

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.08.006

门式起重机主梁挠度双目摄影测量的标定方法研究

邱湘宁, 邱法聚, 徐圣永, 仇佳捷, 丁高耀

(宁波市特种设备检验研究院, 浙江 宁波 315048)

摘要:针对现有门式起重机主梁挠度测量方法存在操作复杂、不够安全、停机检测时间长和精度不稳定等问题,文章提出一种基于双目摄影测量的主梁挠度快速、安全与精准测量方法。相机标定是双目摄影测量精度的最重要影响之一,在传统灰狼算法(grey wolf optimizer,GWO)中引入余弦函数收敛因子以提升算法的全局和局部搜索能力,并使用基于欧式距离的比例权重策略加快算法收敛速度,获得改进灰狼算法(improved grey wolf optimizer,IGWO)。将改进算法应用于双目相机的标定参数寻优中,获得最优标定值。通过仿真与现场试验进行验证,结果表明:该方法标定精确且快速,挠度检测误差在 1% 以内,满足门式起重机挠度的工程测量要求。

关键词:门式起重机;主梁挠度测量;双目摄影测量;灰狼算法(GWO)

中图分类号:TH213.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)08-1042-07

Study of calibration method for binocular photogrammetry of main girder deflection of portal crane

KUANG Xiangning, QIU Faju, XU Shengyong, QIU Jiajie, DING Gaoyao

(Ningbo Special Equipment Inspection and Research Institute, Ningbo 315048, China)

Abstract:The existing portal crane main girder deflection measurement method has many problems such as complicated operation, insufficient safety, long downtime and unstable accuracy. This paper proposes a fast, safe and accurate method for measuring the deflection of main girders based on binocular photogrammetry. Camera calibration is one of the most important influences on the accuracy of binocular photogrammetry. A cosine function convergence factor is introduced into the traditional grey wolf optimizer(GWO) to improve the global and local search capabilities of the algorithm, and a proportional weighting strategy based on Euclidean distance is used to speed up the convergence of the algorithm to obtain improved grey wolf optimizer(IGWO). The improved algorithm is applied to the calibration parameter search of the binocular camera to obtain the optimal calibration value. The simulation and field experiment results show that the proposed method is accurate and fast, and the deflection detection error is within 1%, which fully meets the engineering measurement requirements of portal crane deflection.

Key words:portal crane; main girder deflection measurement; binocular photogrammetry; grey wolf optimizer (GWO)

0 引言

主梁挠度是门式起重机设计、制造安装、使用过程中最重要的 3 个技术指标之一。主梁作为主

要承载部件,长期负载工作会导致主梁出现永久性下挠和旁弯等现象。过大的挠度不但会影响整机吊运货物时的定位精度,增大起重小车的运行阻力,而且会恶化主梁的受力状况,引发重大安全

收稿日期:2023-02-23;修回日期:2023-04-04

基金项目:国家市场监督管理总局科技计划资助项目(2020MK116)

作者简介:邱湘宁(1964—),男,浙江宁波人,宁波市特种设备检验研究院高级工程师;

邱法聚(1979—),男,山东潍坊人,宁波市特种设备检验研究院高级工程师,通信作者,E-mail:qiufaju@163.com;

丁高耀(1975—),男,浙江宁波人,宁波市特种设备检验研究院教授级高级工程师。

事故。因此,定期检测主梁的挠度是一项非常重要的检验工作,一旦检测到主梁挠度超过许用值,就要对起重机进行必要的维修。

目前检测挠度的方法主要有钢丝绳法、全站仪检测法和激光测距检测仪法等。其中钢丝绳法效率较低,需要检测人员进行高空复杂作业,存在安全隐患。全站仪检测法和激光测距检测仪法对操作人员的专业技能要求高且只能完成逐次单点测量,需要较长测量时间,不利于快速实现。除此之外,以上方法均需要起重机停机测量,影响起重机的正常工作。因此,找到一种安全、高效、精确且经济,甚至能够在起重机不停机情况下的主梁挠度检测方法十分必要。

