

## 基于相机组网的测量误差传递机理及抑制方法

张跃强<sup>1,2</sup>, 陈铭杰<sup>1,2</sup>, 胡彪<sup>1,2\*</sup>, 陈文均<sup>1,2</sup>, 尹义贺<sup>1,2</sup>, 于起峰<sup>1,2</sup>, 刘肖琳<sup>1,2</sup><sup>1</sup>深圳大学智能光测研究院, 广东 深圳 518000;<sup>2</sup>深圳大学物理与光电工程学院, 广东 深圳 518000

**摘要** 位移监测是结构健康监测最基础、最常规的任务之一。针对桥梁、隧道等长大线状结构形变监测,基于相机组网的位移传递测量是有效手段,但随着相机测站数量的增加,提点误差、模型简化等因素会导致相机网络的误差传递与累积,从而使得测量方程的病态程度增加,如何有效地抑制相机网络误差累积效应是该方法的关键问题之一。为此,本文对相机组网测量误差传递机理进行了系统分析,并提出一种基于误差系数的位移传递测量误差抑制方法,通过误差系数可以对网络测量误差直接进行表征。根据所构建的理论模型,优先在控制点处布置相机测站,尽可能在相机测站处增加标志点,并尽可能在相机测站间多布设标志点,以优化相机网络构型、提高测量精度,并在大跨度斜拉桥上对误差抑制方法进行了现场验证。结果表明,通过优化网络构型,相机网络的传递误差最高可被抑制 79.19%。该研究可为相机组网测量在实际工程特别是长大线状结构形变测量中的应用提供有效的累积误差抑制和网络构型优化手段。

**关键词** 相机组网; 线状结构; 形变监测; 位移传递误差; 构型优化

**中图分类号** TP391      **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS230784

## 1 引言

近年来,随着我国基础设施建设的大规模发展,桥梁、隧道、铁路等大型结构覆盖率位居世界前列,上述大规模建设给社会经济生活带来了巨大便利,但其结构安全与运营维护也给实际工程带来巨大挑战,因此,开展结构健康监测十分重要,其中位移是结构健康状态的最直接体现<sup>[1-5]</sup>。拉绳式位移传感器、液位计等接触式位移测量方法虽然具有原理简单、易于实现等优点,但在交通情况、环境因素、突发事故等潜在危险因素的影响下,这类方法所要求的稳定支撑条件往往不能满足<sup>[6-8]</sup>。水准仪、全站仪等非接触式测量方法在工程中广泛使用,但其依赖于严格稳定的测量平台,基础设施结构监测中,测量距离通常较大,平台微小的角度变化会引起较大的测量误差甚至测量失效<sup>[9-10]</sup>。

随着计算机视觉技术的进步,基于计算机视觉的位移测量方法因其非接触、远距离、高精度等特征不断发展<sup>[11-15]</sup>。例如,杜文康等<sup>[16]</sup>将智能手机作为采集数据的移动端,结合加快稳健功能(SURF)特征检测方法,在复杂环境与路况下实现了对桥梁的位移监测。韩怡天等<sup>[17]</sup>将计算机视觉与无人机相结合,利用无人机灵

活性高、视域广阔的优点,弥补了计算机视觉位移测量方法中相机分辨率低以及测量基站位置选取有限的缺点,在保持与激光位移计同等精度条件下实现了对振动结构的位移监测。虽然智能手机、无人机等新型相机载体的应用提高了视觉系统对复杂环境的适应性,但仍未能有效解决单目视觉系统沿光轴方向位移和绕光轴转角求解精度低的固有缺陷。为解决该固有缺陷,研究人员将精力集中在多相机视觉系统上<sup>[18-19]</sup>。田苗等<sup>[20]</sup>运用解耦估计法对多相机系统的相对位姿进行求解,根据特征点物距长短采取不同的算法策略,从而将相对姿态求解精度降低至 $0.05^\circ$ 。Dinc等<sup>[21]</sup>运用Mirage相机位姿估计方法,借助参考相机姿态来最小化2D投影误差,在特征点数量较少的情况下提高了位姿解算的鲁棒性。优化视觉系统算法同样是提高视觉系统精度的一个切入点<sup>[22-24]</sup>。Ge等<sup>[25]</sup>将动态称重系统与机器视觉相结合的同时引入改进的YOLO-v3卷积神经网络方法,开发出全新的交通负荷监测(TLM)技术,在满足准确性和鲁棒性要求的同时提高了算法的计算速度。然而,上述方法虽然通过硬件升级和算法改进提升了监测精度,但仍存在测量范围与空间分辨率的固有矛盾,即单一相机受现有硬件限制,测量距离或视场范围越大,图像空间分辨率越低<sup>[26-28]</sup>,这意味着

收稿日期: 2023-04-06; 修回日期: 2023-05-11; 录用日期: 2023-06-05; 网络首发日期: 2023-06-28

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1511102)、国家自然科学基金(52208399, 12002215)、中国博士后科学基金(2022T150437)

通信作者: \*bhu@szu.edu.cn

在百米甚至千米量级尺度的大型结构上,监测精度难以满足要求。针对上述问题,于起峰院士团队<sup>[29]</sup>提出的位移传递串联相机网络方法通过在待测结构搭建多相机系统的测量网络,可以对大尺度结构静态形变实现多点同步、实时动态、高精度测量,但由于误差传递机理不明确,多站组网累积误差抑制方法缺失,网络构型对测量精度的影响分析缺失,如何有效地抑制相机网络误差累积效应、提高测量精度成为该方法面临的瓶颈问题。

对此,本文在该研究团队所提出的位移传递串联相机网络方法<sup>[29]</sup>的基础上,对基于相机组网的位移传递误差累积机理与抑制方法进行了研究。首先通过理论分析论证位移传递测量求解条件,然后通过数值仿真研究相机组网的位移传递误差累积效应,分析控制点与测量点位置、数量对相机组网位移传递测量精度

的影响,在此基础上提出了基于误差系数的相机网络构型优化设计方法以抑制测量误差,最后通过现场实验验证所提出的相机组网位移传递误差抑制方法的可行性。

## 2 位移传递串联相机网络

### 2.1 基本原理

针对桥梁、道路、隧道等线状结构特征,本团队提出了位移传递串联相机网络测量模式(以下简称“相机网络”)<sup>[29]</sup>,可在观测平台不稳定的条件下实现结构全域尺度下多点形变高精度实时动态测量。该相机网络通常沿待测线状结构长度方向布设多个双头相机测站,测站间由合作标志点连接,其中双头相机测站中的两个相机固连,因此具有位移和转角一致性约束;测站间的标志点用于建立(或加强)测站间的联系。

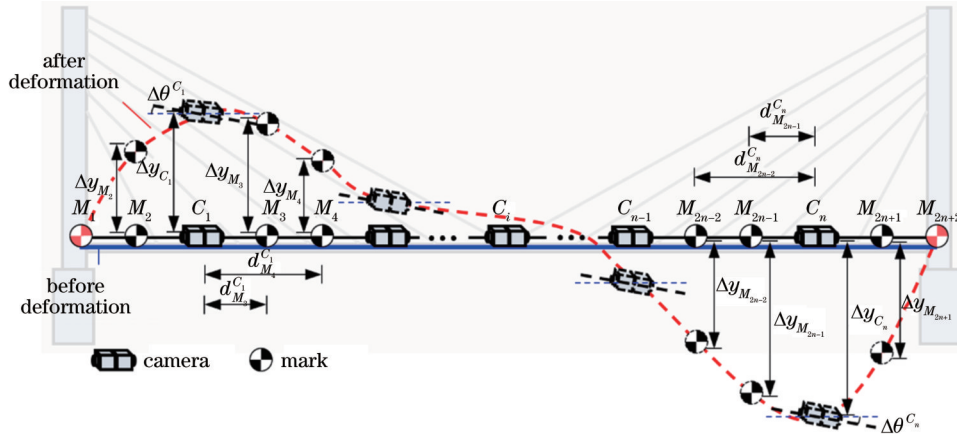


图 1 位移传递串联相机网络原理图

Fig. 1 Schematic diagram of serial camera network based on displacement transmission

如图 1 所示,在相机网络中共有  $n$  个双头相机测站,每个测站左右各有 2 个标志点,以相机测站  $C_i$  为例,标志点  $M_{2i+1}$  在  $C_i$  图像中的像素变化量  $\Delta h_{M_{2i+1}}^{C_i}$ <sup>[29]</sup> 可以表示为

$$\Delta h_{M_{2i+1}}^{C_i} = k_{M_{2i+1}}^{C_i} (\Delta y_{M_{2i+1}} - \Delta y_{C_i} + d_{M_{2i+1}}^{C_i} \times \sin \Delta \theta^{C_i}), \quad (1)$$

