面向预防性保护的文物本体智能原位监测系统

冯伟^{1,2}, 张乾^{1,2*}, 田飞鹏^{1,2}, 王小伟³, 柴勃隆³, 孙济洲^{1,2}, 苏伯民³

1. 天津大学智能与计算学部, 天津 300350

2. 文物本体表面监测与分析研究国家文物局重点科研基地, 天津 300350

3. 敦煌研究院, 敦煌 736200

* 通信作者. E-mail: qianz@tju.edu.cn

收稿日期: 2021-02-10; 修回日期: 2021-05-15; 接受日期: 2021-06-29; 网络出版日期: 2021-12-17

“十三五”国家重点研发计划项目 (批准号: 2019YFC1520903) 和国家自然科学基金项目 (批准号: 62072334) 资助

摘要 预防性保护是国际广泛认可并努力持续追求的先进保护理念, 代表了文物保护的发展方向. 预防性保护通过精细监测病征, 识别病因, 精准控制相关致病因素, 从而达到有效抑制文物本体劣化的目的. 整个过程, 监测是起点和根本. 目前, 国内外对环境风险源感知已有很多技术和数据的积累. 然而, 由于文物本体劣化具有发展缓慢、变化细微、赋存环境多样等特点, 目前国内外尚缺乏面向真实赋存环境下文物本体细微变化的快速、精准、可靠的监测方法, 严重阻碍了文物预防性保护的发展和推广. 本文聚焦该问题, 首次提出了基于相机位姿主动式重现的原位监测思路, 并在此基础上设计研发了功能完善、适用面广的文物本体智能原位监测系统. 通过物理真实地重现相机六自由度位姿, 实现了基于图像导引的文物本体真实细微变化的准确检测. 目前该系统已成功在敦煌莫高窟、故宫、颐和园等 10 多个文化遗产地的多种保护业务中推广应用.

关键词 预防性保护, 成像条件原位重现, 相机重定位, 细微变化检测, 主动视觉, 原位监测

1 引言

“预防性保护”^[1] 的概念最早是在 1930 年意大利罗马召开的关于艺术品保护国际研讨会上被提出. 从 20 世纪 70 年代开始, 国际文化遗产保护与修复研究中心 (ICCROM) 开始积极探索预防性保护理念并在国际范围内大力推广. 到了 20 世纪 90 年代, 这一理念逐渐成熟, 并有了相对统一的阐述. 预防性保护的基本内涵如图 1 所示, 其基础在于获取文物本体病害演变数据 (即病征, 如起甲、裂隙等) 与文物赋存环境风险源数据 (即病因, 如温湿度、空气成分、人流量等), 其核心在于构建文化遗产本体病害演变与环境风险源之间的关联模型 (即文物本体致病机理). 在此之后便可通过定位并控制相关风险源, 最终达到减缓或抑制文物本体劣化的目的. 目前, 预防性保护已经成为国际广泛认可并

引用格式: 冯伟, 张乾, 田飞鹏, 等. 面向预防性保护的文物本体智能原位监测系统. 中国科学: 信息科学, 2021, 51: 2102–2118, doi: 10.1360/SSI-2021-0052
Feng W, Zhang Q, Tian F-P, et al. An intelligent in-situ visual inspection system for preventive conservation of cultural heritages (in Chinese). Sci Sin Inform, 2021, 51: 2102–2118, doi: 10.1360/SSI-2021-0052

图 1 (网络版彩图) 预防性保护基本内涵

Figure 1 (Color online) The basic concept of preventive conservation

努力追求实现的先进保护理念, 代表了未来文物保护的发展方向. 这一理念的提出使文物保护由“抢救性”向“预防性”转变, 从以往对文物的被动修复变为主动预防, 大大降低了文物受时间、环境、不可抗力等因素影响产生劣化的可能性, 最大限度地提高了文物的保存寿命.

作为预防性保护工作的基础, 获取准确可靠的文物本体病害演变与文物赋存环境风险源数据至关重要. 目前, 依靠各类环境传感器技术的不断发展, 国内外对环境风险源信息的感知技术已相对成熟^[2], 例如作为世界文化遗产地的代表, 敦煌莫高窟目前已搭建了较为完善的石窟环境风险监测平台, 积累了三十多年的环境监测数据^[3]. 文物本体劣化监测方面, 现有方法主要分为 3 类: 第 1 类是人工测量方法. 例如利用钢尺或者游标卡尺直接测量建筑裂隙变化, 或根据文物拍摄图像进行人工比对或标注等. 此类方法通常精度较低, 同时主观性较强, 很难给出准确的量化结果. 第 2 类是基于各类型传感器的传统工程测量方法. 例如用测斜仪和张力测量仪监测建筑倾斜及变形^[4], 用测缝计监测壁画或石刻表面裂隙^[5], 利用光谱仪测量文物表面风化演变^[6]等. 此类监测方法可分为定点监测和定期监测两种. 定点监测需将传感器固定在文物表面或附近进行长期实时监控. 定期监测以一定周期对文物病害演变进行测量, 需要对传感器空间位置进行记录, 并在下次监测时人工恢复. 然而, 由于文物本体劣化通常十分微小, 轻微的传感器空间姿态差异也可能造成不一致的观测数据, 导致不可靠的文物本体劣化监测结果. 不幸的是, 由于文物真实赋存环境通常较为复杂, 定点监测通常难以保证较为固定的传感器空间位姿, 此外定期监测需要通过人工方式恢复传感器空间姿态, 其精度也难以保证. 第 3 类是基于数字摄影测量方法. 如利用三维激光扫描方法对文物进行定期的三维精密重建, 对前后两次采集的三维模型进行配准, 并通过比对的方式检测文物表面的细微变化. 目前已在古建筑、土遗址、化石遗产等多种文物上开展了应用实践^[7]. 然而, 此方法虽然能取得较高的监测精度, 例如目前商用激光扫描仪分辨率普遍可达亚毫米级, 但其监测成本较高, 例如利用美国 FARO 公司 Design ScanArm 激光扫描仪扫描一件 1 m 左右的文物通常需要 3 h^[8], 并不适合大体量的文物监测任务. 综上, 正是由于文物本体劣化具有发展缓慢、变化微小、赋存环境多样、机理复杂等特点, 目前国际上尚缺乏针对真实赋存环境下文物本体细微变化的快速、精准、可靠的监测和度量技术, 这已成为制约文物预防性保护发展的核心瓶颈问题.