随着计算机技术和光学技术的发展,能够实现大视场远距离测量的摄影测量技术逐渐作为非接触测量手段之一,在遥感测绘^[1]、文物数字化^[2-3]、工程测量^[4-5]等领域大显身手。挠度测量方面,文献[6]将视觉方法应用于桥梁挠度测量,但将上述方法应用于门式起重机主梁挠度测量的研究很少;文献[7]提出一种基于 Canny 算法的起重机下挠度测量方法,但该方法只能进行二维单点测量,且受限于激光在室外环境工作的不稳定性,该方法只适用于室内;文献[8]设计基于特殊光源靶标的单目摄影测量系统,能够实现单点挠度测量,但无法适用于远距离测量,且需要在主梁上提前布置特征点。

现有的基于视觉测量方法一般应用于室内,且测量距离通常较小。本文提出一种基于双目摄影测量技术的门式起重机主梁挠度测量方法,可实现主梁挠度变化测量,形成挠度曲线。经验证,该方法快速高效,可以推动摄影测量技术在起重机检测领域的发展,对保障公共安全有重要意义。

1 双目摄影测量系统构建

1.1 测量原理

在摄影测量中,一般情况下用单幅像片不能确定被测物体上点的空间坐标。计算空间坐标至少需要 2 张像片构成立体像对,利用视差信息获取被测物体表面的三维信息。双目摄影测量的数学模型和相应的坐标系如图 1 所示。

图 1 中,以空间 P 点为例,在世界坐标系中坐标为 $P(X_w, Y_w, Z_w)$,其中 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 和 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 分别表示左、右摄像机坐标系, Z 轴在相机主光轴上, X 轴、 Y 轴与像平面坐标系的 X 轴、 Y 轴平行。

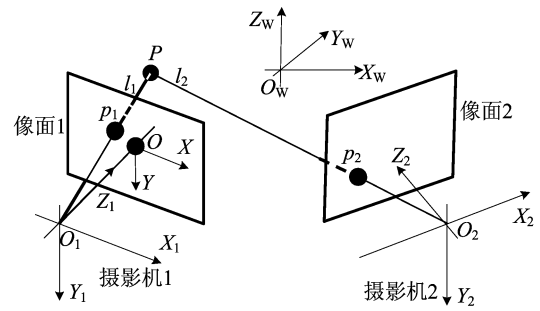


图 1 双目摄影测量模型

以左相机为例, $O-XY$ 表示像平面坐标系,空间点 P 在像平面坐标系下的坐标为 $p_1(x, y)$,由此可以构建左相机的共线方程^[9-10]:

$$\begin{cases} (x - x_0) + \Delta x = -f \times \\ \frac{a_1(X_w - X_s) + b_1(Y_w - Y_s) + c_1(Z_w - Z_s)}{a_3(X_w - X_s) + b_3(Y_w - Y_s) + c_3(Z_w - Z_s)}, \\ (y - y_0) + \Delta y = -f \times \\ \frac{a_2(X_w - X_s) + b_2(Y_w - Y_s) + c_2(Z_w - Z_s)}{a_3(X_w - X_s) + b_3(Y_w - Y_s) + c_3(Z_w - Z_s)} \end{cases} \quad (1)$$

其中: x_0, y_0 分别为像主点坐标; f 为相机焦距;上述元素被统称为内方位元素; $a_i, b_i, c_i (i=1, 2, 3)$ 由 3 个外方位元素计算获得; X_s, Y_s, Z_s 为 3 个外方位元素; $\Delta x, \Delta y$ 为相机的畸变。

