轴线角度误差 w 计算公式为:

$$w = \arccos \left\{ \frac{(x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2)}{[(x_1^2 + y_1^2 + z_1^2)(x_2^2 + y_2^2 + z_2^2)]^{1/2}} \right\} \quad (24)$$

2 试验与数据收集

试验以成都地铁某号线已完成铺轨的直线段隧道为基础,试验场地位于成都市天府新区内,盾构隧道周围尚未进行深度开发,受到其他因素影响较小,结构基本稳定。试验隧道管片环设计内径为 5.7 m,拼装方式为错缝拼接,隧道内设有照明灯光,一侧设有供人通行的栈道。为保证图像采集的精确性,试验前对所使用的 Canon 3000D 相机在 18 mm 焦距下进行检校,测得内外方位元素和畸变差等数据。图像采集时基线长度固定为 0.75 m,沿隧道中心线方向,以平行摄影的方式对管片进行连续拍摄,使相邻影像的重叠度在 80% 以上。

在建立像方坐标和空间坐标转换关系时,需要在管片上布设控制点。先通过闭合导线网将隧道外平面控制点引入到隧道内,再以隧道内控制点为基础,通过空间前方交会测得管片上控制点的空间坐标。结合管片控制点在近景摄影相片上像方坐标和测得的空间坐标,建立图像点与空间点的转换关系,计算出人工标志点的三维坐标。布设人工标志点时应沿待测管片环边沿均匀布设,使标志点尽可能处于同一横切面上,便于管片检测计算。每环布置至少 8 个标志点,以保证模型拟合精度和平差的需要,标志点布设位置示意图及实验中标志点布设状况如图 2 所示。

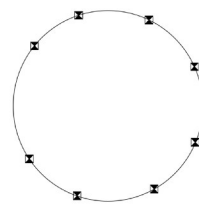


图 2 标志点布设示意图

Fig. 2 Layout of sign points

为了提高管片检测效率,可借助 lensphoto v2.0 软件解算标志点空间坐标。解算标志点的空间坐标的步骤主要包括:导入近景摄影图像;输入测定好的相机检校参数;通过选取种子点自动完成空间三角网图像匹配;引入控制点坐标并在图像上的一一选取对应、精确矫正;通过光束法平差计算并输出所需标志点的空间坐标值。试验中一环坐标值测量结果如表 1 所示。

表 1 标志点三维坐标
Table 1 Mark point of space coordinates

点号	X 轴坐标/m	Y 轴坐标/m	Z 轴坐标/m
2-1	140.908 7	1 076.656 0	1 519.568 1
2-2	141.005 7	1 077.665 3	1 519.750 4
2-3	140.289 1	1 080.110 3	1 518.725 7
2-4	139.508 8	1 080.585 6	1 517.521 0
2-5	138.722 8	1 080.268 2	1 516.271 4
2-6	138.318 9	1 079.670 4	1 515.605 1
2-7	138.029 6	1 076.985 2	1 515.022 4
2-8	138.216 7	1 076.216 8	1 515.291 3

3 管片检测与结果分析

3.1 管片检测计算与误差分析

将标志点三维坐标按不同模型进行拟合,计算用于管片检测的特征量。根据前文所述方法建立新坐标系,在平面中以椭圆为基础模型进行拟合,按最小二乘的方法对多于观测量进行平差,使拟合椭圆达到最高精度,再将拟合椭圆中心坐标值转换回原坐标系中并与实际值进行比较,求得中心坐标差值。为了验证计算精确性,以相同的标志点数据和处理方法,计算出以圆为基础模型的中心坐标差值及特征值,和椭圆模型计算结果进行比较,结果如表 2 所示。

表 2 不同模型计算结果比较
Table 2 Comparison of calculation results of different models

模型类型	中心坐标值/m			中心坐标差值/mm			拟合半径/m		椭圆度
	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ	长半轴	短半轴	
圆模型	139.484 8	1 077.741 4	1 517.349 1	3.753 2	25.601 7	6.431 9	2.850 5		—
椭圆模型	139.485 5	1 077.733 4	1 517.349 9	4.480 5	17.616 4	7.244 8	2.862 3	2.845 7	0.005 52

