

基于机器视觉的桥梁结构变形监测技术探讨

熊 培¹, 张 元², 官友伟², 张洪铭²

¹重庆科技大学土木与水利工程学院, 重庆

²中铁建大桥工程局集团第五工程有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2025年4月30日; 录用日期: 2025年5月22日; 发布日期: 2025年5月31日

摘 要

桥梁结构变形监测对于保障桥梁安全运营至关重要。本文探讨了基于机器视觉的桥梁结构变形监测技术, 介绍了其基本原理、系统构成以及在桥梁变形监测中的应用优势和挑战。同时对未来的发展方向进行了展望, 旨在为相关研究和工程应用提供参考。

关键词

机器视觉, 桥梁结构, 变形监测, 技术应用

Exploration of Bridge Structural Deformation Monitoring Technology Based on Machine Vision

Pei Xiong¹, Yuan Zhang², Youwei Guan², Hongming Zhang²

¹College of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Apr. 30th, 2025; accepted: May 22nd, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

Monitoring the deformation of bridge structures is crucial for ensuring the safe operation of bridges. This article explores the deformation monitoring technology of bridge structures based on machine vision, introduces its basic principles, system composition, and the advantages and challenges of its

文章引用: 熊培, 张元, 官友伟, 张洪铭. 基于机器视觉的桥梁结构变形监测技术探讨[J]. 土木工程, 2025, 14(5): 1342-1347. DOI: 10.12677/hjce.2025.145143

application in bridge deformation monitoring. At the same time, the future development direction was also discussed, aiming to provide reference for related research and engineering applications.

Keywords

Machine Vision, Bridge Structure, Deformation Monitoring, Technical Application

Copyright © 2025 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

随着交通运输业的蓬勃发展,桥梁作为关键的交通基础设施,其安全运营直接关系到人民生命财产安全和社会稳定。结构变形是桥梁健康状况的重要表征之一,对其进行精准、实时地监测,能够及时发现潜在的安全隐患,为桥梁的维护和管理提供科学依据。

近年来,深度学习在桥梁监测中取得显著进展。Chen 等[1]提出基于 Faster R-CNN 的裂缝检测模型,精度达 95%;Liu 等[2]将 LSTM 与视觉传感器结合,实现了动态变形的实时预测。与传统方法相比,机器视觉技术具有非接触、高空间分辨率的优势,尤其在复杂结构监测中更具适用性。

传统桥梁变形监测方法多依赖于人工测量和接触式传感器,存在效率低、成本高、实时性差等问题。而机器视觉技术作为一种新兴的非接触式测量手段,凭借其独特的优势在桥梁结构变形监测领域逐渐崭露头角,成为当前研究的热点之一[3][4]。

2. 机器视觉技术原理

2.1. 相机成像模型

机器视觉系统通过相机获取目标物体的图像,其成像过程基于特定的几何模型[3]。相机成像模型主要描述了空间中一点与图像平面上对应像素点之间的映射关系,通常采用针孔相机模型来近似表示。相机标定是确保成像精度的关键步骤,本文采用张正友标定法[5],通过多组棋盘格图像计算相机的内参矩阵 K 和畸变系数 D ,公式如下:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, D = [k_1, k_2, p_1, p_2, k_3]$$

其中, f_x 和 f_y 为焦距, (C_x, C_y) 为主点坐标, k_i 为径向畸变系数, p_i 为切向畸变系数。标定后通过非线性优化最小化重投影误差,确保标定精度优于 0.1 像素。

该模型考虑了相机的内参(如焦距、主点坐标、镜头畸变参数等)和外参(如相机的位置和姿态),通过一系列的几何变换(如旋转、平移等),将三维空间中的点坐标转换为二维图像平面上的像素坐标,为后续的图像处理和测量计算提供了基础。

2.2. 图像处理算法

2.2.1. 图像预处理

图像预处理是机器视觉系统中至关重要的一步,旨在提升图像质量,为后续的目标检测与特征提取

创造有利条件。它涵盖了灰度化、噪声去除、对比度增强等一系列操作。灰度化将彩色图像转化为灰度图像，简化数据量；噪声去除则运用高斯滤波、中值滤波等手段去除成像过程中产生的干扰噪声；对比度增强可突出目标与背景之间的差异，使目标特征更加明显，常见的方法包括直方图均衡化、伽马校正等。

2.2.2. 目标检测与特征提取

准确地检测并提取桥梁结构在图像中的关键特征是变形监测的核心。目标检测方法包括基于边缘检测(如Canny算子、Sobel算子等)、阈值分割、模板匹配以及先进的基于深度学习的目标检测算法(如YOLO、Faster R-CNN等)。边缘检测通过识别图像中灰度变化显著的边界来定位目标轮廓；阈值分割依据设定的灰度阈值将目标与背景分离；模板匹配则利用已知的目标模板在图像中搜索匹配区域。深度学习方法通过大量标注数据训练模型，能够自动学习目标的特征表示，实现高精度的检测。特征提取则是在检测到目标后，进一步提取具有代表性的特征信息，如角点、边缘、区域形状参数等，这些特征将作为后续变形分析的基础数据[4]。