基于上述共线方程,可以得到像点坐标误差方程的一般式^[10-11]:

$$V = AX_E + BX_I + CX_W + DX_{AD} - L \quad (2)$$

其中: X_E 为像片外方位元素改正项, X_I 为像片内方位元素改正项; X_A 为物方坐标误差改正项; X_{AD} 为光学畸变改正项; A, B, C 为系数矩阵,具体矩阵如下。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} a_{17} & a_{18} & a_{19} \\ a_{27} & a_{28} & a_{29} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C = \begin{bmatrix} -a_{11} & -a_{12} & -a_{13} \\ -a_{21} & -a_{22} & -a_{23} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$D = \begin{bmatrix} xr^2 & xr^4 & (3x^2 + y^2) & 2xy \\ yr^2 & yr^4 & 2xy & (3x^2 + y^2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$X_E = [\Delta X_s \quad \Delta Y_s \quad \Delta Z_s \quad \Delta \phi \quad \Delta \omega \quad \Delta \kappa]^T \quad (7)$$

$$X_I = [\Delta f \quad \Delta x_0 \quad \Delta y_0]^T \quad (8)$$

$$X_W = [\Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z]^T \quad (9)$$

$$X_{AD} = [k_1 \quad k_2 \quad q_1 \quad q_2]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{L} = [(x - (x)) \quad (y - (y))]^T \quad (11)$$

其中: k_1, k_2 为径向畸变系数; q_1, q_2 为切向畸变系数; $r = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]^{1/2}$ 。

综上, 利用最小二乘法求解式(2)即可完成对相机的内外参数标定。

假设内方位元素和物方坐标已知, 则:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{X}_E - \mathbf{L} \quad (12)$$

方程(12)即单片空间后方交会的误差方程, 用于解算相机外参。假设内外方位元素已知, 式(2)可改写成:

$$\mathbf{V} = \mathbf{C}\mathbf{X}_W - \mathbf{L} \quad (13)$$

方程(13)即多片空间前方交会的误差方程。利用多片前方交会方法, 可以实现由像片点计算空间点坐标。

1.2 系统硬件

基于摄影测量挠度测量系统组成如图 2 所示。双目摄影系统主要由 2 台相机、固定用三脚架、同步快门器和上位机构成。该系统在测量时, 根据现场环境, 调整相机位姿, 使相机的左右视场都能够拍到主梁, 拍照时利用同步快门可保证取像的同步性, 此系统可以在不停机的情况下对工作状态下的主梁下挠度进行非接触、快速的测量。

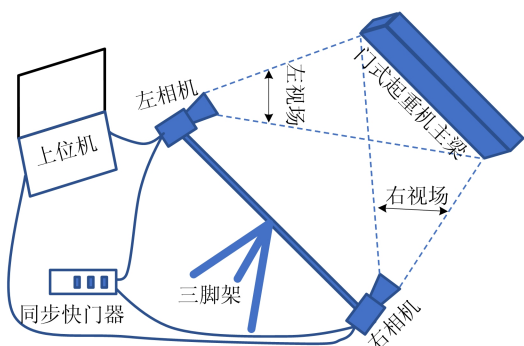


图 2 基于摄影测量挠度测量系统

2 标定方法研究

双目摄影测量系统的核心在于相机标定, 标定精度的好坏, 关系到整个系统的测量速度和精度。传统方法采用最小二乘法, 使得误差方程(2)最小。该方法解算速度慢, 且由于解算参数多, 易出现不收敛的情况。

灰狼算法 (grey wolf optimizer, GWO) 模拟了自然界灰狼的领导层级和狩猎机制, 具有收敛速度快、全局搜索能力强等优点。

相机标定即寻找最优解的过程, 故可以采用优化算法。现有的 GWO 算法用于远距离相机标

定, 存在解算精度不稳定的问题, 无法保证相机快速稳定的标定。因此本文提出了改进灰狼算法 (improved grey wolf optimizer, IGWO), 实现相机参数的快速高精度标定, 为该双目摄影测量系统提供可靠保证。

2.1 改进灰狼算法

IGWO 算法的具体过程如下:

1) 包围猎物

为建立数学模型提出如下方程, 该方程是种群 (参数组) 位置更新策略:

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{X}_p(t) - \mathbf{E} | \mathbf{F}\mathbf{X}_p(t) - \mathbf{X}(t) | \quad (14)$$