由表 2 可以得出,两种基础模型求得的管片中误差值在各个方向上都小于 3 cm,半径误差小于 1.5 cm,拟合结果都能满足检测要求。但在少两个多于观测量的情况下,椭圆模型计算出的管片

环各特征值都具有更小的误差,拟合结果更为精确。为了证实这一结论,对实验采集到的连续多环管片数据做同样的计算,每环管片拟合中心点误差结果如表 3 所示。

表 3 管片环中心点误差
Table 3 Center point error of segment ring
单位:mm
(unit:mm)

模型	第 1 环	第 2 环	第 3 环	第 4 环	第 5 环
椭圆模型	18.752 57	19.567 83	15.343 31	14.181 98	19.857 21
圆模型	23.620 48	26.662 74	19.184 62	18.510 34	24.224 99

以椭圆为基础模型拟合出的管片环横截面具有更小的误差。进一步对拟合中心点平面和高程误差进行单独解算,结果如图 3 所示,大部分情况下椭圆模型的计算结果都具有更高的精确度。在试验中发现,部分管片环使用两种模型计算出的结果差距不大,其原因可能是管片发生椭圆形变并不明显,且以圆为基础模型进行拟合时所需的标志点个数更少,在试验标志点个数一定的情况下拥有更多的多余观测数,通过平差降低了误差值。同时也说明在实际使用时可以通过增加标志点数量来提高管片检测精确度。

基于上述结论,结合试验中第一环管片标志点

数据,以椭圆为拟合模型,计算出管片环中心线水平角俯仰角误差折线图如图 4 所示。可以看出水平角与俯仰角的误差均不超过 5',但角度误差起伏较大。由于单环管片宽度有限,以拟合平面法向量作为该环中心线方向的检测方法容易产生较大误差,实际应用时可先以多环管片为一组进行检测,兼顾检测的准确性和高效性。

对管片拼装质量的检核,如图 5 所示。管片环内错台量即环中心点 O_1 至同一管片环相邻管片上标志点 A_1 、 B_1 的距离之差;环间错台量为向量两管片环中心 O_1 、 O_2 到各自环对应位置标志点 A_1 、 A_2 距离之差;第三环管片上标志点 C_3 到第二环拟

合平面距离 $C_3C'_3$ 与管片宽度之差为第二环与第三环管片间距。

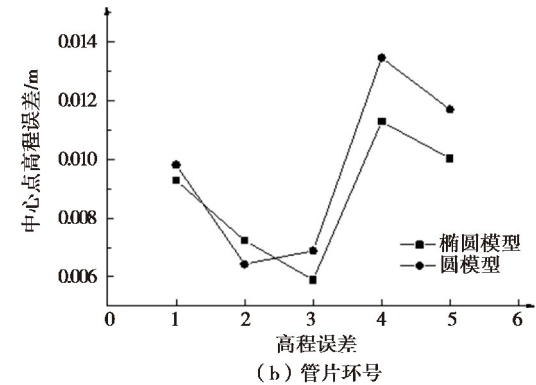
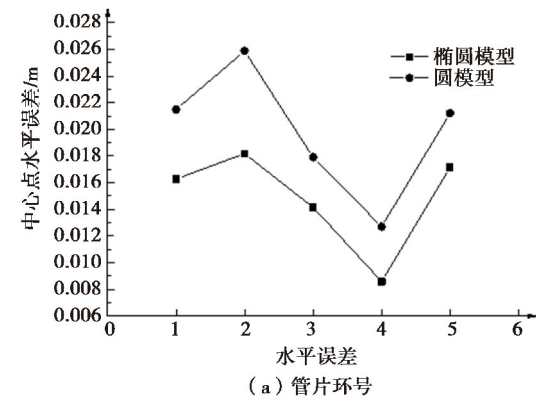