为了解决文物本体劣化监测这一瓶颈问题, 我们首次提出了基于主动成像条件真实重现的原位监测思路, 并在此基础上设计研发了功能完善、易操作、可适用于多种真实赋存环境的文物本体智能原位监测系统. 通过精确地将当前相机恢复到上次采集时相同的空间位姿, 实现了基于图像引导的文物本体真实细微变化的精确检测, 使精细化保护、数据驱动的危害机理研究成为可能. 一方面, 与传统工程测量方法相比, 该系统实现了相机空间位姿的精确重现, 使得微变检测结果具有真实性、可靠性. 另一方面, 与现有三维激光扫描方法相比, 该系统不仅可达到亚毫米级细微变化检测精度, 同时具有监测速度快、操作简单的特点, 单次监测仅需 5 min. 虽然现阶段我们主要以高清 RGB 相机进行文物本体数据采集, 但理论上该系统可同时搭载多类型传感器, 并实现对其空间位姿的精确恢复, 进而用于特定需求的监测任务. 目前该系统已成功在敦煌莫高窟、故宫、颐和园等 10 多个遗产地或博物馆面向文物本体劣化监测、文物修复评估等多种业务开展了推广应用.

2 文物本体原位监测智能系统

2.1 系统框架

本文提出的文物本体原位智能监测系统整体框架如图 2 所示, 主要由轻型微动云台、云台智能控制系统、智能原位监测软件系统 3 个部分组成. 轻型微动云台用于对所搭载的高清 RGB 相机、低频闪光源进行六自由度空间姿态的调整; 云台智能控制系统通过集成于微型计算机的云台控制软件系统为云台驱动器和光源驱动器发送指令, 进而对微动云台运动和光源亮度进行控制; 智能原位监测软件系统为工作人员提供交互操作, 主要包括两级相机重定位模块、微小变化检测模块、多模态数据管理模块、GUI、硬件设备控制、原位监测流程控制等, 并通过无线通信将云台及光源控制指令发送给云台智能控制系统. 另外原位监测软件系统通过无线显示的方式提供给工作人员进行操作. 云台智能控制系统整体集成于一个小型云台控制器, 智能原位监测软件系统集成于一台轻型计算平台. 六自由度微动云台、云台控制器、轻型计算平台共同搭载于一个刚性三脚架上, 作为一个整体结构便于移动.

由于文化遗产赋存环境具有复杂多样的特点, 因此本文所提出的文物本体原位监测智能系统在设计上遵循着轻量化、易拆装的原则, 以保证在真实监测环境下系统的可用性. 首先, 文物本体原位监测智能系统整体重量约 25 kg, 监测过程中占地范围不足 1 m², 因此具有较高的环境适应性. 其次, 如图 2 所示, 该原位监测智能系统硬件部分呈模块化设计, 六自由度微动云台、云台控制器、轻型计算平台、低频闪光源、高清 RGB 相机、三脚架各部分均可自由拆装、收纳, 便于运输以及实际监测时的频繁转场. 此外, 本系统采用无线通信方式进行信号传输, 并利用无线显示为工作人员提供交互操作, 也保证了系统使用过程中的便捷性, 大大减少了监测过程中潜在的文物安全风险.

2.2 轻型微动云台

轻型微动云台用于实现对所搭载相机空间六自由度位姿的调整. 然而, 目前工业制造领域常用的微动云台通常体型较大, 不适合文物本体监测对设备轻便性的要求. 此外, 小型化的微动云台目前主要用于精密仪器加工等方面, 其精度较高, 但通常价格极为昂贵、行程较小, 并且维护成本高, 不适合复杂的户外文物赋存环境. 综上, 从价格、便捷性、适用性等多方面考量, 目前尚无合适的可直接用于多种真实赋存环境下文物本体劣化监测的微动云台. 因此, 我们自主设计并研发了一套专用于文物本体劣化监测的轻型微动云台, 综合考虑了云台运动精度、重量、载重、行程等方面, 在满足实际文物本体劣化监测需求条件下, 尽可能保证其便携性与易拆装性, 可适用于多种真实文物赋存环境.

图 2 (网络版彩图) 文物本体原位智能监测系统框架

Figure 2 (Color online) The framework of the proposed intelligent in-situ visual inspection system

众所周知, 追求较高的云台运动精度必然导致其成本的增加, 同时精密的云台设计使其难以维护, 无法适合复杂监测环境. 此外, 追求较大的云台行程及载重能力也会使云台重量增加, 降低便携性. 因此, 我们针对文物本体劣化监测任务, 对云台性能的需求进行了评估, 并以此为依据设计轻型微动云台, 使其同时兼顾了实际监测需求及设备便携性. 根据前文可知, 我们的相机重定位分为两个阶段: 相机初定位与相机精确重定位. 初定位阶段通过实时提供导航信息辅助工作人员快速将监测系统移动到目标附近位置. 精确重定位阶段通过算法自动估计相机姿态差异并通过微动云台进行调整, 最终完成自动的相机位姿恢复. 因此微动云台主要为相机精确重定位过程服务. 首先, 常用的高清 RGB 相机重量 (含镜头) 大约在 3 kg 左右 (我们采用佳能 5DmarkIII 相机获取数据), 考虑搭载光源或其他传感器, 总重量一般不超过 5 kg. 其次, 在实践过程中我们发现大部分类型文物本体病害的最佳观测距离在 0.2~1 m 区间. 经实验验证, 在上述监测距离下, 初步重定位完成后基本可保证当前相机姿态与目标姿态的 3 个旋转自由度差异在 5° 范围内, 3 个位移自由度差异约在 30 mm 范围内. 再次, 在上述监测距离下 (使用佳能 5DmarkIII 相机), 我们发现当旋转自由度角度差异小于 0.005° 或位移自由度差异小于 0.05 mm 时, 从图像中便难以发现像素级差异. 因此, 我们根据上述实际情况进行电机选型、云台结构设计等, 最终完成轻型微动云台的研发, 保证在满足监测精度需求情况下, 尽可能做到价格低廉、使用轻便.