式中:  $k_{M_{2i+1}}^{C_i}$  为相机在标志点  $M_{2i+1}$  对应位置处图像的

放大倍数;  $d_{M_{2i+1}}^{C_i}$  为  $M_{2i+1}$  和  $C_i$  间的距离;  $\Delta h_{M_{2i+1}}^{C_i}$  为相机观测所得的标志点像素变化量,包括竖直和水平两个方向;  $\Delta y_{M_{2i+1}}$  为标志点自身的位移变化量;  $\Delta y_{C_i}$  为相机在竖向或横向的位移;  $\Delta \theta^{C_i}$  为俯仰角或偏航角。类似地,可以得到  $C_i$  所观测的所有标志点的测量方程为

$$\begin{bmatrix} k_{M_{2i-1}}^{C_i} & 0 & -k_{M_{2i-1}}^{C_i} & k_{M_{2i-1}}^{C_i} d_{M_{2i-1}}^{C_i} & 0 & 0 \\ 0 & k_{M_{2i}}^{C_i} & -k_{M_{2i}}^{C_i} & k_{M_{2i}}^{C_i} d_{M_{2i}}^{C_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{M_{2i+1}}^{C_i} & k_{M_{2i+1}}^{C_i} d_{M_{2i+1}}^{C_i} & k_{M_{2i+1}}^{C_i} & 0 \\ 0 & 0 & -k_{M_{2i+2}}^{C_i} & k_{M_{2i+2}}^{C_i} d_{M_{2i+2}}^{C_i} & 0 & k_{M_{2i+2}}^{C_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta y_{M_{2i-1}} \\ \Delta y_{M_{2i}} \\ \Delta y_{C_i} \\ \sin \Delta \theta^{C_i} \\ \Delta y_{M_{2i+1}} \\ \Delta y_{M_{2i+2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta h_{M_{2i-1}}^{C_i} \\ \Delta h_{M_{2i}}^{C_i} \\ \Delta h_{M_{2i+1}}^{C_i} \\ \Delta h_{M_{2i+2}}^{C_i} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

以此类推,可得到如图 1 所示的整个相机链路的测量方程为

$$\mathbf{A}_{4n \times (4n+2)} \cdot \mathbf{Y}_{(4n+2) \times 1} = \mathbf{H}_{4n \times 1}, \quad (3)$$

式中:系数矩阵  $\mathbf{A}$  为由放大倍数和距离组成的稀疏矩

阵;未知量  $\mathbf{Y}$  包括标志点位移量  $\Delta y_{M_{2i-1}}$ 、 $\Delta y_{M_{2i}}$ 、 $\Delta y_{M_{2i+1}}$ 、 $\Delta y_{M_{2i+2}}$  和角度变化量  $\Delta \theta^{C_i}$ ;方程右端的  $\mathbf{H}$  包括标志点像素变化量  $\Delta h_{M_{2i-1}}^{C_i}$ 、 $\Delta h_{M_{2i}}^{C_i}$ 、 $\Delta h_{M_{2i+1}}^{C_i}$ 、 $\Delta h_{M_{2i+2}}^{C_i}$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ )。从式(3)可以看出,此时系数矩阵  $\mathbf{A}$  为非满

秩矩阵,要使得测量方程有唯一解,还至少需要有两个未知量已知,根据桥隧等线状结构特征和相机网络光学约束,通常将位移量已知的两个标志点设置在网络两端<sup>[29]</sup>。从简化模型的角度出发,本文讨论的相机网络假设已知的标志点位移量均为 0,从而可以得到新的测量方程为

$$A'_{4n \times 4n} \cdot Y'_{4n \times 1} = H_{4n \times 1}, \quad (4)$$

式中: $A'$ 取 $A$ 的第 $2 \sim (4n+1)$ 列; $Y'$ 取 $Y$ 的第 $2 \sim (4n+1)$ 行; $H$ 与式(3)中的一致。此时 $A'$ 为满秩矩阵,从而式(4)具有唯一解。

## 2.2 求解条件

上文的讨论一直在相机测站两端标志点数量为 2 的前提下进行,如果相机测站两端的标志点数量增加为 4 个,则测量矩阵为 $A_{8n \times (6n+4)}$ ,易得当相机网络中测站数量 $n$ 大于 1 时,方程可解,此时须分析是否不需要引入已知点就可以直接准确求解式(3)。为此,同样选取前 2 个相机测站 $C_1$ 、 $C_2$ 和其中间的 4 个标志点 $M_5$ 、 $M_6$ 、 $M_7$ 、 $M_8$ 进行分析,根据式(1),可以得到标志点 $M_5$ 在 $C_1$ 、 $C_2$ 满足以下关系:

$$\Delta y_{M_5}^{C_1} = \frac{\Delta h_{M_5}^{C_1}}{k_{M_5}^{C_1}} = \Delta y_{M_5} - \Delta y_{C_1} + d_{C_1}^{M_5} \times \sin \Delta \theta^{C_1}, \quad (5)$$

$$\Delta y_{M_5}^{C_2} = \frac{\Delta h_{M_5}^{C_2}}{k_{M_5}^{C_2}} = \Delta y_{M_5} - \Delta y_{C_2} - d_{C_2}^{M_5} \times \sin \Delta \theta^{C_2}, \quad (6)$$

式中, $y_{M_5}^{C_1}$ 和 $y_{M_5}^{C_2}$ 分别为 $M_5$ 在 $C_1$ 和 $C_2$ 观测到的位移量。式(5)与式(6)相减,有

$$\Delta y_{M_5}^{C_1} - \Delta y_{M_5}^{C_2} = \Delta y_{C_2} - \Delta y_{C_1} + d_{C_1}^{M_5} \times \sin \Delta \theta^{C_1} + d_{C_2}^{M_5} \times \sin \Delta \theta^{C_2}. \quad (7)$$

对标志点 $M_6$ 也可以列出:

$$\Delta y_{M_6}^{C_1} - \Delta y_{M_6}^{C_2} = \Delta y_{C_2} - \Delta y_{C_1} + d_{C_1}^{M_6} \times \sin \Delta \theta^{C_1} + d_{C_2}^{M_6} \times \sin \Delta \theta^{C_2}. \quad (8)$$

式(7)与式(8)相减,有

$$\frac{\sin \Delta \theta^{C_1} - \sin \Delta \theta^{C_2} = \Delta y_{M_5}^{C_1} + \Delta y_{M_6}^{C_2} - \Delta y_{M_6}^{C_1} - \Delta y_{M_5}^{C_2}}{d_{M_5}^{M_6}}, \quad (9)$$

式中, $d_{M_5}^{M_6}$ 为标志点 $M_5$ 和 $M_6$ 的间距。类似地,根据标志点 $M_5$ 和 $M_7$ 可得

$$\frac{\sin \Delta \theta^{C_1} - \sin \Delta \theta^{C_2} = \Delta y_{M_5}^{C_1} + \Delta y_{M_7}^{C_2} - \Delta y_{M_7}^{C_1} - \Delta y_{M_5}^{C_2}}{d_{M_5}^{M_7}}. \quad (10)$$

易得式(9)和式(10)为等效等式,即在双头相机测站间增加标志点可提高方法求解的精度和鲁棒性,与相机网络测量方程(4)是否可解无关。本文还对不同标志点下的测量矩阵进行了模拟仿真,发现随着标志点数量的增加,测量矩阵的行数尽管已大于列数,但矩阵的秩始终比未知量的数量少 2,这进一步验证了上述推导结论。因此,相机网络至少需要 2 个已知量才可以求解方程。

## 3 相机网络误差抑制方法

目前单个相机受硬件及成本限制,其有效测量范围通常在百米量级,难以满足大跨度桥梁、超长隧道的形变监测需求<sup>[30-33]</sup>。基于计算机视觉的结构位移测量方法受到相机自身硬件因素、标定因素、算法因素、环境因素等影响会产生测量误差,相机网络方法虽然可以大幅扩展视觉测量的测量范围,但受测量原理限制,上述测量误差不可避免会随着相机测站的增多不断累积,如何有效地抑制相机网络的累积误差,在确保满足工程测量精度的前提下提高测量范围,是本文方法的关键。