其中: t 为迭代次数; \mathbf{X}_p, \mathbf{X} 分别为猎物和灰狼的位置向量; \mathbf{E}, \mathbf{F} 为系数向量。

$$|\mathbf{E}| = 2a |r_1| - a \quad (15)$$

$$|\mathbf{F}| = 2 |r_2| \quad (16)$$

其中: a 为收敛因子, 随着迭代次数的增加, 其值从 2 逐渐减小为 0; r_1 和 r_2 为模是 $[0, 1]$ 的随机数。

文献[11]已经论证, 当 $|\mathbf{E}| \geq 1$ 时, 进行全局搜索, 搜索范围大; 当 $|\mathbf{E}| < 1$ 时, 进入局部搜索阶段, 收敛范围收窄, 且数值越小收敛效果越好。综合文献[12-14]收敛因子取值, 本文提出了基于余弦函数的收敛因子表达式为:

$$\begin{cases} a = 1 + \left| \cos \left[\frac{(t-1)\pi}{t_{\max}-1} \right] \right|^{\frac{1}{2}}, & 0 \leq t < \frac{1}{2}t_{\max}; \\ a = 1 - \left| \cos \left[\frac{(t-1)\pi}{t_{\max}-1} \right] \right|^{\frac{1}{2}}, & \frac{1}{2}t_{\max} \leq t \leq t_{\max} \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)可知, 改进收敛因子 a 在迭代初期, 其保持较大值, 此时系数向量 \mathbf{E} 也较大, 较原始收敛因子值大, 算法向外搜索的能力更强, 提升算法的全局搜索效率; 随着迭代次数增加, \mathbf{E} 呈非线性减小, 搜索范围变小, 即更加注重局部搜索的能力。因此调整后的收敛因子提升了算法的全局搜索和局部搜索能力。

2) 狩猎

定义距离猎物最近的 3 匹狼为 α, β 和 δ 。它们带领其余灰狼更新位置, 进而完成狩猎。为提高位置更新的效率, 结合文献[15-17]提出一种基于欧式距离的比例权重策略, 其数学模型描述如下:

$$\mathbf{M}_k = \mathbf{X}_j - \mathbf{E}_k (\mathbf{F}_k \mathbf{X}_j - \mathbf{X}) \quad (18)$$

$$\mathbf{W}_k = |\mathbf{M}_k| / \sum_{i=1}^3 |\mathbf{M}_i| \quad (19)$$

$$\mathbf{X}(t+1) = \sum_{i=1}^3 \mathbf{M}_i \mathbf{W}_i \quad (20)$$

其中: $k=1,2,3; j=\alpha, \beta, \delta; \mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3$ 为基于步长欧式距离的权重因子; $\mathbf{X}(t+1)$ 表示经更新位置后灰狼的位置, 3 匹头狼的位置也随之不断更新, 最终捕获猎物。

2.2 基于 IGWO 算法的标定方法

基于 IGWO 算法的相机标定方法不需要进行复杂的误差方程计算, 在确定参与计算的种群规模后, 只需要令相机内参作为优化问题的决策变量:

$$\mathbf{X} = [f_l \quad f_r \quad x_{l0} \quad y_{l0} \quad x_{r0} \quad y_{r0} \quad k_{l1} \quad k_{l2} \quad k_{r1} \quad k_{r2}] \quad (21)$$

其中: f_l, f_r 分别为根据种群大小生成的左、右相机的焦距向量; $x_{l0}, y_{l0}, x_{r0}, y_{r0}$ 分别为左、右相机的像主点向量; $k_{l1}, k_{l2}, k_{r1}, k_{r2}$ 分别为左、右相机的畸变系数向量; 上述向量的大小是根据种群大小确定。

假设有 m 对像点 (x_i, y_i) 和与之对应的物方点 (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) 作为控制点, n 对点作为验证点。参与计算的控制点应尽可能分布在图片各个位置, 这样有利于提高相机的内参标定精度和畸变矫正的精度。