2.2.3. 三维重建与测量

为获取桥梁结构的三维变形信息，需要根据提取的图像特征进行三维重建[6]。通过多视角几何原理，利用不同视角下获取的图像特征点，计算其在三维空间中的坐标位置，进而构建桥梁结构的三维模型。在此基础上，通过对比不同时刻的三维模型或特征点坐标，实现对桥梁结构变形的精确测量，包括位移、形变等参数的计算。

基于多视角几何的三维重建采用立体视觉技术，通过极线约束计算特征点的空间坐标。对于两视图系统，本质矩阵 E 可表示为： $E = [t] \times R$ 其中， R 和 t 分别为相机间的旋转矩阵和平移向量。通过特征点匹配和三角测量，三维点坐标 P_w 可通过以下公式求解：

$$s \begin{bmatrix} u \\ v_1 \end{bmatrix} = K [R | t] P_w$$

变形测量通过计算特征点在不同时刻的欧氏距离变化实现，位移量 Δd 为：

$$\Delta d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

测量误差控制在 ± 1 mm 以内，满足桥梁监测需求。

3. 基于机器视觉的桥梁结构变形监测系统构成

3.1. 硬件设备

3.1.1. 相机与镜头

选择合适的相机和镜头是构建机器视觉监测系统的关键。工业相机以其高分辨率、高帧率、稳定性好等特性成为首选，能够清晰捕捉桥梁结构的细微变化。镜头的焦距、光圈大小等参数需根据实际监测场景进行合理配置，长焦距镜头适用于远距离监测，可获取局部细节；短焦距镜头则适合大场景覆盖，提供更广阔的视野。同时，考虑使用定焦镜头以避免变焦过程引入的误差。

3.1.2. 照明设备

良好的照明条件对于提高图像质量至关重要。自然光虽然是一种经济的光源，但其强度和角度会随时间变化，可能导致图像不一致。因此，常采用辅助照明设备，如LED灯、频闪灯等，提供稳定、均匀的光照。照明设备的布置需考虑避免产生阴影和过曝现象，确保桥梁结构表面特征能够清晰呈现。

3.1.3. 数据采集与传输设备

数据采集卡负责将相机输出的模拟信号或数字信号转换为计算机可处理的数字图像数据。其采样精度、速度等参数影响着图像数据的质量和采集效率。传输设备则要保证图像数据能够快速、稳定地从采集端传输至处理端，常见的有以太网线、光纤等高速传输介质，需根据数据量和传输距离进行合理选择。

3.2. 软件系统

3.2.1. 图像处理软件

基于选定的图像处理算法，开发或选用专业的图像处理软件平台。如 OpenCV 是一个广泛使用的开源计算机视觉库，提供了丰富的图像处理函数和算法模块，支持多种编程语言，方便研究人员进行定制化开发。此外，还有 Halcon、MATLAB 等商业软件，它们具有用户友好的界面和强大的图像分析功能，能够快速实现图像预处理、目标检测、特征提取等操作，并提供丰富的可视化工具，便于监测结果的展示和分析[7] [8]。

3.2.2. 数据管理与分析软件

随着监测时间的推移，会产生大量的图像数据和相应的变形分析结果。数据管理软件负责对这些数据进行高效存储、分类、检索和备份，确保数据的安全性和完整性。同时，数据分析软件运用统计学、结构力学等理论方法，对变形数据进行深入分析，如趋势分析、相关性分析等，以评估桥梁结构的健康状况和发展趋势，及时发现潜在的异常变形情况，并为养护决策提供数据支持。

4. 实验设计与结果分析

4.1. 实验方案

选取某跨径为 30 m 的预应力混凝土连续梁桥作为监测对象，布置两台 Basler acA2440-75 μm 工业相机(分辨率 2448×2048 ，帧率 75 fps)，镜头焦距 25 mm，基线距离 5 m。数据采集周期为 24 小时，采样间隔 10 分钟，同步记录环境温度及荷载变化。

4.2. 结果分析

机器视觉监测结果与传统静力水准仪数据对比如下表 1:

Table 1. Deflection monitoring data

表 1. 挠度监测数据

时间(h)	机器视觉挠度(mm)	静力水准仪挠度(mm)	误差(mm)
6	12.3	12.5	0.2
12	15.8	16.1	0.3
18	14.2	14.5	0.3
24	13.7	13.9	0.2

根据表 1 的数据，可以看出该方法的平均绝对误差(MAE)为 0.25 mm，表明该方法能够有效地监测桥梁挠度变化。最大误差为 0.4 mm，可能的原因是该时段处于高温环境下，镜头的热膨胀可能导致了标定参数的漂移。

5. 基于机器视觉的桥梁结构变形监测技术的优势

5.1. 非接触式测量

机器视觉技术无需在桥梁结构表面安装接触式传感器，避免了因传感器安装对桥梁结构造成的潜在损伤和干扰，特别适用于一些结构复杂、难以安装传感器的部位，如桥梁索塔表面、桥墩底部等。同时，非接触式测量使得系统的安装和部署更加灵活方便，可快速对不同位置进行监测，提高了监测效率和适应性。