### 3.1 误差累积效应

为构建误差抑制方法的理论模型,在式(4)的基础上,引入条件数 Cond:

$$\text{Cond}(A') = \|A'\| \times \|A'^{-1}\|, \quad (11)$$

条件数刻画了方程组的解对误差的灵敏程度,条件数越大,方程组对误差越敏感<sup>[34]</sup>。矩阵的病态性由条件数反映,而条件数是描述非奇异矩阵的参数,在接下来的讨论中主要围绕相机网络的基本配置(如下文的图 2 所示)进行,是满足非奇异矩阵的条件的,而结合上文所证明的“在双头相机测站间增加标志点与相机网络测量方程是否可解无关”的结论,尽管增加标志点后系数矩阵不为方阵,但可通过乘以转置矩阵得到新的方阵来计算条件数,且由相机网络基本配置总结得到的规律模型对于多标志点、多相机测站的情况同样是适用的,这一点会在本文第 3.3 节处将误差抑制方法运用在不同相机网络后得到验证。

在实际工程应用中,相机自身俯仰角或偏航角的变化量往往很小,取 $\sin \Delta \theta \approx \Delta \theta$ <sup>[35]</sup>。对相机间标志点数量为 2 的情形进行讨论,由式(10),可以得到关于 $\Delta \theta$ 的递推关系式为

$$\Delta \theta^{C_1} = \frac{\Delta y_{M_{2i}}^{C_1} + \Delta y_{M_{2i-1}}^{C_2} - \Delta y_{M_{2i-1}}^{C_1} - \Delta y_{M_{2i}}^{C_2}}{d_{M_{2i-1}}^{M_{2i}}} + \Delta \theta^{C_{i-1}}, \quad (12)$$

式中, $i=2, 3, 4, \dots, n$ ,联立网络两端标志点位移量已知这一隐性初始条件,可以解得 $\{\Delta \theta^{C_1}, \Delta \theta^{C_2}, \dots, \Delta \theta^{C_n}\}$ 。而当有图像定位误差 $\epsilon_y$ 引入时,相机监测得到的标志点位移量 $\Delta y_{M_{2i}}^{C_1} = \Delta y_{M_{2i}}^{C_1} + \epsilon_y$ , $\Delta \theta^{C_1}$ 的计算也因此有所偏差。结合递推式(12),引入的定位误差位于等式右端的分子处,而标志点/相机测站间距 $d$ 位于分母,随着 $d$ 的变大或减小,误差也会随之放大或缩小,这表明标志点/相机测站间距与网络传递误差关系密切。

综合上述讨论,标志点的数量、标志点/相机测站间距与相机网络的传递误差紧密相关,故将此作为研究相机网络误差抑制方法的切入点,对标志点数量和分布方式优化进行讨论。

### 3.2 测量误差参数分析

本文首先采用数值仿真研究标志点的位置和数量

对相机网络测量误差的影响,标志点又可以分为控制点和测量点,控制点即为参考点,其位移量已知或固定不变;测量点为相机网络实际测量时布置在相机网络中的标志点。首先以图 2 所示的相机网络构型作为数值仿真的基本配置,共包括 3 个双头相机测站,各测站左右各 2 个标志点,相机标志点等间距分布,共计 8 个

标志点,两个控制点设置在网络两端,基本配置系统参数如表 1 所示。相机焦距  $f=300\text{ mm}$ ,相机像元尺寸  $d'=5.5\text{ }\mu\text{m}$ ,根据式(10)可以得到距离相机  $D_i$  处的图像放大倍数<sup>[36]</sup>为

$$k = \frac{f}{D_i \times d'} \quad (13)$$

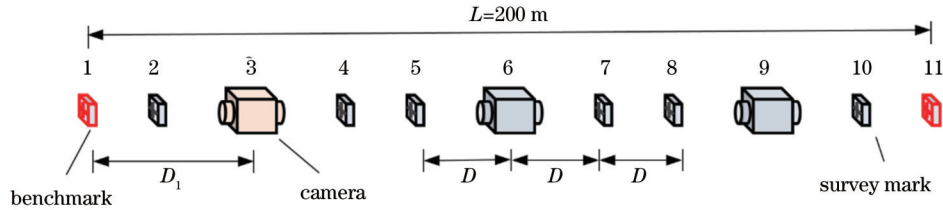


图 2 相机网络基本配置示意图

Fig. 2 Sketch map of camera network basic configuration

表 1 相机网络基本配置系统参数

Table 1 System parameters of camera network basic configuration

Parameter	Notation	Value
Number of simulation cycles	$n'$	$5 \times 10^4$
Spacing between marks	$D$	20 m
Calibration error of scaling factor	$\epsilon_c$	1%
Feature extraction error	$\epsilon_e$	0.5 pixel
Amplitude of subsidence	$s$	100 mm
Angle of inclination	$\theta$	$5'$

具体模拟流程如图 3 所示。

本文选取测点的偏差均值  $E$  和均方根误差  $R_e$  对相机网络测量误差进行评估:

$$E(X_m) = \frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}_{m,i} - x_{m,i})}{n'} \quad (14)$$

$$R_e(X_m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}_{m,i} - x_{m,i})^2}{n'}} \quad (15)$$

$$R_{e,\max}(X_{m'}) = \max\{R_{e,\max}(X_1), R_{e,\max}(X_2), \dots\} \quad (16)$$

式中:  $X_m$  为第  $m$  个测点的位移 ( $m$  代表计算得到的某个位移量  $y_{M_i}, y_{M_i}^C$  或角度量  $\theta^C$ ,  $m'$  则只代表位移量  $y_{M_i}, y_{M_i}^C$ );  $\tilde{x}$  和  $x$  分别为测点位移的解算值和真实值;  $i$  为仿真序号;  $n'$  为仿真总次数;  $R_{e,\max}(X_{m'})$  为所有待测点竖向位移偏差均方根误差的最大值。

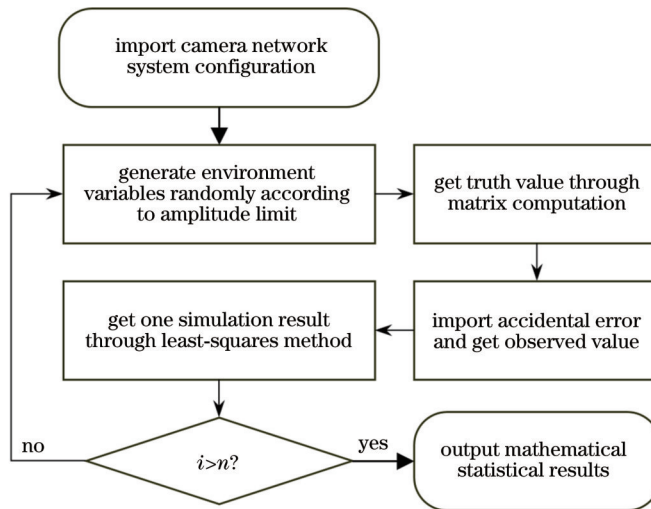


图 3 相机网络数值仿真流程

Fig. 3 Numerical simulation procedure of camera network

针对图 2 所示的基本配置,根据图 3 所示流程进行仿真后,对结果进行数理统计,可以得出不同位置处沉降量的  $E$  和  $R_e$  值如图 4 所示。相机网络的预测误差近似无偏,各个测点的  $E$  值较小,在  $10^{-2}\text{ mm}$  量级,而  $R_e$

值则随着标志点/相机位置呈对称分布,并且从网络两端往中间逐渐递增,例如,网络两侧和中部的测点  $R_e$  值分别为 1.01 mm 和 2.92 mm。易得同一个相机网络,其测量误差从网络两端控制点至中部有明显的累

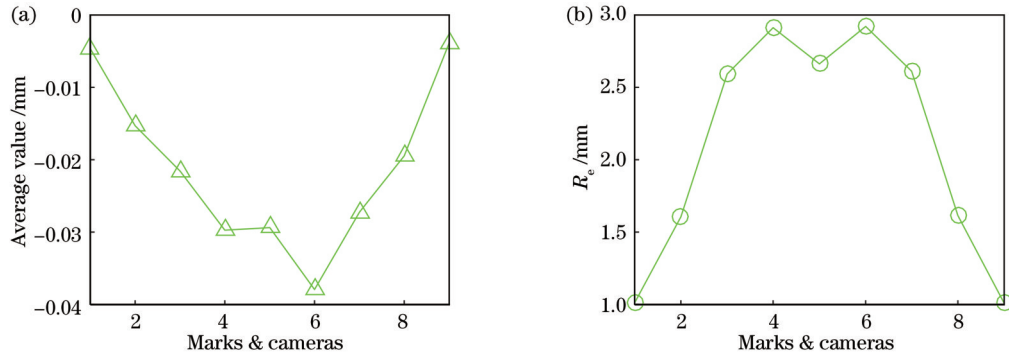


图 4 相机网络基本配置统计结果。(a)均值;(b)均方根误差

Fig. 4 Statistical results of camera network basic configuration. (a) Average value; (b) root mean square error