目前机器人结构设计主要有串联及并联两种. 并联结构主要应用于具有速度快、动态性需求的任务中. 在同等体积下, 并联结构行程通常要小于串联结构. 此外, 并联结构相对更复杂, 维护成本更高. 由于文物本体监测任务对云台运动速度无特别需求, 但对云台轻便性及易维护性要求较高, 以支持在多样的复杂环境下工作, 因此我们采取串联结构来设计轻型微动云台. 我们采用船舶运动体系^[9]中的定义表示 3 个旋转自由度, 即俯仰角 (pitch, 上下转)、航向角 (yaw, 左右转)、翻滚角 (roll, 左右摆). 所研发的轻型微动云台可满足 pitch, roll 两个自由度 $\pm 20^\circ$ 的运动范围, 满足 yaw 自由度 $\pm 60^\circ$ 的运动范

围, 其前后运动、左右运动、上下运动位移范围分别为 150, 90, 300 mm; 轻型微动云台总重量约 10 kg; 云台位移运动精度达到 0.005 mm, 旋转运动精度在 0.001° 左右. 为了便于拆装收纳, 我们对轻型微动云台进行了模块化设计. 如图 2 所示, 包括控制 roll 和 pitch 运动的水平台模块, 控制左右移动、前后移动、yaw 运动的平移旋转台模块. 我们并没有单独设计上下运动的机械结构, 而是直接对三脚架进行改装, 将手动控制上下运动改为电机驱动. 3 个位移运动控制通过驱动步进电机带动高精丝杠螺母旋转来完成. 此外, 我们将前后运动、左右运动两个结构进行整合, 保证其运动在同一个水平面上, 进一步减少设备整体重量和体积. yaw 轴运动同样采用步进电机驱动, 其硬件部分固定于平移旋转台模块下部. 我们通过驱动器控制无刷电机带动丝杠螺母来实现对水平台模块上方平台的 roll 和 pitch 这两个自由度的控制.

2.3 云台智能控制系统

从上文可知, 本文设计的轻型微动云台 pitch 和 roll 自由度由无刷电机控制, 其他自由度均由步进电机控制. 目前运动系统驱动方式主要分为开环控制和闭环控制两种. 开环控制是最简单的一种控制方式, 是指受控客体不对控制主体产生反作用的控制过程, 即不存在反馈回路的控制. 闭环控制系统的特点是系统被控对象的输出 (被控制量) 会反送回来影响控制器的输出, 形成一或多个闭环. 步进电机控制可以当作是开环控制. 由于云台行程有限, 我们利用霍尔元件 (Hall component) 辅助判别步进电机运动是否达到限位. 对水平台的两个自由度 (roll 与 pitch) 的控制属于闭环控制, 主要通过多轴无刷云台控制器、惯性测量单元 (IMU) 获取当前旋转角度以及定制的比例 - 积分 - 微分 (proportional-integral-derivative, PID) 控制算法实现. 此外, 在云台智能控制系统中我们也集成了对光源的主动控制功能. 我们使用的 LED 光源有不同的亮度档位, 通过自制的光源驱动器发送电信号实现对光源不同亮度档位的调节. 下面分别对轻型微动云台的两个主要组成部分, 即平移旋转台和水平台的控制方案进行说明.

2.3.1 平移旋转台控制方案

平移旋转台由步进电机驱动. 我们选用具有较大运行力矩的 1:75 减速步进电机用于调整整个监测设备的上下运动. 由于云台前后运动、左右运动及 yaw 轴运动基本在水平面上运动, 无需过大的运行力矩进行驱动, 因此我们选用体积重量均较小的步进角为 1.8° 的 42 步进电机进行控制. 步进电机须通过专用驱动器将脉冲信号转化为步进电机可用的具体脉冲形式. 我们选择 DRV8825 步进电机驱动板作为电机控制器, 此驱动板在诸多领域 (如 3D 打印机等) 被广泛使用. 另外它的体积相对较小, 可以大大减少云台控制器整体体积. 我们在驱动器使用时采用 1/8 的电机细分方式. 步进电机的细分技术本质为一种电子阻尼技术, 可减弱或消除步进电机的低频振动并提高电机的运转精度. 经过实验测试我们选取上述细分方式可达到最佳的电机运动效果.

因步进电机自身结构特点, 当其在以较高速度直接启动时会出现丢步情况, 同时会出现“啸叫”现象, 这些都会对步进电机的性能及精度造成较大影响, 所以需要提供一个加减速的步进电机控制策略. 我们的电机速度控制方案如下: 给定移动距离, 可以计算得到所需脉冲总数, 根据脉冲总数将电机运动分为加速、匀速、减速 3 个阶段. 加速阶段逐步增加脉冲频率实现速度的提升, 在达到相应脉冲运动量后固定脉冲频率实现其高速运行 (匀速), 当脉冲总量进入减速阶段时则通过逐步减少脉冲频率实现电机减速. 由于云台行程有限, 且步进电机在运动过程中无法感知自身位置, 因此我们使用霍尔元件来辅助步进电机判断是否达到运动限位. 我们在云台上下、前后、左右 3 个自由度运动边界处安装霍尔元件, 在云台控制软件系统中实时监控霍尔元件信号, 当其变为高电位时则认为电机运动达到限位,

运动停止并反馈警示信息.

2.3.2 水平台控制方案

水平台负责 pitch 和 roll 两个自由度的运动. 我们选用无刷电机并使用 PID 控制算法来实现闭环控制. 相较于步进电机, 无刷电机的控制原理相对更复杂, 同时也需要专门的驱动器来将控制信息转化成具体的控制电流指令. 无刷电机驱动器有诸多种类, 我们采用 AlexMos SimpleBGC 8bit 作为控制器进行驱动. 由于无刷电机无法实现按一定角度旋转, 仅能控制其开始运动或停止, 我们通过惯性测量单元 (IMU) 并利用闭环控制方式实现对无刷电机旋转控制. 我们选用 MPU6050 陀螺仪作为惯性测量单元, 它包含一个三轴加速计并搭载了数位运动处理模块 (DMP), 可直接计算具体的位姿数据. 我们利用如图 2 中的微型计算机 (树莓派) 直接获取陀螺仪数值, 并作为 PID 算法的输入用于计算无刷电机当前所需的运动指令. PID 控制算法是在工业控制以及许多其他需要连续调节控制的系统中广泛使用的一种控制反馈算法. PID 控制算法持续地计算期望值 SP 与测量值 PV 之间的误差 $e(t) = SP - PV$, 并且基于比例 - 微分 - 积分项来进行调整以逐步减少此误差, 最终使得测量值达到期望值或保持在期望值. t 时刻 PID 调整量 $u(t)$ 可用下式表示:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \sum_{n=0}^t e(n) + K_d (e(t) - e(t-1)), \quad (1)$$

其中, K_p , K_i 和 K_d 分别为比例、积分、微分参数. 在水平台运动过程中, 陀螺仪读数可看作测量值, 给定的云台运动量与陀螺仪读数之和即为运动期望值, 因此我们可根据式 (1) 方便地对无刷电机进行运动控制, 实现 pitch 和 roll 两个自由度的运动. 我们分别设置 K_p , K_i 和 K_d 为 10, 0.01 和 15.