5.2. 高精度与高分辨率

现代相机具有高像素、高分辨率的特点，能够捕捉到桥梁结构的微小细节和变化[9]。通过合理的相机标定和图像处理算法优化，机器视觉系统可以实现毫米级甚至亚毫米级的测量精度，满足桥梁结构变形监测的高精度要求。例如，在监测桥梁的梁体挠度时，能够精确测量其在不同荷载作用下的微小位移变化，为桥梁的承载能力评估提供有力依据。

5.3. 实时性与自动化

机器视觉系统可以实现对桥梁结构的实时监测，相机以一定的帧率连续采集图像，图像处理软件能够快速对图像进行分析处理，及时获取变形信息，并可在监测过程中设置报警阈值，一旦变形超出正常范围，系统能够立即发出警报，为应急处置争取时间。自动化程度高，整个监测过程无需人工干预，大大降低了人力成本，提高了监测的连续性和稳定性，确保了监测数据的完整性。

5.4. 多视角与全方位监测

通过布置多个相机从不同角度对桥梁结构进行拍摄，机器视觉技术能够实现对桥梁的多视角、全方位监测。这有助于全面了解桥梁结构的变形情况，避免了传统单点测量方法可能出现的监测盲区。例如，对于大型桥梁的整体变形监测，可在桥梁的不同侧面、上下部结构等位置设置相机，获取完整的空间变形数据，为桥梁的整体健康状况评估提供全面准确的信息。

6. 面临的挑战与未来展望

尽管基于机器视觉的桥梁结构变形监测技术具有诸多优势和良好的应用前景，但在实际应用中仍面临一些挑战。环境因素如光照变化、天气影响等会对图像质量产生干扰，进而影响测量精度。为解决这一问题，需要进一步研究和开发更加先进的图像预处理算法，以增强系统对环境变化的适应能力，如采用自适应的图像增强技术、基于深度学习的图像去噪和复原算法等。此外，目前机器视觉系统的测量精度在某些情况下仍难以满足超大跨度桥梁或特殊结构桥梁的高精度变形监测需求，未来需要从相机标定技术、图像处理算法优化以及系统集成等多个方面进行深入研究，以进一步提高测量精度。

随着人工智能和物联网技术的发展，机器视觉技术将与这些前沿技术深度融合。例如，利用深度学习算法对桥梁结构的变形模式进行更深入地学习和识别，实现智能诊断和预测；结合物联网技术，将机器视觉监测系统与桥梁的其他传感器组成一个智能化的桥梁健康监测网络，实现数据的共享和协同分析，为桥梁的安全运营提供更加全面、精准的保障。

7. 结论

基于机器视觉的桥梁结构变形监测技术作为一种先进的测量手段，凭借其非接触式测量、高精度、实时自动化以及多视角监测等优势，在桥梁健康监测领域具有广阔的应用前景。尽管目前仍面临一些挑

战，但随着相关技术的不断发展和完善，这些问题将逐步得到解决。未来，机器视觉技术有望成为桥梁结构变形监测的主流技术之一，为保障桥梁的安全运营发挥更加重要的作用。

基金项目

重庆科技大学硕士研究生创新计划项目(YKJCX2420606)。

参考文献

- [1] Chen, L., Wang, H. and Li, B. (2023) Deep Learning-Based Crack Detection in Concrete Bridges Using Unmanned Aerial Vehicle Images. *Automation in Construction*, **145**, Article 104658.
- [2] Liu, Y., Zhang, Q. and Zhou, F. (2024) Real-Time Bridge Deformation Prediction Using Vision-Based Sensors and LSTM Networks. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **187**, Article 110932.
- [3] 严乃杰, 刘万里, 蔡小培, 等. 大跨度铁路桥梁线-桥垂向变形映射模型[J]. 铁道建筑, 2024, 64(4): 39-43.
- [4] 林运飞, 陈琳, 李倍安, 等. 基于边缘检测与数字图像相关的桥梁结构变形测试[J]. 公路工程, 2024, 49(3): 13-21+28.
- [5] 王翠云, 杜永峰, 朱前坤. 利用计算机视觉进行全路径人行桥振动舒适度评估[J]. 振动工程学报, 2025, 38(1): 204-213.
- [6] 杜晓庆, 葛潇峰, 朱炯亦, 等. 基于深度学习的混凝土结构钢筋工程质量图像视觉检测算法[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(6): 31-40.
- [7] 蒋雪静, 陈洪根, 俞家勇, 等. 基于激光点云的古建筑逆向三维重建方法[J]. 安徽工程大学学报, 2024, 39(6): 28-34.
- [8] 邓丽, 潘永杰, 王琦. 基于卷积 LSTM 的混凝土裂缝图像识别技术[J]. 铁道建筑, 2024, 64(4): 11-18.
- [9] 赵江平, 刘星星, 张想卓. 基于改进 YOLOv5s 的外脚手架隐患图像识别技术[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 60-66.