当内参已知后, 利用单片后方交会式(12)完成不同内参下的相机外参的求解, 并将所求外参参数应用于多片前方交会式(14), 求解在此相机内参系数下的对应像点的物方坐标 $(X_{wi}', Y_{wi}', Z_{wi}')$, 并与已知验证点的物方坐标进行对比。计算各坐标轴的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 具体如下:

$$\begin{cases} \sigma_X = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{wi} - X_{wi}')^2 / n}, \\ \sigma_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{wi} - Y_{wi}')^2 / n}, \\ \sigma_Z = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Z_{wi} - Z_{wi}')^2 / n} \end{cases} \quad (22)$$

与之对应的距离的 RMSE 值为:

$$\sigma_P = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2} \quad (23)$$

其中, 与之对应的距离的 RMSE 值可以衡量对应相机内参下相机标定的准确性, 因此采用 σ_P 判定基于 IGWO 算法的相机标定精度。通过设定阈值, 确定相机标定结果的可靠性。其阈值应根据输入的物方坐标和像点坐标的精度决定。综上, 基于 IGWO 算法的标定方法的流程如图 3 所示。

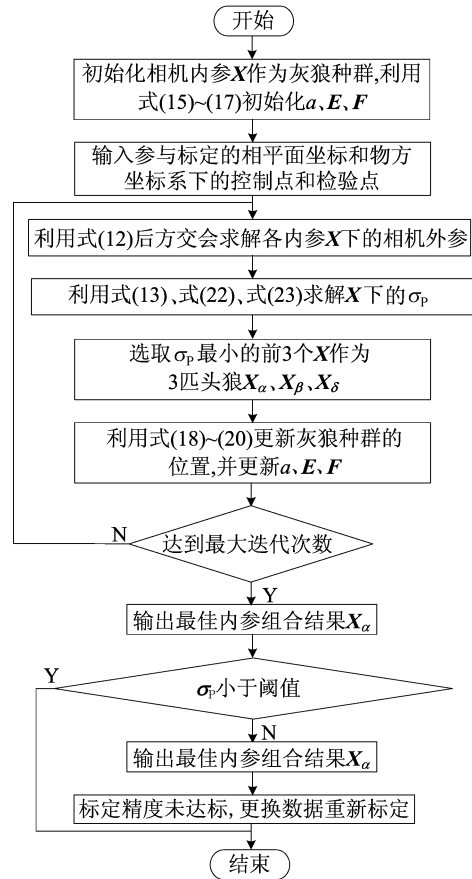


图 3 双目摄影测量系统标定流程

距离的 RMSE 值越小表示标定精度越高。在完成双目摄影测量系统标定后, 即可进行测量。空间坐标的求解采用前方交会进行完成。完成空间测量后即可拟合主梁的挠度曲线, 测量主梁的最大挠度。

3 测量试验

3.1 精度仿真试验

仿真数据未添加噪声、主点偏移和相机畸变见表 1、表 2、表 3 所列。

表 1 试验点的物方三维坐标

编号	X/mm	Y/mm	Z/mm
1	2 591.000	121.000	2 701.000
2	1 765.000	2 750.000	2 908.000
3	4 297.000	1 381.000	1 174.000
4	1 300.000	3 481.000	941.000
5	4 219.000	4 407.000	1 660.000
6	2 914.000	123.000	2 376.000
a	3 597.000	1 706.000	2 395.000
b	1 718.000	2 107.000	2 590.000
c	46.000	400.000	2 394.000
d	962.000	397.000	19.000
e	2 537.000	362.000	2 760.000

表 2 内、外方位元素

参数	H_1	H_2
f/mm	50.000	49.000
X_S/mm	90.000	328.000
Y_S/mm	147.000	1 150.000
Z_S/mm	7 134.000	5 351.000
ϕ/rad	0.188	0.345
ω/rad	0.183	0.025
κ/rad	0.175	0.021