2.4 智能原位监测软件系统

如图 2 所示, 智能原位监测软件系统主要包括两级相机重定位模块、微小变化检测模块, 以及多模态数据管理模块. 其余模块包括 GUI 层、硬件设备控制模块、原位监测流程控制模块、通信模块、数据库等. 系统通过无线通信将云台及光源控制指令发送给云台智能控制系统, 同时利用无线显示方式为工作人员提供 UI 交互, 图 3 展示了该系统的 UI. 两级相机重定位模块、微小变化检测模块和多模态数据管理模块分别对应于数据的主动式采集、数据处理与分析、数据管理 3 个方面. 给定某监测区域的历史观测图像, 两级相机重定位模块通过调整轻型微动云台精确地将相机恢复至历史观测时同样的相机位姿. 在获取当前观测图像后, 微小变化检测模块以历史观测图像数据和当前观测图像数据作为输入, 自动检测出场景中本体细微变化. 多模态数据管理模块负责文物本体监测过程中所有相关数据的存储与管理. 硬件设备控制模块包括相机控制、光源控制、微动云台运动控制等. 原位监测流程控制模块主要用于实现文物本体原位监测所有操作的流程控制, 包括监测信息载入、相机内参及光源参数恢复、相机精确重定位、微小变化检测、图像采集、信息录入等操作. 此外, 我们在对智能原位监测软件系统设计时充分考虑了其可扩展性, 按照系统设计规范完成相关配置即可使该软件系统适用于新的相机、光源、云台等硬件设备. 我们首先对两级相机重定位模块、微小变化检测模块和多模态数据管理模块的设计与实现思路进行介绍, 最后给出软件系统的整体操作规程.

2.4.1 两级相机重定位模块

与已被广泛研究的传统目标监测问题不同, 文物本体病害的劣化过程通常十分缓慢, 其表面和结构变化往往也非常细微, 因此使得文物本体变化相对两次观测时相机成像条件的差异不具有显著性. 即使前后两次观测时存在很小的相机位姿差异, 也会严重影响前后两次获取的图像数据对文物本体信

图 3 (网络版彩图) 智能原位监测软件系统

Figure 3 (Color online) The proposed intelligent in-situ visual inspection software system

息表达的一致性, 对精细的文物本体微变监测带来困难和挑战. 因此, 获取具有高度一致成像条件的图像数据可极大增强文物本体细微变化感知的准确性与可靠性. 以此为出发点, 我们在数据获取阶段采用主动成像条件原位重现思路, 以历史观测图像作为参照, 利用主动相机重定位方法驱动微动云台将当前相机位姿恢复到上次采集时同样的空间姿态, 进而获取具有高度空间一致性的“高质量”多次观测图像数据, 便于后续的文物本体微变检测与度量.

在实际应用中, 考虑到微动云台行程有限, 因此相机重定位过程不能仅依赖于微动云台对相机的调整. 我们采用两级相机重定位策略. 如图 4 所示, 第 1 级为导向式相机初步重定位, 第 2 级为主动式相机精确重定位. 给定历史观测图像 I^{ref} , 第 1 级导向式相机初步重定位根据 I^{ref} 以及当前时刻相机实时拍摄图像获取实时的六自由度相机调整导航指令, 工作人员根据此信息移动硬件设备将相机快速恢复至目标附近位置. 当微动云台行程满足相机精确重定位需求时, 进入第 2 级主动式相机精确重定位阶段, 通过自动地估计两次观测相机相对位姿同时采用折半调整策略实现相机位姿的自动精确重现.

导向式相机初步重定位. 导向式相机初步重定位阶段的主要任务是指导工作人员将相机快速恢复至目标附近位置, 因此提供实时的相机调整导航反馈十分重要. 我们采取一种简单的基于单应矩阵的相机六自由度运动方向估计方法. 简单来说, 给定历史参考监测图像 I^{ref} 和当前时刻相机拍摄图像, 我们对图像进行特征提取及匹配, 进而根据直接线性变化算法 (DLT)^[10] 计算出表示两幅图像间像素坐标映射关系的单应矩阵 H . 单应矩阵 H 反映了两次观测时相机的相对姿态, 因此根据 H 可产生如图 3 中所示的红色导航框 $\mathcal{R}^r$ 和蓝色指示框 $\mathcal{R}^b$, 具体计算过程可参考我们已发表的论文^[11]. 其中蓝色指示框和红色导航框间的形状差异表示了参考相机和当前相机空间姿态差异. 因此, 我们根据相机投影关系可通过 $\mathcal{R}^r$ 和 $\mathcal{R}^b$ 间的形状差异确定当前相机六自由度的调整方向:

(1) 当红色导航框上边长大于其下边长时, 相机的俯仰角 (pitch) 应该下偏, 即相机向下旋转. 反之, 相机应该向上旋转.

(2) 当红色导航框的左边长大于右边长时, 相机的航向角 (yaw) 应该向右偏移, 即向右旋转. 反之, 相机应该向左旋转.

(3) 当红色导航框左右边界中点连线的左侧比右侧高时, 相机的翻滚角 (roll) 应该左偏, 即相机以

图 4 (网络版彩图) 两级相机重定位流程

Figure 4 (Color online) The working flow of the two-stage camera relocalization algorithm

中心朝向为轴进行逆时针旋转. 反之, 相机应该以中心朝向为轴进行顺时针旋转.

(4) 当红色导航框中心 (左右边界中点连线与上下边界中点连线的交点) 在蓝色指示框中心的右侧时, 相机应该向左平移. 反之, 相机应该向右平移.

(5) 当红色导航框中心在蓝色指示框中心的下侧时, 相机应该向上平移. 反之, 相机应该向下平移.

(6) 当红色导航框面积大于蓝色指示框面积时, 相机应向前平移. 反之, 相机向后平移.