积效应。

相机测站是相机网络的重要组成部分之一,本文进一步分析相机测站数量与网络传递误差量级的关系。当相机布站数量增加或减少时,在测量点间距不变(相机网络可延伸)和相机网络全长不变两种情况下,分别仿真相机测站数量对传递误差的影响。结合图4以及具体的仿真结果,相机网络的均值具有不稳定性,但都是接近于0的极小值,即都是较为理想的结果,故不对均值进行讨论,而以整个相机链路中测点均方根误差最大值代表相机网络的误差累积大小,所得结果如图5所示,两种情况下随着相机测站数量的增大传递误差也逐渐增大,且两种情况的传递误差大小相距很近。

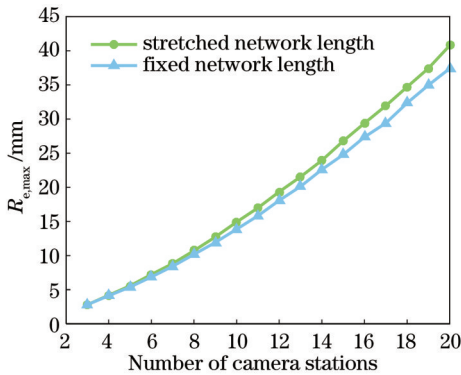


图 5 相机测站数量对传递误差的影响

Fig. 5 Influence of camera station number on transmission error

除了相机测站数量,网络覆盖区域的沉降振幅量,以及相机测站俯仰角变化量也是相机网络的重要指标。沉降幅值指图1中 $\Delta y$ 的变化范围,当网络所覆盖监测的结构为隧道时,沉降振幅量的量级约为30 mm(即 $\Delta y$ 在 $\pm 30$  mm范围内变化),当监测结构为柔性桥梁时,沉降振幅量可以达到上百毫米。而相机测站角度形变受监测环境(如风力、结构震动等)的影响,会有角分量级的变化,沉降振幅量和俯仰角变化量与网络传递误差的关系如图6所示,沉降振幅量、俯仰角变化量与传递误差均呈现出正相关的变化趋势,其中沉降振幅量与传递误差呈线性关系,且相比之下传递误差

对沉降振幅量更加敏感,当振幅量从10 mm变化至200 mm时,就使得传递误差从1.25 mm变化至5.35 mm,而俯仰角变化量的变化对传递误差影响不大。相机组网的传递误差主要是由于上述计算模型的简化,将光轴俯仰变化量视作小量、简化表示相机光轴旋转造成的等效沉降量,使得相机网络系统在引入放大倍数误差、图像定位误差后更加脆弱<sup>[35]</sup>,故当测量真值增大时,由于模型简化所带来的误差也会进一步放大。

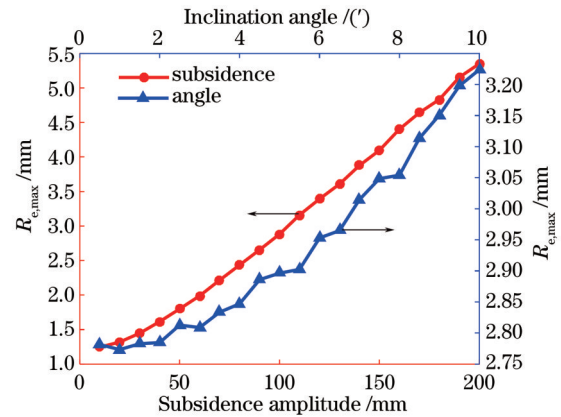


图 6 沉降振幅量、俯仰角变化量对传递误差的影响

Fig. 6 Influence of subsidence amplitude and inclination angle on transmission error

### 1) 控制点对传递误差的影响

本节首先讨论控制点位置对传递误差的影响,如图2所示,从左至右给相机网络每个组成部分编号,控制点位置可以设置在这11个位置中的任意两个(相机测站自身也具有沉降量,故也可作为控制点)。分别对该 $C_{11}^2 = 55$ 种情况进行仿真,仿真过程中除了控制点位置外其他参数均保持一致。仿真后得到相机网络测量误差如图7(a)所示,易得测量误差以右对角线为轴,沿左对角线方向两端逐渐递增,这意味着当两控制点的间距一定时,两控制点整体分布越往相机网络两侧偏移,传递误差越大;此外,当控制点分别设在相机网络两侧末端的相机测站处(即图2中的3和9)时,测

量误差最小。图 7(b)则是对每种情况下未引入误差的测量矩阵  $A$  进行计算分析得到的条件数。图 7(a)

和 7(b)中的方格分别代表了每个位置组合下的均方根误差和条件数大小。

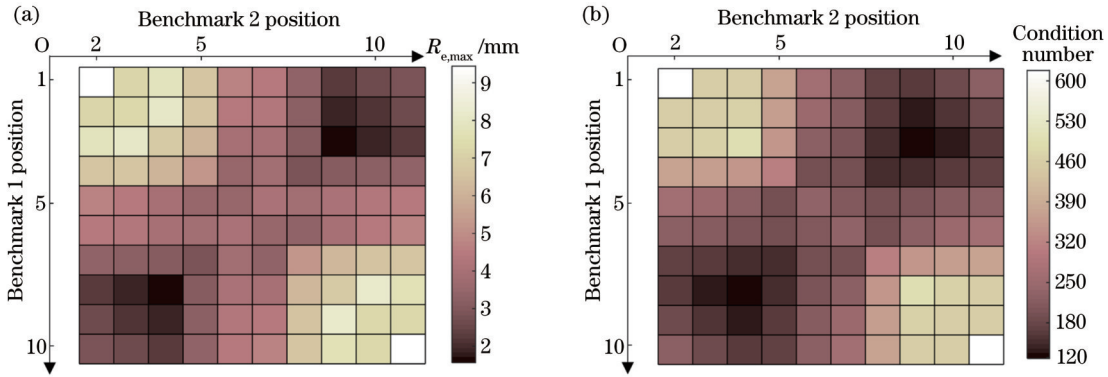


图 7 控制点位置对传递误差的影响。(a)均方根误差;(b)测量矩阵条件数(图中方格以颜色的深浅代表对应因变量值的大小,颜色对应的数值与图中右侧色度条相对应)

Fig. 7 Influence of benchmark position on transmission error. (a) Root mean square error; (b) condition number of survey matrix (color of grid in picture represents magnitude of corresponding dependent variable. Magnitude that color represents corresponds to color bar on right side of picture)

实际工程中,控制点通常只能布置于指定位置,难以随意变动<sup>[35]</sup>。本节进一步针对这种情况进行模拟,在基本配置下,将控制点固定在图 2 中的 1 和 11 处,移动位置 3 处相机测站,研究相机测站到控制点不同距离 ( $D_1$ ) 对相机网络传递误差的影响。图 8(a) 给出了  $D_1$  在 0~55 m 范围内的测量误差,图中区域 1 代表位置 1 到位置 2,区域 2 代表位置 2 到位置 4。总体上,测量误差随着  $D_1$  的增大而增大,且当相机测站从区域 1 移

动到区域 2 时出现快速增大。其中当  $D_1=0$ ,即在网络左端控制点处设置相机测站时,相机网络测量误差最小,约为 2.48 mm。根据相机网络的对称性,可同样在网络右端控制点处设置相机测站,以进一步提高测量精度,其结果如图 8(b) 所示。当两端控制点处同时设置相机测站时,测量误差为 0.95 mm [即图 8(b)  $D_1=0$  处],误差得到极大的抑制。

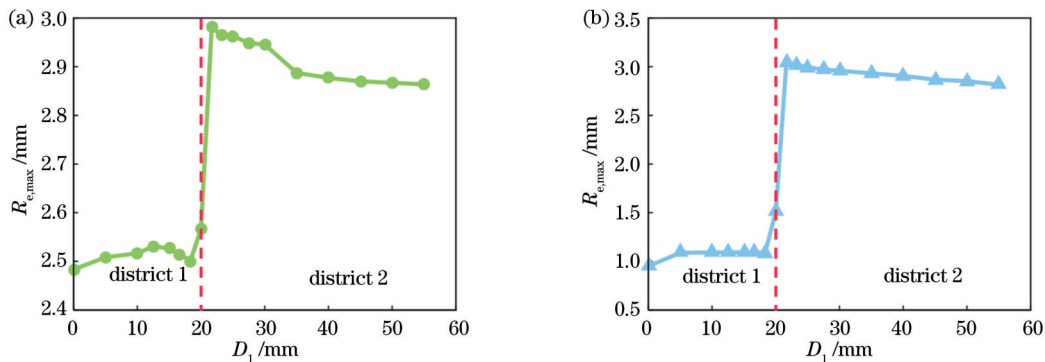


图 8 相机测站与控制点的距离 ( $D_1$ ) 对传递误差的影响。(a)网络单侧改变相机测站到控制点的距离;(b)网络双侧同时改变相机测站到控制点的距离

Fig. 8 Influence of distance between camera station and benchmark position ( $D_1$ ) on transmission error. (a) Changing distance between camera station and benchmark position on one side of network; (b) changing distance between camera station and benchmark position simultaneously on both sides of network