表 3 试验点的左、右像片二维像平面坐标

编号	x_l/mm	y_l/mm	x_r/mm	y_r/mm
1	15.266	-12.380	18.340	-17.217
2	11.789	16.154	9.684	26.346
3	22.011	-3.856	21.579	0.467
4	2.948	15.357	-5.726	24.090
5	25.809	18.286	24.944	31.043
6	16.507	-12.558	18.857	-15.426
a	23.784	1.019	26.206	5.213
b	9.148	9.046	6.225	13.821
c	-11.035	-4.616	-23.552	-14.514
d	-4.589	-6.762	-11.516	-8.067
e	15.362	-9.758	18.334	-13.818

表 1 中:编号 1—6 数据用于检校称作控制

点;编号 a—e 用于验证标定精度 s 称作验证点; X 、 Y 、 Z 为物方坐标。表 2 为对应的真实内、外方位元素值。表 3 中: x_l 、 y_l 为左相机像平面坐标; x_r 、 y_r 为右相机像平面坐标。

为验证基于改进灰狼优化的双目摄影测量系统检校精度和速度,设置算法的种群规模为 30,搜索边界为 $[45, 55]$,迭代 500 次, RMSE 的阈值设为 0.001,优化算法重复运算 30 次以验证算法在计算相机参数时的稳定性。

标准差指的是经过 30 次重复计算后每次得到的结果,与其平均值的偏差结果对比见表 4 所列。用于衡量算法的稳定性。由于仿真数据未添加噪声,算法解算的内参与仿真一致,为减少篇幅,表中只列了焦距和对应的外参。

由表 1~表 4 可知,基于 IGWO 的标定方法具有更高的解算精度和更好解算稳定性,与 GWO 相比,时间上相差不大,但改进标定方法的 RMSE 更小,表明相机标定精度更高。由标准差数据可知,改进算法的标准差更小,因此本文方法稳定性更高。与传统方法相比,在保证精度的条件下算法速度更快,因此用本文方法完全替代传统方法。

表 4 标定相机结果比较

参数	传统方法		GWO		IGWO	
	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	
t/s	41.880	5.517		5.500		
f_1/mm	50.000	50.000	0.015	50.000	0	
f_2/mm	50.000	48.999	0.016	49.000	0	
σ_p/mm	2.438E-14	3.791E-04	2.805E-04	2.438E-14	9.670E-30	
H_1	90.000	90.000	0.624	90.000	1.452E-14	
	147.000	147.000	0.515	147.000	5.807E-14	
	7 134.000	7 134.000	1.340	7 134.000	0	
	0.188	0.188	6.790E-05	0.188	2.835E-17	
	0.183	0.183	4.738E-05	0.183	5.671E-17	
H_2	0.175	0.175	9.979E-06	0.175	2.835E-17	
	328.023	328.023	0.539	328.000	1.161E-13	
	1 150.017	1 150.017	0.408	1 150.000	6.968E-13	
	5 350.962	5 350.962	0.897	5 351.000	0	
	0.345	0.345	6.280E-05	0.345	1.701E-16	
	0.025	0.025	9.031E-05	0.025	1.063E-17	
	0.021	0.021	1.227E-05	0.021	3.544E-18	

3.2 现场试验

测量对象为 1 台门式起重机,具体参数见表 5 所列,现场试验环境如图 4 所示,测量位置距离起重机为 50 m。采用徕卡全站仪获取空载和载重 40 t 下图 4 中标注的特征点的空间坐标,结果如图 5 所示。

本次试验所采用的双目摄影测量系统如图 6 所示,相机型号为 Canon EOS 5DS,分辨率参数为 $8\ 688 \times 5\ 792$,像元尺寸为 $4.14\ \mu\text{m}$,相机配置 50 mm 定焦镜头。使用本文提出的标定方法进行标定,标定参数见表 6 所列。测量系统获取空载和载重状态的左右像点坐标分别见表 7、表 8 所