工作人员结合以上量化的相机运动指示以及导航框的可视化关系来动态调整相机位姿. 红色导航框与蓝色指示框距离越近则表示当前相机与参考相机之间的位姿越接近. 初步重定位的目标是使得红蓝两个导航框接近重合, 即实现了当前相机与参考相机位姿基本一致. 由于单应矩阵的求解计算复杂度很低, 红蓝导航框能以接近实时的效率实现相机导航的反馈调整, 因此初步重定位能够快速地在短时间内完成, 实际操作中仅需要 1 min 即可完成初步定位. 虽然单应矩阵变换仅能表示相机在纯平面场景下的相机运动或者相机的纯旋转运动, 但实际应用中计算得到的单应矩阵映射可近似表示相机三维运动关系. 随着当前相机逐步逼近目标位姿, 相机间的姿态差异逐步变小, 使得单应矩阵对三维场景图像的坐标转换误差越来越小, 从而保证了基于单应矩阵的相机初定位方法的可靠性与合理性.

相机精确重定位模块. 给定历史观测图像 I^{ref} , 第 2 级相机精确重定位通过主动地调整微动云台将当前相机精确地恢复到历史观测时相机空间位姿. 在相机精确重定位问题中, 一方面, 手眼相对位姿未知 (即使通过标定算法估计也仍然存在误差), 另一方面, 基于图像的位姿估计方法通常无法得到位移分量的尺度^[12], 导致我们无法通过一次云台运动使当前相机恢复到参考相机位姿, 因此需采取渐进式的多次调整方案:

$$\begin{aligned} \hat{M}_B^i &= \arg \min_{M \in \text{SE}(3)} \|XMX^{-1}P_A^i - I\|_F^2, \\ M_B^* &= \prod_{i=n}^0 \hat{M}_B^i = \hat{M}_B^n \hat{M}_B^{n-1} \cdots \hat{M}_B^i \cdots \hat{M}_B^1 \hat{M}_B^0, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 I 为单位矩阵, P_A^i 和 $\hat{M}_B^i$ 分别表示第 i 次云台调整时当前与参考相机相对位姿以及云台物理真实调整量. 式 (2) 表示云台经过多次调整后累计达到目标运动量 M_B^* . 为解决上文提到的手眼相对位姿未知以及位移分量尺度未知的问题, 我们采用一种忽略手眼差异的折半调整策略. 令 $\hat{M}_B^i \simeq \langle \hat{R}_B^i, \hat{t}_B^i \rangle$, $X \simeq \langle R_X, t_X \rangle$, 在第 i 次相机调整时, 微动云台的旋转及平移调整量分别为 $\hat{R}_B^i = (R_A^i)^{-1}$ 和 $\hat{t}_B^i = -(R_A^i)^{-1} \hat{t}_A^i = s_i \bar{t}_A^i$, 其中 s_i 为平移调整步长量. 在多次相机位姿调整后, 当 s_i 小于一定阈值

时, 认为相机精确重定位结束, 相机拍摄图像得到当前最终观测图像数据 $\mathbf{I}^{\text{cur}}$. 关于云台旋转及平移量的具体推导过程以及对手眼相对位姿鲁棒性的证明可参考我们已发表的论文^[13,14]. 正是由于该算法可从理论上证明在手眼标定未知的条件下, 相机仍能快速收敛至目标状态, 我们的原位监测智能系统可在不损失精度的前提下在工作现场反复拆装, 极大地保证了对真实赋存环境的适应性. 为了进一步提高重定位速度, 我们也研究了基于深度传感器辅助的相机重定位方法^[15]. 此外, 我们也尝试将相机初定位算法进行加速优化并移植于移动设备端, 可用于普查性质的文物本体监测任务^[16]. 除相机成像条件重现外, 我们同时也在光照条件重现方面进行了相关探索^[17]. 未来我们会对上述技术优化完善并与现有监测系统集成, 进一步提高对文物本体劣化的监测能力.

2.4.2 微小变化检测模块

当相机精确重定位完成后, 最终获取的当前图像与参考图像在内容上保持高度对齐, 之后即可执行微小变化检测实现对文物本体细微劣化的精确检测. 首先, 文物本体的细微变化极易淹没于两次观测间光照成像条件的差异中, 而光照成像条件差异在实际应用中十分普遍, 尤其在户外环境光照不可控的情况下^[18~20]. 其次, 微动云台运动误差无法避免, 因此在实际应用中很难保证两次采集的图像数据在空间上实现无误差的像素级图像对齐. 此外, 对于面向历史观测图像的离线细微变化检测任务, 相机和光照成像条件的差异同样客观存在. 因此, 为使本文所提系统能有效应对不同情况下的文物本体细微变化检测任务, 我们需要考虑同时存在相机位姿及光照条件差异情况下的微小变化检测问题. 由于场景中某些细微变化可能仅在特定的光照条件下才能更清晰地呈现在图像中呈现, 因此我们考虑多光照情况下的历史观测数据 $\mathbf{I}^{\text{ref}} = \{\mathbf{I}_1^{\text{ref}}, \dots, \mathbf{I}_K^{\text{ref}}\}$ 和当前观测数据 $\mathbf{I}^{\text{cur}} = \{\mathbf{I}_1^{\text{cur}}, \dots, \mathbf{I}_K^{\text{cur}}\}$. 多光图像数据可通过人工从不同方向打光轻松获取. 我们将微小变化检测问题定义为一个相机位姿差异、光照条件差异和场景真实变化的联合求解问题:

$$\begin{aligned} \{\hat{\mathbf{F}}, \hat{\mathcal{L}}, \hat{\mathcal{C}}\} &= \arg \min_{\mathbf{F}, \mathcal{L}, \mathcal{C}} \text{FGCD}(\mathbf{F}, \mathcal{L}, \mathcal{C} | \mathbf{I}^{\text{ref}}, \mathbf{I}^{\text{cur}}) \\ &= \arg \min_{\mathbf{F}, \mathcal{L}, \mathcal{C}} \sum_k E_{\text{data}}(\mathbf{F}, \mathbf{L}_k, \mathbf{C}_k | \mathbf{I}_k^{\text{ref}}, \mathbf{I}_k^{\text{cur}}, \mathbf{D}_k^{\text{ref}}, \mathbf{D}_k^{\text{cur}}) \\ &\quad + \lambda_1 E_{\text{reg}}^{\text{F}}(\mathbf{F}) + \lambda_2 \sum_k E_{\text{reg}}^{\text{L}}(\mathbf{L}_k) + \lambda_3 \sum_k E_{\text{reg}}^{\text{C}}(\mathbf{C}_k), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\hat{\mathcal{C}} = \text{fusion}(\hat{\mathcal{C}}), \quad (4)$$