图 3 不同模型下的中心点水平和高程误差
Fig. 3 Horizontal and elevation errors of center points under different models

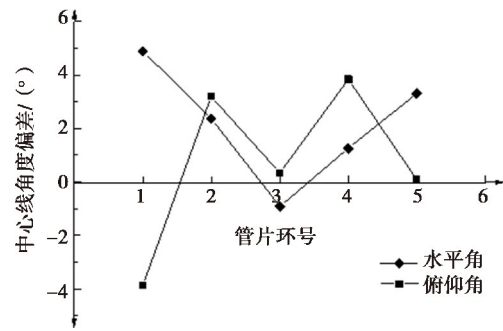


图 4 中轴线角度误差
Fig. 4 Angle error of central axis

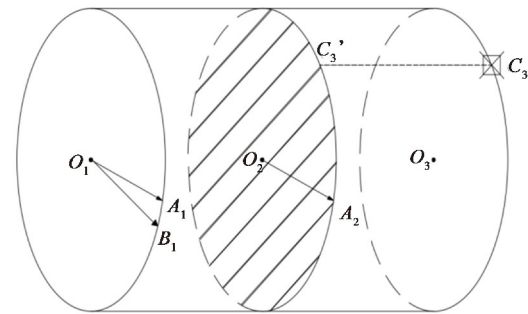


图 5 错台计算示意图
Fig. 5 Calculation diagram of staggered platform

以第二环管片为例,检测结果如表 4 所示。由盾构法隧道施工与验收规范得知,管片衬砌环内错

表 4 第 2 环管片错台量计算结果/单位:mm								
Table 4 Calculation results of staggering amount of segment in the second ring(unit:mm)								
点号	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8
环内错台量	-1.253	-6.289	12.324	7.475	7.479	4.849	-6.087	3.138
环间错台量	1.320	1.472	-11.567	-4.937	-5.963	-0.301	0.977	2.793
管间距检测	0.958	4.260	0.834	4.331	5.125	1.721	0.010	0.008

台允许偏差值为 10 mm,衬砌环间错台允许偏差值为 15 mm^[23],标志点 2-3 所在位置管片环内错台量略微超出规范要求,应及时进行人工复检,确保管片安全。

由于以椭圆为拟合模型,模型特征值包含管片环长短半轴数据,按椭圆度计算公式,计算结果展示在图 6(b)之中。根据验收规范要求,成型地铁隧道衬砌环椭圆度不得大于 6‰D,所检测管片环椭圆度符合规定要求。

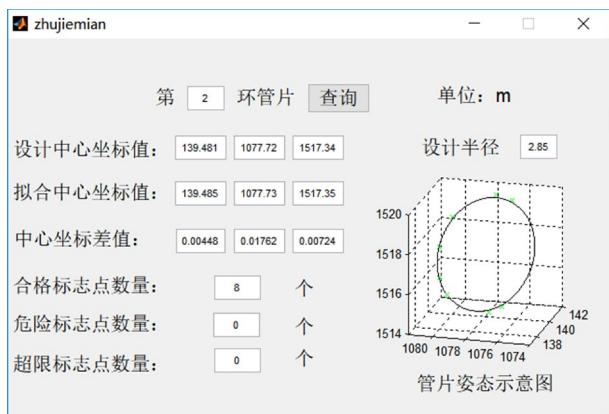
3.2 检测结果实例展示

为了加强该管片检测方法的实用性,提高检测

结果的反馈效率,更加直观地展现管片检测结果,利用 MATLAB 软件制作具有个性化的 GUI 界面,将实际工程中能反应检测结果的数据有选择性地展示。

针对本次试验设计了两个不同的 GUI 界面如图 6 所示。图 6(a)重点展示管片环与设计值之间的差值,及环内错台量的检测结果,并将管片环姿态在界面中展示出来;图 6(b)重点展示管片横截面在拟合坐标系中的数据及椭圆度等特征值。