列。基于解算的内、外方位元素进行物方坐标解算,并通过全站仪打点的方式进行对比验证。

表 5 门式起重机部分参数

参数	数值
起重机主梁长度/m	23.47
额定起吊载荷/t	41
起重机高度/m	21.6

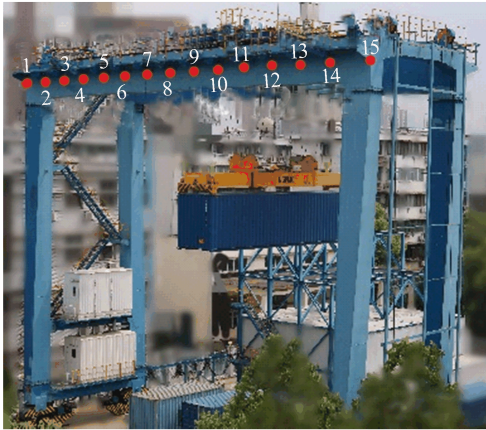


图 4 现场试验场景

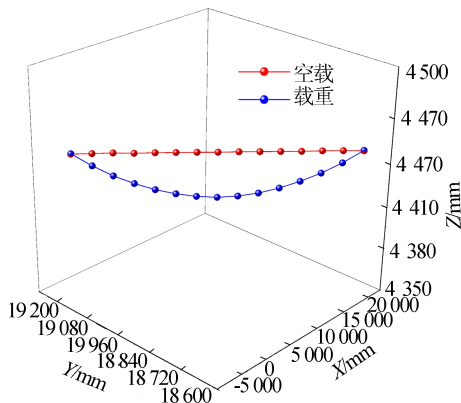


图 5 空载和载重下的主梁特征点的空间坐标



图 6 双目摄影测量系统

表 6 标定的内外参数

参数	左相机	右相机
x_0	-37.615	-6.264
y_0	8.155	35.788
k_1	-5.117E-06	7.490E-07
k_2	1.475E-10	-7.144E-09
f/mm	50.31	50.28
X_s/mm	48 224.051	49 875.875
Y_s/mm	46 864.803	44 101.010
Z_s/mm	-16 871.785	-19 953.150
ϕ/rad	4.304	4.024
ω/rad	11.856	9.046
κ/rad	4.055	-0.534

表 7 空载的左、右像片二维像素坐标

编号	x_l/mm	y_l/mm	x_r/mm	y_r/mm
1	-10.748	-7.272	-9.681	-7.681
2	-9.829	-7.329	-8.811	-7.757
3	-8.871	-7.388	-7.904	-7.836
4	-7.869	-7.450	-6.955	-7.920
5	-6.823	-7.515	-5.963	-8.006
6	-5.727	-7.583	-4.924	-8.097
7	-4.579	-7.654	-3.834	-8.193
8	-3.375	-7.729	-2.690	-8.293
9	-2.111	-7.807	-1.487	-8.398
10	-0.782	-7.890	-0.222	-8.509
11	0.617	-7.976	1.111	-8.626
12	2.091	-8.068	2.519	-8.748
13	3.648	-8.164	4.006	-8.879
14	5.293	-8.266	5.580	-9.016
15	6.875	-8.371	6.993	-9.163

表 8 载重 40 t 时的左右像片二维像素坐标

编号	x_l/mm	y_l/mm	x_r/mm	y_r/mm
1	-10.748	-7.272	-9.680	-7.681
2	-9.832	-7.323	-8.816	-7.762
3	-8.876	-7.377	-7.912	-7.845
4	-7.877	-7.435	-6.966	-7.932
5	-6.831	-7.496	-5.976	-8.022
6	-5.737	-7.562	-4.939	-8.115
7	-4.590	-7.631	-3.850	-8.211
8	-3.386	-7.704	-2.706	-8.313
9	-2.122	-7.782	-1.504	-8.418
10	-0.792	-7.866	-0.237	-8.528
11	0.607	-7.955	1.098	-8.643
12	2.084	-8.050	2.508	-8.763
13	3.642	-8.151	3.998	-8.890
14	5.290	-8.259	5.575	-9.023
15	6.864	-8.351	6.982	-9.168