其中 $\mathcal{L} = \{\mathbf{L}_1, \dots, \mathbf{L}_K\}$, $\mathcal{C} = \{\mathbf{C}_1, \dots, \mathbf{C}_K\}$, $\mathcal{C} = \{\mathbf{C}_1, \dots, \mathbf{C}_K\}$. $\mathbf{D}_k$ 表示第 k 幅图像对应的二维特征图, $\mathbf{F}$ 表示两次观测图像间的光流图, $\mathbf{L}_k$ 和 $\mathbf{C}_k$ 分别表示第 k 对图像对应的光照差异图以及变化检测结果. $\text{fusion}(\cdot)$ 表示对不同图像对得到的所有变化检测结果进行融合得到最终结果 $\hat{\mathcal{C}}$. $\hat{\mathcal{C}}$ 是一个二值图, 值为 1 表示该像素对应区域发生了本体变化. 由于式 (4) 为一个高阶多标签优化问题, 直接求解该目标函数通常十分低效, 因此提出一种两级多尺度优化策略有效解决该问题, 通过对 $\hat{\mathbf{F}}, \hat{\mathcal{L}}, \hat{\mathcal{C}}$ 3 个子问题的迭代求解最终得到场景真实变化检测结果 $\hat{\mathcal{C}}$. 关于此多尺度优化策略的详细内容以及 3 个子问题的具体形式可参考我们已发表的论文^[11].

2.4.3 多模态数据管理模块

多模态监测数据管理包含了监测信息描述、病害类型、相机参数、光照参数、监测记录信息等方面. 由于不同类型文物或遗产地其数据记录与组织方式通常不同, 例如石窟寺壁画监测通常以“某某窟 – 某某监测点”方式记录监测区域, 户外石刻文物监测可能采用“某某崖 – 某某壁 – 某某监测点”

图 5 (网络版彩图) 多模态数据管理: 以敦煌莫高窟壁画监测为例

Figure 5 (Color online) Multi-modality data management module: take the monitoring of Dunhuang Mogao Grottoes murals as an example

的管理方式, 因此, 同一套数据管理结构无法适用于所有监测需求. 我们采用基于配置文件的数据自适应管理方案解决上述问题. 首先, 与监测遗产地或博物馆沟通确定文物本体监测数据记录内容与组织方式, 并根据此需求生成专用数据管理配置文件. 智能原位监测软件系统无需重新编译或安装, 通过直接导入专用数据管理配置文件即可改变相应的 UI 内容以及数据记录方式, 方便针对不同文物类型或不同监测需求的实地使用. 图 5 展示了该系统在敦煌莫高窟壁画监测过程中的数据记录与管理相关内容.

2.4.4 软件系统操作规程

智能原位监测软件系统操作流程可分为两部分内容: 对于某文物区域的首次观测以及在已观测数据基础上执行本体原位监测. 当对某监测区域首次采集时, 系统进入新建监测点流程, 具体过程如下:

- (1) 系统初始化, 包括遗产地数据管理配置文件载入、硬件设备连接等;
- (2) 进入新建监测点流程, 调整相机位姿和参数, 调整光照参数, 达到最佳成像效果;
- (3) 根据提示录入基本信息, 如洞窟号、监测点号、监测点描述、病害类型等;
- (4) 根据提示拍摄图像数据, 如不同侧光方向图像、比例尺图像等;
- (5) 数据入库, 新建监测点完成.

对于已建立的监测点进行文物本体细微变化原位监测的具体流程如下:

- (1) 系统初始化, 包括遗产地数据管理配置文件载入、硬件设备连接等;
- (2) 进入两级相机重定位流程, 根据提示选择目标监测点, 并从数据库中导出相关信息;
- (3) 工作人员根据监测点描述信息确定监测目标的位置, 并将监测系统放到该位置附近;
- (4) 执行两级相机重定位算法, 将当前相机精确恢复到目标位姿;
- (5) 系统提示相机重定位完成后, 根据需求拍摄图像数据, 如不同侧光方向图像、比例尺图像等;
- (6) 进入微变检测阶段, 工作人员选择任意两次观测数据, 系统自动检测并统计场景细微变化, 在软件系统中可视化显示;
- (7) 数据入库, 本次监测完成.

图 6 (网络版彩图) 本文所提系统在仿制壁画场景下的微变检测精度评估

Figure 6 (Color online) Accuracy evaluation of the proposed system for the imitation mural scene

3 智能原位监测系统精度评估

文物本体劣化过程十分缓慢, 在长周期内可能仅发生亚毫米级变化. 为了验证本文所提文物本体智能原位监测系统是否能满足实际需求, 我们在真实场景下通过仿制不同规格的细微变化来评估该系统对细微变化的检测能力. 如图 6 和 7 所示, 我们构建了两个真实场景, 包括一个仿制壁画以及一个仿制青铜器. 仿制壁画宽度约 30 cm, 仿制青铜器宽度约 13 cm. 我们选择具有 0.1 mm 标准宽度的工业铝线来模拟场景细微变化, 分别构建了 0.1 mm、0.2 mm (双绞线)、0.4 mm (四绞线) 3 种不同宽度以及 2, 4, 8 mm 3 种不同长度的变化, 因此共产生不同尺度的变化 9 种. 对每个场景, 我们首先利用智能原位监测系统进行数据初次采集, 获取参考图像. 在实验中, 我们采用搭载 50 mm 定焦镜头的佳能 5DMarkIII 单反相机获取图像数据, 所有采集图像大小为 5760×3840. 获取参考图像时, 相机针对仿制壁画和仿制青铜器的拍摄距离分别约为 50 和 20 cm. 然后, 我们在场景不同位置随机放置上述 9 种不同尺度的工业铝线来模拟不同尺度的细微变化. 接下来, 我们对该场景执行两级相机重定位, 并获取场景当前图像. 以两次观测图像 (参考图像和当前图像) 作为输入, 执行细微变化检测模块, 最终得到场景细微变化检测结果. 参考图像、当前图像、细微变化检测结果, 以及所有变化的局部放大区域如图 6 和 7 所示.

从结果中我们可以清楚地发现该系统可有效发现场景中所有不同尺度的细微变化. 此外, 在精确检测出真实细微变化的同时, 系统也并未产生明显的误报 (将未变化区域识别为变化). 值得一提的是, 本文所提文物本体智能原位监测系统实现了基于图像的像素级微变检测, 因此原则上该系统发现细微变化的极限取决于场景中真实变化是否能在两次观测图像中具有像素级区分, 这通常受相机分辨率、拍摄距离等不同因素的影响. 因此, 通过以上实验可以验证本文所提文物本体智能原位监测系统在 0.5 m 内的常规观测距离下能有效发现 0.1 mm 级细微变化.