### 2) 测量点对传递误差的影响

平差理论中,分阶段平差与整体平差的结果基本一致<sup>[37]</sup>,因此,在优化相机网络控制点后,可通过优化测量点数量和分布方式进一步抑制传递误差。

#### a) 测量点位置

在仿真基本配置的基础上,测量点不再是等间距分布,而是有多种不同的分布方式可供选择,如图 9 所

示。根据离散代替连续的思想,此时将相机测站间距平均分成了 20 份,两个测量点的位置就在位置 1 到 21 中进行选择,以尽可能覆盖测量点分布的所有情况(其中位置 1 和 21 代表的是相机测站,在测量点优化中相机测站同样可以作为网络的一个测量点)。假设每两个相机测站间测量点分布相同,对  $C_{21}^2=210$  种情况的仿真结果如图 10(a) 所示。易得测量误差沿  $x$  轴方向

和  $y$  轴方向均呈单调变化的趋势, 具体来说, 当两个测量点的距离最近, 且分布在相机网络的同一侧, 即位于位置 2、3 或 19、20 时,  $R_{e,max}$  值达到最大, 约为 16.54 mm; 当两个测量点相距较远且均设置在相机测

站, 即位于位置 1、21 时,  $R_{e,max}$  值最小, 为 0.39 mm。图 10(b) 进一步给出了上述仿真结果对应的测量矩阵条件数。图 10(a) 和 10(b) 中的方格分别代表了每个位置组合下的均方根误差和条件数大小。

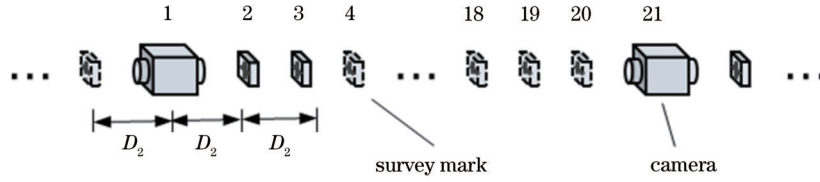


图 9 相机测站间测量点分布示意图

Fig. 9 Sketch map of survey mark distribution between camera stations

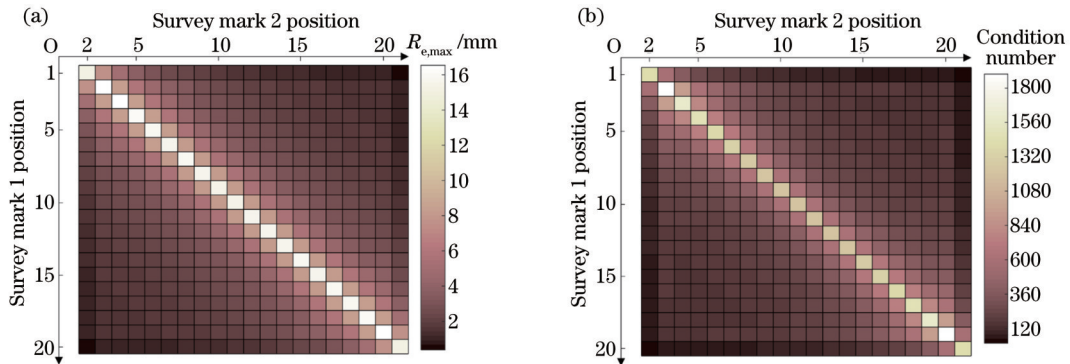


图 10 测量点位置对传递误差的影响。(a) 均方根误差; (b) 测量矩阵条件数 (图中方格以颜色的深浅代表对应因变量值的大小, 颜色对应的数值与图中右侧色度条相对应)

Fig. 10 Influence of survey mark position on transmission error. (a) Root mean square error; (b) condition number of survey matrix (color of grid in picture represents magnitude of corresponding dependent variable. Magnitude that color represents corresponds to color bar on right side of picture)

b) 测量点数量

假设网络总长度不变, 随着测量点数量增加测量点仍保持等间距分布。对基本配置下测量点数量从 2 到 20 进行仿真, 仿真结果如图 11 所示。随着测量点数量的变化, 传递误差呈现出对数级降低的趋势, 以基本配置下的相机网络为例, 将相机间的测量点数量控制在 5 个以上, 即可将测量精度提高近 1 倍。

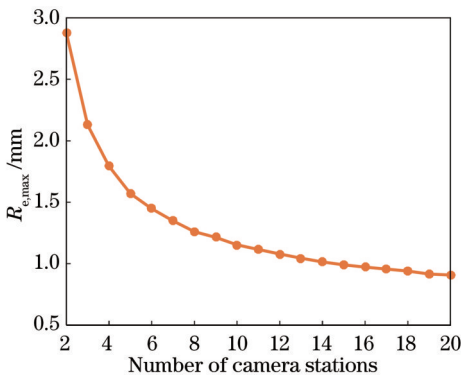


图 11 测量点数量对传递误差的影响

Fig. 11 Influence of survey mark number on transmission error

3.3 误差抑制方法

对比图 7 和图 10, 易得相机网络传递误差与测量

矩阵条件数近似正相关。为了构建更加完善的理论模型, 定义误差系数  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{\text{Cond}}{n} \quad (17)$$

在对条件数分别除以对应的相机基站数得到误差系数后, 消除了  $n$  对  $R_e$  的影响, 从而统一了不同站数相机网络误差系数值的大小。其中不同基站数下每一种控制点/测量点分布情况都对应一个误差系数, 即均方根误差  $R_e$  与误差系数  $\gamma$  为一一对应的关系。由此给出  $R_e$ - $\gamma$  散点图, 并给出每种相机网络的线性回归趋势线和对应的回归方程决定系数  $R^2$  以及  $F$  统计量 (测量点位置影响情况中剔除了部分误差系数过大的奇异点)。

如图 12 所示, 在不同站数相机网络下, 误差系数取值范围均十分接近。无论是控制点还是测量点的情况,  $R^2$  均在 0.95 附近,  $F$  统计量远大于  $F$  检验的对应临界值, 说明  $R_e$  与  $\gamma$  有很好的线性相关性, 这意味着误差系数  $\gamma$  可以作为反映相机网络传递误差  $R_e$  的一个判别指标, 无须经过仿真运算就能判别  $R_e$  的好坏程度。结合式 (2) 中系数矩阵的表达式以及式 (13) 放大倍数  $k$  的定义, 易得当标志点数量和相机内参取定时, 系数矩阵  $A'$  可化简成仅含距离  $d$  (标志点到相机的距离, 以及相机与相机的间距) 的一个自变量, 从而构建反映相

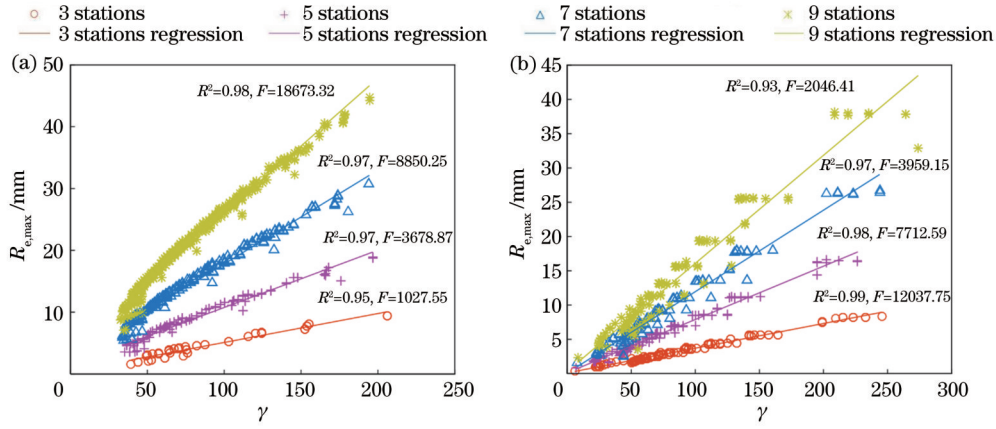


图 12 相机网络传递误差与误差系数的关系。(a)控制点位置影响;(b)测量点位置影响

Fig. 12 Relationship between transmission error and error coefficient of camera network. (a) Influence of benchmark position; (b) influence of survey mark position