使用时输入需查询的管片环数,自动调取被查询管片数据进行计算并显示出来,检测结果直观明



(a) GUI界面



(b) GUI界面

图 6 自定义管片检测结果查询界面

Fig. 6 User defined segment test result query interface

了,操作简便。可以根据工程需求的不同对界面样式进行调整组合,形成不同的 GUI 界面,适用范围广,灵活性强,具有更高的实用价值。

4 结论

(1) 基于近景摄影测量的管片检测方法,结合特定程序将数据收集,数据调用,数据计算,数据反馈全过程自动化,使管片检测操作简单便捷。不同模型对管片中心点坐标检测结果误差都在 2.7 cm 以内,能够满足管片检测的精度要求,具有一定的实用价值。

(2) 采用两种基本模型对管片进行对比检测,椭圆模型检测结果误差小 0.5 cm 左右,以椭圆为盾构管片横截面基本模型的管片检测方法具有更高的检测精确度。

(3) 本方法涉及的用户界面和程序参数可根据需求进行调整,适用范围广,能满足大多数盾构管片检测的需求。

参考文献 (References)

- [1] 宋成辉. 软土地层地铁盾构通用环管片结构设计研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4): 733-740. (Song Chenghui. Study on structure design for universal shield segments of metro in soft soil [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(4): 733-740. (in Chinese))
- [2] 戴水财, 杨李龙. 基于椭圆的盾构隧道管片姿态及形变检测方法研究[J]. 工程勘察, 2015(1): 76-79. (Dai Shuicai, Yang Lilong. Studying on the testing method of attitude and deformation of shield tunnel segment based on ellipse [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015(1): 76-79. (in Chinese))
- [3] 冯文灏. 近景摄影测量物体外形与运动状态的摄影法测定[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002. (Feng Wenhao. Photogrammetry for measuring the shape and motion state of objects by close range [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. (in Chinese))
- [4] 孟丽媛, 邹进贵, 刘国建. 近景摄影测量沉降标志设计与自动识别算法研究[J]. 测绘通报, 2018(1): 101-104. (Meng Liyuan, Zou Jingui, Liu Guojian. Study on the design and automatic identification algorithm of settlement survey mark used in close-range photogrammetry [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(1): 101-104. (in Chinese))
- [5] 沈鑫. 基于近景摄影测量的铁路轨道边缘自动提取与检测方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2018. (Shen Xin. Automatic extraction and inspection of railway track edge based on close range photogrammetry [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese))
- [6] 张国建, 于承新. 数字近景摄影测量在桥梁变形观测中的应用[J]. 全球定位系统, 2016, 41(1): 91-95. (Zhang Guojian, Yu Chengxin. The application of digital close-range photogrammetry in the deformation observation of bridge [J]. GNSS World of China, 2016, 41(1): 91-95. (in Chinese))
- [7] 徐洲洋, 肖东升. 近景摄影测量支持下的地铁盾构管片姿态测量方法及其应用[J]. 测绘通报, 2019(1): 75-78. (Xu Zhouyang, Xiao Dongsheng. Approach and application of subway shield attitude measurement based on close-range photogrammetry [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(1): 75-78. (in Chinese))
- [8] 张衍, 万敏, 宿文德. 盾构隧道管片加固前后接缝

