

## 报告正文

### (一) 立项依据与研究内容:

1. 项目的立项依据(研究意义、国内外研究现状及发展动态分析,需结合科学研究发展趋势来论述科学意义;或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录);

无人机是一种会飞的空中机器人,比普通的机器人更灵活,更适合于在一些普通机器人无法达到的地方进行工作,而桥梁缺陷检测的任务往往比较危险,因此基于无人机图像多维空间融合感知进行桥梁检测的研究具有如下特点:

- (1) 无人机操作灵活、使用安全,获取的视频图像信息更为全面;
- (2) 计算机视觉无损检测系统使用方便,定期的动态监测桥梁更具可靠性;
- (3) 基于深度与彩色图像多维空间致密融合,能得到更准确的裂缝检测结果;
- (4) 在二维镶嵌图像上,能实现宽视野全景图像的裂缝全局定位;
- (5) 在三维重建空间中,能够实现桥梁裂缝更好的参数度量和可视化。

目前国内外还没有在三维空间中融合深度点云与彩色图像进行桥梁缺陷检测的研究报道,因此基于无人机图像多维空间融合感知进行桥梁检测必将是今后国内外的研究热点。在深度传感器方面目前主要有 TOF 飞行时间相机、Kinect 相机和激光扫描仪。Kinect 相机测量距离不到 4 米,容易存在大片深度缺失区域,而且白天深度图像效果很差;激光扫描仪测量距离较大,但是逐点扫描,得到的是离散稀疏点云,无法进行深度图像的有效描述,而且体积大、价格昂贵;TOF 相机测量距离可以达到 10 米,能够快速同时得到场景的深度图像,成像效果好,目前是国内外三维重构和目标识别领域的研究热点,有广泛的应用前景。但是由于硬件的限制,TOF 相机采集的深度图像分辨率较低。综合上述深度传感器的优缺点,本项目拟采用 TOF 相机进行深度图像的采集,研究采用超分辨率重建算法软件的方式提高深度图像传感器的分辨率。因此,从软件方面提高深度图像的分辨率具有重大的研究意义和应用价值。本文旨在提出一种基于无人机图像多维空间融合感知的桥梁检测方法,利用无人机在危险环境中能够执行桥梁底部缺陷无损检测的优势,具有如下创新点:

- (1) 提出三维光流高精度匹配方法,实现彩色图像局部特征引导的超分辨率致密重建,从全局优化角度消除重建过程中的参数累积误差。
- (2) 提出基于无人机视觉系统,实现复杂环境中基于三维空间感知和多维异源数据融合的桥梁缺陷检测与分类方法。

(3) 提出在无缝镶嵌图像中实现桥梁缺陷检测特征的参数化描述、裂缝的自动分类与全景感知方法。

(4) 提出建立基于三维视觉的桥梁裂缝发展动态监测与评价方法。

## 1.1 应用前景

国内外在基于单幅图像的桥梁检测方面已有研究成果，但是如果在无人机采集得到的序列图像中引入多维空间融合功能，则极大地增强了复杂环境下桥梁裂缝检测的三维空间感知和定位能力，为桥梁安全检测提供了信息支撑。尽管国内外分别在三维重建、桥梁检测等相关领域取得了一些研究成果，但是在应用实践中，我们发现还存在若干需要解决的关键技术问题。例如，如何实现三维深度图像数据的准确匹配、融合彩色图像特征的深度图超分辨率致密重建算法、如何实现基于三维空间深度点云与彩色图像融合的桥梁缺陷检测方法，如何解决图像重建过程中的参数累积误差问题，如何建立基于三维视觉的桥梁裂缝发展动态监测与评价方法等技术问题。

人类视觉信息在传输、处理和分析过程中，存在着极为复杂的感知处理策略，将计算机视觉研究建立在人类视觉的基础上是本项目的一个重要出发点。本项目拟开展基于视觉注意机制的图像匹配、三维重建与桥梁裂缝检测技术研究，通过研究人类视觉的运行机制，对其规律、机理和特性进行总结、抽象和建模并将其应用于无人机图像多维空间融合感知的桥梁检测关键技术的解决之中。

无人机图像多维空间融合感知的桥梁检测技术是当前无损检测领域的研究热点和前沿方向。此项目所研究的内容涉及图像融合、三维重建、超分辨率图像增强、目标识别等多方面。因此，本项目的研究成果同样也适用于图像侦察技术，通过本项目的研究可解决战场侦察、三维图像制导以及无人机图像信息处理等军事国防工业领域中的多项技术需求，缩短我国与国外的技术差距。同时，此项目的研究成果也可应用在民用领域的危险区域探测、海洋环境监测、大坝安全监测、隧道安全检测、反恐监视、机场监控、无人机视觉导航着陆、机器人视觉导航、无人车自动驾驶、卫星遥感图像侦察、城市规划与市政管理、农业作物长势监测、矿产资源勘探、水资源开发利用、土地利用监控、自然灾害监测与评估、生态环境保护等领域，从而产生重大的经济价值和社会效益。