机网络传递误差情况的理论模型:

$$\min \gamma(d), d \in D_{des}, \quad (18)$$

式中,  $D_{des}$  为距离向量  $d$  的候选设计池, 可根据监测环境、工程需求、造价等实际条件综合确定。针对不同相机测站数量, 以误差系数  $\gamma$  为优化目标, 调整标志

点间距、标志点数量使得  $\gamma$  最小, 以此为依据对相机网络进行合理设计, 提高测量方程对误差的鲁棒性, 进而有效抑制测量误差。表 2 进一步给出了 3 相机测站、5 相机测站、7 相机测站相机网络的部分设计结果。

表 2 不同数量相机测站的相机网络优化对比

Table 2 Comparison of camera network optimization with different camera stations

Network configuration	Instruction	3 camera stations		5 camera stations		7 camera stations	
		$\sigma$ /mm	$\Delta$ /%	$\sigma$ /mm	$\Delta$ /%	$\sigma$ /mm	$\Delta$ /%
0	2 uniformly-spaced survey marks between camera stations	2.88	0	5.72	0	9.15	0
1	Set cameras at benchmark on both sides	0.95	67.02	5.10	10.85	8.79	3.93
2	5 uniformly-spaced survey marks between camera stations	1.59	44.80	2.87	49.79	4.46	51.22
3	Set survey marks on camera stations	1.01	64.87	1.79	68.77	2.78	69.66
4	Configurations 1+3	0.66	76.91	1.63	71.57	2.62	71.33
5	Configurations 2+3	1.02	64.40	1.72	70.01	2.57	71.95
6	Configurations 1+2+3	0.59	79.44	1.48	74.08	2.40	73.83

Notes:  $\sigma$  is maximum value of all survey mark displacement transmission error and  $\Delta$  is percentage of error optimization.

与相机网络基本构型 0 相比, 单独执行上述三点优化(即构型 1~3), 构型 1(在控制点处布置相机测站)取得了最好的误差抑制效果, 但随着相机测站数的增加误差抑制效果迅速下降; 构型 2(测站间增设标志点)总体误差抑制效果良好, 而构型 3(测站处设置标志点)对于三种相机网络均有较高的误差抑制效果, 克服了相机测站增加而导致的优化效率下降问题。在将构型 3 与其他构型结合后, 构型 4 更适合相机测站数量少的网络, 构型 5 则在相机测站数量多的网络中表现良好。实际工程中, 若条件允许, 最好采用构型 6 来优化相机网络, 相较于初始网络构型, 可以有效抑制测量误差, 最大可抑制 79.44%。以下为根据理论模型以及所设计网络的仿真结果, 给出的有效抑制相机网络的传递误差的主要建议:

- 1) 优先在控制点处布置相机测站;
- 2) 尽可能在相机测站处增加标志点;

3) 尽可能在相机测站间多布设标志点, 建议双头相机测站间的标志点不少于 5 个。

## 4 验证实验

为了验证本文提出的误差抑制方法的有效性, 选取某一大跨度斜拉桥进行现场验证实验。如图 13 所示, 首先在桥梁主跨钢箱梁内部布置上述相机网络系统, 网络全长 700 m, 标志点等间距分布, 其中设置了 6 个双头相机测站, 2 个单目相机, 27 个测量点(有 6 个位于相机测站上), 2 个控制点(位于钢箱梁主塔处)。此外, 在主塔横梁上布置了固定性相机测站, 看向 1/16 跨处的同名测点进行对比。本次实验所用相机参数配置如表 3 所示。

在获取桥梁监测数据后, 进一步对表 4 中不同网络构型下的测量结果进行对比, 如图 14 所示。



表 3 实验相机参数配置  
Table 3 Parameters of experimental camera

Resolution /pixel	Frame rate /((frame·s <sup>-1</sup> ))	Sensor	Pixel size /μm	Focal length /mm
2448×2048	36	2/3", Sony IMX264	3.45×3.45	400

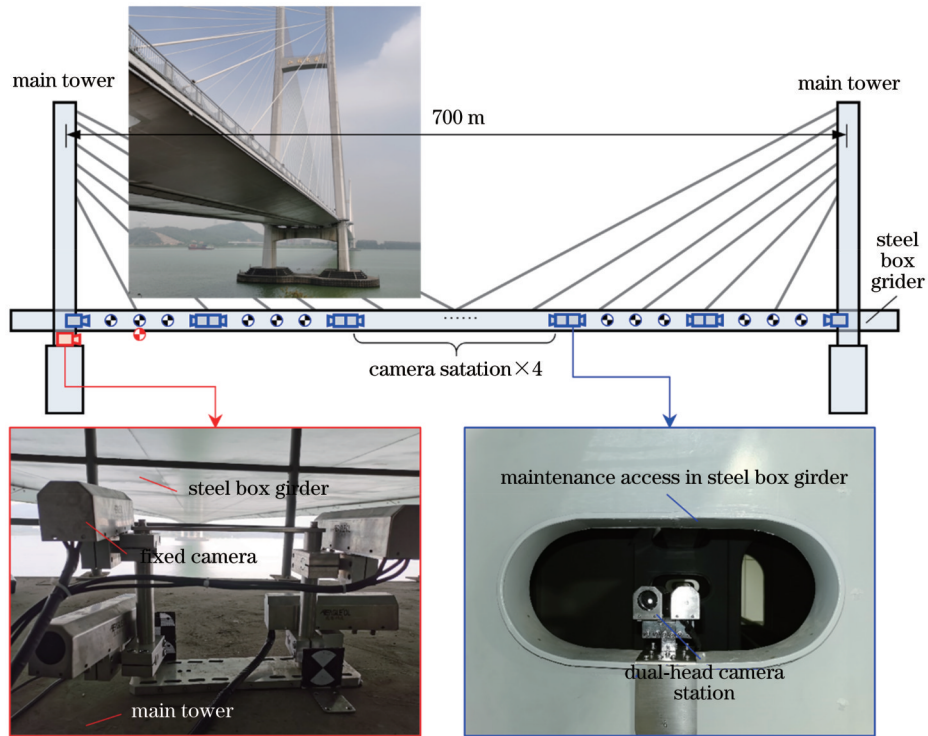


图 13 大跨度斜拉桥相机网络验证实验

Fig. 13 Validation experiment of camera network on long-span cable-stayed bridge

表 4 不同误差抑制方法下的桥梁监测结果

Table 4 Bridge monitoring results of different error suppression methods

Configuration	Instruction	$\sigma$ /mm
1	Set marks on benchmarks; 2 marks between stations	10.14
2	Set marks on benchmarks; 3 marks between stations	9.41
3	Set cameras on benchmarks; 2 marks between stations	3.13
4	Set cameras on benchmarks; 3 marks between stations	2.58
5	Set cameras on benchmarks; 2 marks between stations; set marks on stations	3.07
6	Set cameras on benchmarks; 3 marks between stations; set marks on stations	2.11

在斜拉桥现场实验中验证的网络构型其构建思路与上文中误差抑制方法给出的思路相类似,即运用控制变量法,逐步组合叠加适用的误差抑制方法,如从构型 1 到 2,运用了增加测站间测量点数量的方法,而构型 6 对应的就是表 1 中提到的最优误差抑制方法。由图 14 可见,构型 1、2 曲线无论是趋势上还是数值上均与验证相机曲线有很大的出入,随着网络构型的逐步组合优化,构型 3~6 曲线已与验证相机曲线很好地贴合。结合表 4,在采用本文提出的误差抑制方法优化网络构型后,1/16 跨处的网络传递误差从 10.14 mm 优化至 2.11 mm,误差优化百分比达 79.19%,优化效

果与仿真预测的结果基本一致。

## 5 结 论

本文针对相机网络误差传递机理及抑制方法,通过理论分析、数值仿真与验证实验对其进行了研究。结果表明,可通过优化相机测站和标志点布置方式有效抑制相机组网传递测量误差,为相机组网构型优化提供参考。根据上述结果,主要结论如下:

1) 双头相机位移传递链路,至少需要 2 个控制点。相机测站数量、沉降振幅量、俯仰角变化量与网络传递误差均为正相关的关系,测量点数量与网络传递误差

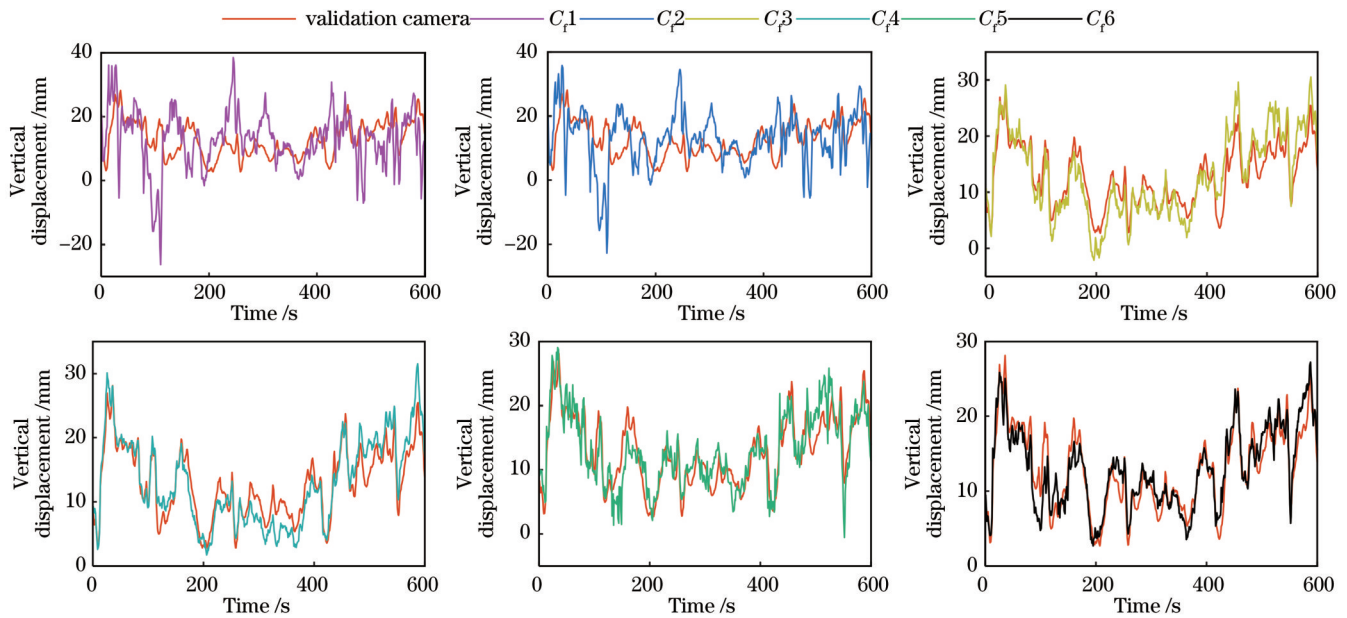


图 14 不同网络构型下的斜拉桥相机网络监测结果( $C_1$ ~ $C_6$ 分别代表表 4 中的网络构型 1~6)

Fig. 14 Monitoring results of cable-stayed bridge camera network with different network configurations ( $C_1$ ~ $C_6$  represent network configurations 1~6 respectively in Table 4)

为负相关的关系；

2) 所提出的基于误差系数的相机网络误差抑制设计方法可以较好地指导网络构型优化, 相机网络测量误差与所定义的误差系数高度相关, 误差系数越小, 测量误差越小；

3) 建议在控制点处优先布置相机测站以抑制累积误差。将控制点处的标志点换为相机测站, 仿真结果表明, 可以达到 60% 以上的误差抑制效果, 但随着相机测站数量增加误差抑制效果会有所减弱; 实桥验证结果表明, 测量误差被有效抑制 69.13%；

4) 建议在相机测站处布置标志点以抑制累积误差。仿真结果表明, 该抑制方法可以使得基本配置网络传递误差从 2.88 mm 优化至 1.01 mm; 实桥验证结果表明, 相机误差从 10.14 mm 被抑制到 3.07 mm。

#### 参 考 文 献

- [1] He X L, Yang X S, Zhao L Z. New method for high-speed railway bridge dynamic deflection measurement[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(7): 05014004.
- [2] Jáuregui D V, White K R, Woodward C B, et al. Noncontact photogrammetric measurement of vertical bridge deflection[J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(4): 212-222.
- [3] Lichti D D, Jamtsho S, El-Halawany S I, et al. Structural deflection measurement with a range camera[J]. Journal of Surveying Engineering, 2012, 138(2): 66-76.
- [4] Mohamad H, Soga K, Bennett P J, et al. Monitoring twin tunnel interaction using distributed optical fiber strain measurements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(8): 957-967.
- [5] 孙丽, 王兴业, 李闯, 等. 基于等强度梁的新型双光纤光栅静力水准仪[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1406005.  
Sun L, Wang X Y, Li C, et al. New double fiber Bragg grating static level based on equal strength beams[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1406005.
- [6] 樊叶华, 陈雄飞, 钱振东. 拉绳式位移传感器在江阴大桥结构健康监测中的应用[J]. 公路交通科技, 2007, 24(2): 70-72, 83.  
Fan Y H, Chen X F, Qian Z D. Application of draw-wire displacement sensors in the structural health monitoring of Jiangyin bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(2): 70-72, 83.
- [7] 刘龔, 王文剑, 李波, 等. 基于 MEMS 倾角仪的桥梁挠度监测动态及长期性能研究[J]. 中外公路, 2020, 40(4): 174-178.  
Liu Y, Wang W J, Li B, et al. Dynamic and long-term performance of bridge deflection monitoring based on MEMS inclinometer[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4): 174-178.
- [8] Rothberg S J, Allen M S, Castellini P, et al. An international review of laser Doppler vibrometry: making light work of vibration measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 99: 11-22.
- [9] Psimoulis P A, Stiros S C. Measuring deflections of a short-span railway bridge using a robotic total station[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(2): 182-185.
- [10] 戴加东, 王艳玲, 褚伟洪. 静力水准自动化监测系统在某工程中的应用[J]. 工程勘察, 2009, 37(5): 80-84.  
Dai J D, Wang Y L, Chu W H. The application of hydrostatic leveling system in construction engineering[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 37(5): 80-84.
- [11] 周威, 杜馨瑜, 薛宪堂, 等. 高速铁路接触网几何参数立体视觉测量系统[J]. 光学学报, 2023, 43(5): 0512001.  
Zhou W, Du X Y, Xue X T, et al. Stereo vision-based measurement system for geometric parameters of high-speed railway catenary[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(5): 0512001.
- [12] 崔海华, 漏华斌, 田威, 等. 轨道式爬机器人制孔基准的视觉高精度定位[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0915002.  
Cui H H, Lou H C, Tian W, et al. High-precision visual positioning of hole-making datum for orbital crawling robot[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0915002.
- [13] Zhou X, Wang J J, Mou X G, et al. Robust and high-precision vision system for deflection measurement of crane girder with camera shake reduction[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 7478-7489.