图 7 (网络版彩图) 本文所提系统在仿制青铜器场景下的微变检测精度评估

Figure 7 (Color online) Accuracy evaluation of the proposed system for the imitation bronze ware scene

图 8 (网络版彩图) 敦煌莫高窟监测洞窟及主要病害分布

Figure 8 (Color online) Caves and main disease distribution of Dunhuang Mogao Grottoes

4 实地应用

目前, 本文所提文物本体智能原位监测系统已成功在敦煌莫高窟、故宫、颐和园等 10 多个遗产地或博物馆面向文物本体劣化监测、文物修复评估等多种业务开展了实地应用. 在实际监测过程中根据发现的问题对该监测系统进行逐步改进与完善. 该系统有效提供了针对文物本体的亚毫米级微变监测能力, 对于提升文物预防性保护和科技考古的水平和影响力意义重大.

4.1 文物本体劣化监测

利用本文所提文物本体智能原位监测系统, 我们从 2014 年开始每年持续对敦煌莫高窟的 11 个典型代表洞窟中的壁画进行监测, 从最开始的 46 个监测点逐步增加到现在的一百余个, 涉及了壁画的起甲、酥碱、疱疹、裂隙 4 种典型病害. 图 8 展示所选洞窟及主要病害分布情况. 部分监测结果如图 9

图 9 (网络版彩图) 敦煌莫高窟壁画部分监测结果

Figure 9 (Color online) Inspection results of murals in Dunhuang Mogao Grottoes

所示, 包括敦煌莫高窟 276 窟和 351 窟各两处监测点在一年时间间隔壁画本体的细微变化检测结果。所有的数据均由相机直接采集获得, 未经过任何后处理操作。将当前相机位姿物理真实地恢复到上次采集时状态, 保证了前后两幅观测图像具有空间一致性, 因此通过简单的图像比对即可发现文物本体真实的细微变化。利用本系统, 我们成功在敦煌莫高窟壁画中发现了一年间隔发生的 0.1 mm 级细微变化。相比之下, 此前依靠人眼比对的方式仅能发现几十年间隔的变化。由此可见, 本文的文物本体智能原位监测系统可实现精细化的文物本体劣化监测, 所取得的成果对文物预防性保护是一个重大的突破。此外, 我们也在多个遗产地或博物馆开展了文物本体劣化监测工作, 如从 2015 年开始每季度对颐和园清可轩石刻文物进行本体监测, 用于对风化病因的机理分析。从 2017 开始在甘肃户县对公输堂小木作结构变化进行监测, 用于其结构风险预警分析。从 2019 年开始在故宫开展了针对建筑顶部彩画的单体监测, 为其霉变病害分析提供数据支撑。从 2019 年开始在苏州环秀山庄、拙政园等园林遗产地对假山石的稳定性进行监测。

4.2 文物修复评估

本文所提的文物本体智能原位监测系统也可用于文物修复的量化评估工作。文物修复是文物保护领域的一个重要工作, 当文物随着时间变化而产生了非常严重的劣化后, 文物专家出于保护目的会对文物进行主动修复。由于文物修复的过程中涉及到对文物进行直接接触和操作, 因此会不可避免地会对文物造成因修复而带来的损害。由于此种损害通常较小, 在以往的工作中难以被发现, 导致无法对相关文物修复技术或方法进行评估, 因此也无法以此作为指导帮助专家对修复技术进行改进。本文所提的文物本体智能原位监测系统可检测场景发生的细微变化, 因此可用于文物修复评估任务。图 10 展示了我们在敦煌莫高窟、甘肃拉卜楞寺、甘肃魏晋墓对壁画或砖画文物中几种典型病害的修复评估结果。此外, 图 10 也展示了我们对上述修复评估的量化统计结果。该监测结果可辅助修复专家对相应修

	Missing area (cm ²)	Total area (cm ²)	Change ratio (%)
Dunhuang Mogao Grottoes	30.2944	7880.81	0.3844
Wei and Jin Tombs	0.5271	2768.17	0.0190
Labrang Monastery	2.1423	9506.31	0.0225

图 10 (网络版彩图) 文物修复评估结果

Figure 10 (Color online) Assessment results of cultural heritage restoration

复方法及操作流程进行完善, 逐步减少文物修复对文物自身带来的潜在风险.

5 结论

本文针对文物预防性保护工作中文物本体劣化演变难感知的这一瓶颈问题, 提出了一套基于主动成像条件重现的文物本体智能原位监测系统. 该系统具有功能完善、使用轻便、易拆装等特点, 可适用于多种真实赋存环境下的文物本体监测工作. 目前该监测系统已在多个遗产地或博物馆开展推广应用, 成功支持了在多种复杂赋存环境下的文物本体细粒度变化监测任务, 有效提供了针对文物本体的亚毫米级微变监测能力, 完善了预防性保护技术链条中的关键一环. 这也使得文物真实本体状态和相关环境大数据的协同分析成为可能. 除了应用于预防性保护中的文物本体劣化监测和文物修复评估业务外, 我们也在文物运输及展览损伤评估、考古记录与追溯等多种业务上开展了探索性应用. 事实上, 该文物本体智能原位监测系统本质上是一套通用的监测系统, 不仅可用于文物保护领域, 亦可用于诸如工业加工生产、精密仪器损伤监测等有细微变化感知需求的领域, 具有广泛的应用前景.