- 形态的变化特征[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(3): 773-778. (Zhangyan, Wan Min, Su Wende. Configuration features of joints between reinforced shield tunnel segments [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2017, 13(3): 773-778. (in Chinese))
- [9] 韩焯, 李宁. 隧道衬砌变形引起的地层位移规律探讨[J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(4): 369-372. (Han Xuan, Li Ning. Ground movement laws caused by the tunnel lining deformation [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(4): 369-372. (in Chinese))
- [10] 陈自海, 陈建军, 杨建辉. 基于模糊层次分析法的盾构隧道施工风险分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(6): 1427-1432, 1464. (Chen Zihai, Chen Jianjun, Yang Jianhui. Risk analysis of tunnel shield machine driving in construction process based on Fuzzy AHP[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(6): 1427-1432, 1464. (in Chinese))
- [11] 何辉明, 胡伍生, 王克宇. 摄影测量光束法加密精度的分析[J]. 测绘通报, 2004(2): 13-15. (He Huiming, Hu Wusheng, Wang Keyu. Analysis of densification accuracy of bundle method in photogrammetry [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2004(2): 13-15. (in Chinese))
- [12] 薛俊鹏, 胡艳飞, 王泽萱. 影响区域网光束法平差测量精度的初值因素分析[J]. 光学技术, 2019, 45(2): 181-187. (Xue Junpeng, Hu Yanfei, Wang Yixuan. Study on the initial value factors of influencing the accuracy of regional network bundle adjustment[J]. Optical Technique. 2019, 45(2): 181-187. (in Chinese))
- [13] 张剑清, 胡安文. 多基线摄影测量前方交会方法及精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, (10): 847-851. (Zhang Jianqing, Hu Anwen. Method and precision analysis of multi-baseline photogrammetry [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(10): 847-851. (in Chinese))
- [14] 潘国荣, 谷川, 施贵刚. 空间圆形物体检测方法与数据处理[J]. 大地测量与地球动力学, 2007(3): 28-30. (Pan Guorong, Gu Chuan, Shi Guigang. Test method and data processing for 3D circular object [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007(3): 28-30. (in Chinese))
- [15] 杨丽, 楼立志. 用拟合方法检测空间圆形物体的变形[J]. 铁道勘察, 2009(4): 47-49, 61. (Yang Li, Lou Lizhi. To monitor deformation of 3D circular objects with fitting method [J]. Railway Investigation and surveying, 2009(4): 47-49, 61. (in Chinese))
- [16] 许正文, 姚连璧. 基于稳健估计的直接最小二乘椭圆拟合[J]. 大地测量与地球动力学, 2008(1): 77-80. (Xu Zhengwen, Yao Lianbi. Direct least square ellipse fitting based on robust estimation [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008(1): 77-80. (in Chinese))
- [17] Xiao D, Tan L, Su Y. Non-contact detection algorithm and realisation of displacement of suspended cylinder [J]. Survey Review, 2019, 51: 53-59
- [18] 王金峰, 徐捷, 骆汉宾. 圆形盾构管片拼装质量激光扫描自动检测研究[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(5): 109-116, 137. (Wang Jinfeng, Xu Jie, Luo Hanbin. Study on laser scanning based automated inspection for circular shield segment assembly quality [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(5): 109-116, 137 (in Chinese))
- [19] 沈剑闻. 地铁隧道椭圆度检测方法探讨[J]. 建筑监督检测与造价, 2012, 5(4): 12-14, 18. (Shen Jianwen. The methodology study on the ovality measuring of the subway tunnel [J]. Supervision Test and Cost of Construction. 2012, 5(4): 12-14, 18. (in Chinese))
- [20] 柴江楠. 地铁盾构管片拼装质量问题研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018. (Chai Jiangnan. Study on the assembly quality of metro shield segments [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2018. (in Chinese))
- [21] 冯天炜, 周佳媚, 张君, 等. 地铁隧道管片错台风险评估体系的研究和探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 1066-1072. (Feng Tianwei, Zhou Jiamei, Zhang Jun. Research on risk assessment system of segments dislocation in metro tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(4): 1066-1072. (in Chinese))
- [22] Xu J, Ding L Y, Luo H B, et al. Near real-time circular tunnel shield segment assembly quality inspection using point cloud data: a case study [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 91: 1-14.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 盾构法隧道施工与验收规范(GB50446—2017)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017. (Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for construction and acceptance of shield tunnel (GB50446-2017) [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2017. (in Chinese))