全站仪的 Z 轴在铅锤方向,摄影测量系统的 Z 轴与全站仪 Z 轴平行,因此通过观测 Z 轴方向

的变化即是挠度变化方向。

本文将基于双目摄影测量系统测量挠度的方法与全站仪测量的数据进行对比分析,结果如图 7 所示。

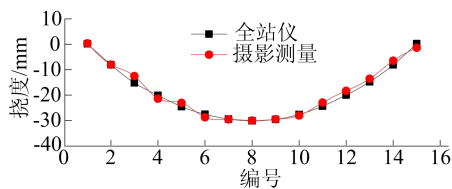


图 7 门式起重机主梁挠度曲线

由图 7 可知,本文提出的基于双目摄影测量系统测量挠度的方法与全站仪测量的数据接近,平均相对误差小于 1%。进一步验证了本文提出的相机标定方法的有效性,能够保证摄影测量系统准确测量,满足工程测量。

4 结 论

本文提出一种基于双目摄影测量的门式起重机主梁挠度测量方法。系统的相机标定采用基于改进灰狼算法的相机标定方法,提出的改进灰狼优化算法采用余弦函数收敛因子从而提升其全局和局部搜索能力,并引入基于欧式距离的比例权重策略,提高了相机标定的解算效率和稳定性。仿真试验验证了本文方法相较于传统方法在保证精度的同时标定速度更快,更有利于现场实际使用。在 50 m 测量距离下,与全站仪检测法测量的平均相对误差小于 1%。理论和试验结果表明,本文提出的方法完全满足门式起重机挠度的工程测量要求。

[参 考 文 献]

[1] ZHAO F, SONG L, PENG Z, et al. Night-time light remote sensing mapping, construction and analysis of ethnic minority

- development index[J]. Remote Sensing, 2021, 13(11): 2129.
- [2] 王炳新. 多种近景测量方法在石窟寺调查中的应用[J]. 北京测绘, 2022, 36(1): 28-33.
- [3] 牛文渊, 黄先锋, 金洁, 等. 小型文物摄影测量三维建模主体对象识别[J]. 遥感学报, 2021, 25(12): 2409-2420.
- [4] 刘全, 张宏阳, 邹志, 等. 多元感知的强夯施工质量智能监测装备系统[J]. 水力发电学报, 2021, 40(10): 135-146.
- [5] 李宁宁, 陈海洋, 冯曼, 等. 多维立体化高速摄影测量系统实时精准控制技术[J]. 应用光学, 2021, 42(6): 1062-1066.
- [6] 邵新星, 黄金珂, 员方, 等. 基于视觉的桥梁挠度测量方法与研究进展[J]. 实验力学, 2021, 36(1): 29-42.
- [7] 张柏, 苑哲源, 颜丙生, 等. 基于改进 Canny 算法的起重机下挠度测量方法研究[J]. 机电工程, 2021, 38(9): 1191-1196.
- [8] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1997.
- [9] 冯文灏. 近景摄影测粒何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.
- [10] 王冬, 冯文灏, 卢秀山, 等. 基于多片空间后方交会的 CCD 相机检校[J]. 测绘科学, 2006, 31(4): 64-66.
- [11] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.
- [12] 郭振洲, 刘然, 拱长青, 等. 基于灰狼算法的改进研究[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(12): 3603-3606.
- [13] 魏政磊, 赵辉, 李牧东, 等. 控制参数非线性调整策略的灰狼优化算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(3): 68-72.
- [14] 谈发明, 赵俊杰, 王琪. 一种改进非线性收敛方式的灰狼优化算法研究[J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(5): 89-95.
- [15] RODRIGUEZ L, CASTILLO O, SORIA J, et al. A fuzzy hierarchical operator in the grey wolf optimizer algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2017, 57: 315-328.
- [16] 徐辰华, 李成县, 王尤军, 等. 基于混沌灰狼优化算法的氧化铝质量指标预测模型[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(6): 1869-1878.
- [17] 王秋萍, 王梦娜, 王晓峰. 改进收敛因子和比例权重的灰狼优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(21): 59-64.

(责任编辑 吴 亮)