参考文献

- 1 Graham-Bell M. Preventive Conservation: A Manual. City of Victoria: British Columbia Museums Association. 1986
- 2 An C, Lyu N, Zhang R, et al. Preventive conservation and its influence to the conservation practice on Chinese grotto temples. *Southeast Culture*, 2020, 5: 13–19 [安程, 吕宁, 张荣, 等. 预防性保护理念对我国石窟寺保护的影响与实践. *东南文化*, 2020, 5: 13–19]
- 3 孙胜利, 陈港泉, 王小伟, 等. 文化遗产地文物本体巡查体系初步构建 —— 以敦煌莫高窟文物本体巡查为例. *中国文物科学研究*, 2018, 2: 32–38
- 4 刘海霞. 科技监测技术在意大利建筑遗产监测方面的应用. *人文天下*, 2015, 5: 55–59
- 5 Jiang Y H, Wang J H, Li L B, et al. Research on cave rock stability and application of a monitoring system. *Sci Conserv Archaeology*, 2014, 26: 70–75 [姜云辉, 王金华, 黎利兵, 等. 石窟岩体稳定性监测系统应用与研究. *文物保护与考古科学*, 2014, 26: 70–75]
- 6 Liu R F, Liu H X, Huang Z, et al. A preliminary study of the application of spectral technology to weathering monitoring of dinosaur bone fossils. *Acta Petrol et Miner*, 2020, 39: 596–604 [刘瑞峰, 刘海新, 黄卓, 等. 光谱技术用于恐龙骨骼化石风化监测初探. *岩石矿物学杂志*, 2020, 39: 596–604]
- 7 Nie S X, Wang T, Cao P. Three-dimensional cultural relic monitoring technology based on digital close-range photogrammetry and its application. *Res Heritages Preserv*, 2019, 4: 78–83 [聂士祥, 汪涛, 曹鹏. 基于数字近景摄影测量的文物三维监测技术及其应用. *遗产与保护研究*, 2019, 4: 78–83]
- 8 Liu R F, Duan Q S, Zhang L X, et al. A study of the weathering monitoring of dinosaur bone fossils based on TLS. *Acta Geoscientica Sin*, 2020, 41: 554–560 [刘瑞峰, 段奇三, 张丽霞, 等. 基于 TLS 的恐龙骨骼化石风化监测研究. *地球学报*, 2020, 41: 554–560]
- 9 Lewis E V. Principles of Naval Architecture: Vol. 3: Seakeeping and Controllability. Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988
- 10 Hartley R, Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge: Cambridge University Press, 2003
- 11 Feng W, Tian F P, Zhang Q, et al. Fine-grained change detection of misaligned scenes with varied illuminations. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2015. 1260–1268
- 12 Nister D. An efficient solution to the five-point relative pose problem. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2004, 26: 756–770
- 13 Tian F P, Feng W, Zhang Q, et al. Active camera relocalization from a single reference image without hand-eye calibration. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2019, 41: 2791–2806
- 14 Feng W, Tian F P, Zhang Q, et al. 6D dynamic camera relocalization from single reference image. In: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016. 4049–4057
- 15 Miao D, Tian F P, Feng W. Active camera relocalization with RGBD camera from a single 2D image. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2018. 1847–1851
- 16 Shi Y B, Tian F P, Miao D, et al. Fast and reliable computational rephotography on mobile device. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, 2018. 1–6
- 17 Zhang Q, Feng W, Wan L, et al. Active recurrence of lighting condition for fine-grained change detection. In: *Proceedings of the 27th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, 2018. 4972–4978
- 18 Huang R, Feng W, Wang Z, et al. Learning to detect fine-grained change under variant imaging conditions. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, 2017. 2916–2924
- 19 Stent S, Gherardi R, Stenger B, et al. Precise deterministic change detection for smooth surfaces. In: *Proceedings of IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2016. 1–9
- 20 Khan S, He X, Porikli F, et al. Learning deep structured network for weakly supervised change detection. In: *Proceedings of the 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, 2017. 2008–2015

An intelligent in-situ visual inspection system for preventive conservation of cultural heritages

Wei FENG^{1,2}, Qian ZHANG^{1,2*}, Fei-Peng TIAN^{1,2}, Xiaowei WANG³, Bolong CHAI³, Jizhou SUN^{1,2} & Bomin SU³

1. *College of Intelligence and Computing, Tianjin University, Tianjin 300350, China;*

2. *Key Research Center for Surface Monitoring and Analysis of Relics, State Administration of Cultural Heritage, Tianjin 300350, China;*

3. *Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China*

* Corresponding author. E-mail: qianz@tju.edu.cn

Abstract Preventive conservation is an advanced protection scheme that is widely recognized and constantly pursued by the worldwide conservation community of cultural heritages. Following the minimum interruption principle, preventive protection can effectively inhibit the deterioration of cultural relics by finely inspecting the symptoms, inferring the causes of diseases, and accurately controlling relevant pathogenesis factors. Reliable inspection of symptoms is the starting point and basis of preventive conservation. At present, many technologies and data have been accumulated for environmental factors. Despite the plenty techniques and accumulated data for the perception of environmental factors, the feasible, accurate, and reliable in-situ inspection of the status of cultural heritages still remains an open problem due to slow changing speed, subtle change scale, and versatile occurrence environments, which seriously hinders the development and promotion of preventive protection. In this paper, we present the first intelligent in-situ visual inspection system for the preventive conservation of cultural heritages. By physically reproducing the camera's 6-DoF pose, effective image-guided detection of fine-grained changes for cultural heritages is realized. Till now, this system has been used in more than 10 cultural heritage sites in China, such as the Dunhuang Mogao Grottoes, the Imperial Palace, and the Summer Palace.

Keywords preventive conservation, imaging condition reproduction, camera relocalization, fine-grained change detection, active vision, in-situ inspection

Wei FENG received his B.S. and MPhil degrees in computer science from Northwestern Polytechnical University, China, in 2000 and 2003, respectively, and his Ph.D. degree in computer science from City University of Hong Kong in 2008. From 2008 to 2010, he was a research fellow at the Chinese University of Hong Kong and City University of Hong Kong. He is now a full professor in the School of Computer Science and Technology, Tianjin University, China. His major research interests are active robotic vision and visual intelligence, specifically including active camera relocalization and lighting recurrence, general Markov random fields modeling, energy minimization, active 3D scene perception, SLAM, and generic pattern recognition. Recently, he focuses on solving preventive conservation problems of cultural heritages via computer vision and machine learning.

Qian ZHANG received his B.E. degree in software engineering from the School of Computer Software, Xidian University, China, in 2013, and is currently working toward his Ph.D. degree at the School of Computer Science and Technology, College of Intelligence and Computing, Tianjin University, China. His research interests include computer vision and machine learning, especially on active vision, image-based 3D reconstruction, and fine-grained change detection.

Fei-Peng TIAN received his B.E. degree in software engineering from the School of Computer Software, Tianjin University in 2013, and his Ph.D. degree from the School of Computer Science and Technology, College of Intelligence and Computing, Tianjin University in 2021. He is currently a visiting research student of Simon Fraser University. His research interests focus on computer vision, especially on active robotic vision, 3D scene perception, and visual SLAM.

Xiaowei WANG received his B.S in computer science from Northwest Normal University, Lanzhou, China, in 1998. He is currently an associate researcher in Dunhuang Research Academy, Gansu, China. His major research interests are conservation of ancient murals, e-heritage, and monitoring technology of cultural heritages.