- [14] Attanayake U, Aktan H. Noncontact measurement of bridge load response using He-Ne modulated lasers[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(11): 04019101.
- [15] Qiu Z R, Li H P, Hu W C, et al. Real-time tunnel deformation monitoring technology based on laser and machine vision[J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 2579.
- [16] 杜文康, 雷冬, 杭宗庆, 等. 基于 SURF-PROSAC 法的高铁桥梁位移测量技术研究[J/OL]. 铁道科学与工程学报:1-12[2023-02-13]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20222039>.  
Du W K, Lei D, Hang Z Q, et al. Research on deformation measurement technology of high-speed railway bridge based on SURF-PROSAC method[J/OL]. Journal of Railway Science and Engineering:1-12[2023-02-13]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20222039>.
- [17] 韩怡天, 冯东明, 吴刚. 基于机器视觉与无人机的结构动位移测量方法[J]. 振动与冲击, 2022, 41(19): 1-7.  
Han Y T, Feng D M, Wu G. Structural dynamic displacement measurement method based on machine vision and UAV[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(19): 1-7.
- [18] 李鑫, 张跃强, 刘进博, 等. 基于直线段对应的相机位姿估计直接最小二乘法[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0615003.  
Li X, Zhang Y Q, Liu J B, et al. A direct least squares method for camera pose estimation based on straight line segment correspondences[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0615003.
- [19] 张跃强, 苏昂, 刘海波, 等. 基于多级直线表述和 M-估计的三维目标位姿跟踪优化算法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0115003.  
Zhang Y Q, Su A, Liu H B, et al. Three dimensional rigid objects pose tracking and optimization based on multilevel line representation and M-estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0115003.
- [20] 田苗, 关棒磊, 孙放, 等. 一种无公共视场的多相机系统相对位姿解耦估计方法[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0515001.  
Tian M, Guan B L, Sun F, et al. Decoupling relative pose estimation method for non-overlapping multi-camera system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0515001.
- [21] Dinc S, Fahimi F, Aygun R. Mirage: an  $O(n)$  time analytical solution to 3D camera pose estimation with multi-camera support[J]. Robotica, 2017, 35(12): 2278-2296.
- [22] 鞠默然, 罗海波, 王仲博, 等. 改进的 YOLO V3 算法及其在小目标检测中的应用[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0715004.  
Ju M R, Luo H B, Wang Z B, et al. Improved YOLO V3 algorithm and its application in small target detection[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0715004.
- [23] 祝世平, 李政. 基于改进梯度和自适应窗口的立体匹配算法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0110003.  
Zhu S P, Li Z. A stereo matching algorithm using improved gradient and adaptive window[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0110003.
- [24] 张跃强, 周朗明, 尚洋, 等. 基于轮廓模型的单应识别优化算法[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1015001.  
Zhang Y Q, Zhou L M, Shang Y, et al. Homography recognition and optimization algorithm based on contour model[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1015001.
- [25] Ge L F, Dan D H, Li H. An accurate and robust monitoring method of full-bridge traffic load distribution based on YOLO-v3 machine vision[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(12): e2636.
- [26] 胡烁陶, 孙晖, 王敏诚, 等. 空间结构形变的多视点高精度测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(19): 1912004.  
Hu S T, Sun H, Wang M C, et al. Multi-viewpoint and high-precision measurement method for spatial structure deformation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(19): 1912004.
- [27] 刘屹东, 贾振堂. 基于非线性优化的改进相机内参数标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(18): 1815014.  
Liu Y D, Jia Z T. Improved camera internal parameter calibration method based on nonlinear optimization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(18): 1815014.
- [28] 姜群, 吕钧瀚, 文立华, 等. 基于亚像素边缘检测的高精度相机标定方法[J]. 光学学报, 2022, 42(20): 2012002.  
Lou Q, Lü J H, Wen L H, et al. High precision camera calibration method based on sub-pixel edge detection[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(20): 2012002.
- [29] Yu Q F, Jiang G W, Shang Y, et al. A displacement-relay videometric method for surface subsidence surveillance in unstable areas[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(6): 1105-1111.
- [30] Khuc T, Catbas F N. Completely contactless structural health monitoring of real-life structures using cameras and computer vision[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24(1): e1852.
- [31] Harvey Jr P S, Elisha G. Vision-based vibration monitoring using existing cameras installed within a building[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(11): e2235.
- [32] 赵敏, 李晓港, 苏泽鹏, 等. 基于定向分层靶标的相机参数标定[J]. 光学学报, 2022, 42(16): 1612004.  
Zhao M, Li X G, Su Z P, et al. Camera parameter calibration based on directional layered target[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(16): 1612004.
- [33] 石世锋, 叶南, 张丽艳. 具有远近视距的两目视觉系统标定技术研究[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2415001.  
Shi S F, Ye N, Zhang L Y. Calibration of two-camera vision system with far and near sight distance[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2415001.
- [34] 李大美, 李素贞, 朱方生. 计算方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2012: 65-69.  
Li D M, Li S Z, Zhu F S. Calculation method[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2012: 65-69.
- [35] 尚洋, 于起峰, 关棒磊, 等. 大型结构变形监测摄像测量研究进展[J]. 实验力学, 2017, 32(5): 593-600.  
Shang Y, Yu Q F, Guan B L, et al. Recent advances of videometrics for large-scale structure deformation monitoring[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(5): 593-600.
- [36] Minwalla C, Shen E, Thomas P, et al. Correlation-based measurements of camera magnification and scale factor[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(6): 699-706.
- [37] 崔希璋, 於宗俦, 陶本藻, 等. 广义测量平差[M]. 2 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2009: 27-30.  
Cui X Z, Yu Z C, Tao B Z, et al. Generalized survey adjustment[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2009: 27-30.

# Transmission Mechanism and Suppression Methods of Measurement Error Based on Camera Networking

Zhang Yueqiang<sup>1,2</sup>, Chen Mingjie<sup>1,2</sup>, Hu Biao<sup>1,2\*</sup>, Chen Wenjun<sup>1,2</sup>, Yin Yihe<sup>1,2</sup>, Yu Qifeng<sup>1,2</sup>,  
Liu Xiaolin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Intelligent Optical Measurement and Detection, Shenzhen University, Shenzhen 518000, Guangdong, China;*

<sup>2</sup>*College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518000, Guangdong, China*

## Abstract

**Objective** With the rapid development of construction and operation scale of infrastructure such as bridges and tunnels, structural safety is becoming increasingly important. Structural health monitoring is a vital issue in structural safety, operation, and maintenance. Displacement monitoring is one of the most fundamental and routine tasks in structural health monitoring. Among various displacement measurement methods, the contact displacement measurement method is conceptually straightforward to implement. However, it requires specific environmental conditions for accurate measurements. The non-contact displacement measurement methods (e. g., level gauges and total stations) have widespread applications in engineering. However, they cannot satisfy the measurement requirement of long-span structures due to the large-scale range and high accuracy requirements. For deformation monitoring of long linear structures like bridges and tunnels, the displacement-relay series camera network method has been proven to be effective. With the increasing number of camera stations, the accumulated error can be caused due to uncertain factors such as feature extraction errors and model simplifications. It is a challenge to reduce the accumulated error of the camera network. Hence, this study aims to suppress the accumulated error effect, consequently enhancing the measurement accuracy of the camera network.

**Methods** We first conduct the theoretical analysis to demonstrate the solution conditions for the displacement-relay series camera network method. Before the simulation study, the basic network configuration is defined. Then, the accumulated error effect of the camera network is investigated through numerical simulations. According to the simulation results, we propose a method based on error coefficients to reduce the accumulated error of the camera network. The error coefficient consists of the condition number of the measurement matrix and the station number of the network. Finally, we provide a direct characterization of network measurement errors to enable the investigation of cumulative effects resulting from displacement transmission errors in the camera network. The influence of benchmarks and survey marks' positions, and their numbers on the measurement accuracy of the displacement-relay camera network is thoroughly analyzed. Based on the analysis results, the camera network configuration is optimized, and an optimal distribution pattern for camera stations and mark points is advised. Finally, the feasibility of the proposed method is verified by field experiments.

**Results and Discussions** We initially discuss the fundamental principle of displacement-relay series camera network and the necessity of benchmarks through the derivation of Eqs. (5)–(10), which also paves the way for extending the theoretical model to a complex camera network. In Section 3.1, the accumulated error effect of the camera network is investigated by integrating the theoretical foundation and formula derivation from Section 2. Subsequently, a detailed discussion of the error transmission effect and error suppression method is carried out through numerical simulations for the basic configuration of the series camera network. Next, the influence of network composition parameters on the transmission error is investigated (Figs. 5 and 6). The transmission errors for the distribution positions of all benchmarks and survey marks are studied (Figs. 7 and 10). A theoretical model that reflects the transmission error of the camera network is proposed by introducing the error coefficient as an evaluation index and leveraging the highly linear correlation between the measurement error and the error coefficient [Eq. (18)]. Finally, the proposed error reduction method is verified by the observation data obtained from a long-span cable-stayed bridge.

**Conclusions** We focus on the mechanism and suppression methods of transmission error in the displacement-relay series camera networks. The results show that the displacement transmission link of dual-head cameras requires at least two benchmarks. There is a positive correlation among the number of camera stations, settlement amplitude, pitch angle variation, and network transmission error, while there is a negative correlation between the number of measurement marks and network transmission error. The proposed design method of camera network error suppression based on error coefficient can guide network configuration optimization. The measurement error of the camera network is highly

correlated with the defined error coefficient, and the smaller error coefficient leads to a smaller measurement error. The camera stations should be placed at benchmarks to suppress accumulated errors. Replacing the mark points at the benchmarks with camera stations shows that the error suppression effect can reach over 60%, but the error suppression effect will weaken as the number of camera stations increases. The actual bridge verification results indicate that the measurement error is suppressed by 69.13%. The mark points are advised to be placed at camera stations to suppress accumulated errors. The simulation results show that this suppression method can optimize the transmission error of the basic configuration network from 2.88 to 1.01 mm. The actual bridge verification results show that the camera error is suppressed from 10.14 to 3.07 mm.

**Key words** camera networking; linear structure; deformation monitoring; displacement transmission error; configuration optimization