## 1.2 参考文献

- [1] 马建, 孙守增, 杨琦, “中国桥梁工程学术研究综述·2014”, 中国公路学报, 2014, Vol. 27, No.5, pp. 1-96.
- [2] 刘鹤, “浅析高铁桥梁施工中的技术创新”, 科技致富向导, 2014, Vol. 36, pp. 72-73.
- [3] 刘磊, 刘流, “墨菲定律与海恩法则: 避免空难的维修安全启示”, 装备制造, 2014, Vol. S1, pp. 11-12.

- [4] Taygun Kekec, Alper Yildirim, Mustafa Unel, "A new approach to real-time mosaicing of aerial images", *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, Vol. 62, pp. 1755-1767.
- [5] Aurélien Yol, Bertrand Delabarre, Amaury Dame, Jean-Émile Dartois, Eric Marchand, "Vision-based Absolute Localization for Unmanned Aerial Vehicles", *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014, Chicago, IL, USA, pp. 3429-3434.
- [6] Francesco Nex, Fabio Remondino, "UAV for 3D mapping applications: a review", *Applied Geomatics*, 2014, Vol. 6, pp. 1-15.
- [7] Andrew Chambers, Sebastian Scherer, Luke Yoder, Sezal Jain, Stephen Nuske, Sanjiv Singh, "Robust Multi-Sensor Fusion for Micro Aerial Vehicle Navigation in GPS-Degraded/Denied Environments", *IEEE American Control Conference*, June 4-6, 2014, pp. 1892-1899.
- [8] Sebastian Scherer, Joern Rehder, Supreeth Achar, Hugh Cover, Andrew Chambers, Stephen Nuske, Sanjiv Singh, "River mapping from a flying robot: state estimation, river detection, and obstacle mapping", *Autonomous Robots*, 2012, Vol. 33, No. 1-2, pp. 189-214.
- [9] Sebastian Siebert, Jochen Teizer, "Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system", *Automation in Construction*, 2014, Vol. 41, pp. 1-14.
- [10] Lasse Klingbeil, Matthias Nieuwenhuisen, Johannes Schneider, Christian Eling, "Towards Autonomous Navigation of an UAV-based Mobile Mapping System", *4th International Conference on Machine Control & Guidance*, 2014, Braunschweig, Germany, pp. 1-12.
- [11] Ronny Salim Lim, Hung Manh La, Weihua Sheng, "A Robotic Crack Inspection and Mapping System for Bridge Deck Maintenance", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 367-378.
- [12] Hung Manh La, Nenad Gucunski, Seong-Hoon Kee, Jingang Yi, Turgay Senlet, Luan Nguyen, "Autonomous robotic system for bridge deck data collection and analysis", *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014, Chicago, IL, USA, pp. 1950-1955.
- [13] Matthew M. Torok, Mani Golparvar-Fard, Kevin B. Kochersberger, "Image-Based Automated 3D Crack Detection for Post-disaster Building Assessment", *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2014, Vol. 28, pp. 1-13.
- [14] David Lattanzi, Gregory R. Miller, "3D Scene Reconstruction for Robotic Bridge Inspection", *Journal of Infrastructure Systems*, 2014, Vol. 20, No. 3, pp. 1-12.
- [15] Jakob Engel, Thomas Schops, Daniel Cremers, "LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM", *European Conference on Computer Vision*, 2014, Vol. 8690, pp. 834-849.
- [16] Hung M. La, Ronny Salim Lim, Basily B. Basily, Nenad Gucunski, Jingang Yi, "Mechatronic Systems Design for an Autonomous Robotic System for High-Efficiency Bridge Deck Inspection and Evaluation", *IEEE Transactions on*

- Mechatronics, 2013, Vol. 18, No. 6, pp. 1655-1664.
- [17] Peter Henry, Michael Krainin, Evan Herbst, Xiaofeng Ren, Dieter Fox, “RGB-D Mapping: Using Depth Cameras for Dense 3D Modeling of Indoor Environments”, Springer Tracts in Advanced Robotics, 2014, Vol. 79, pp. 477-491.
  - [18] Guirong Yan, Peng Chen, Guangda Hu, Ming Zhao, Jiarui Yi, “Fast damage detection of cable-stayed bridges using an improved edge-detection method”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2014, Vol. 25, pp. 1-12.
  - [19] Mohammad R. Jahanshahi, Sami F. Masri, Curtis W. Padgett, Gaurav S. Sukhatme, “An innovative methodology for detection and quantification of cracks through incorporation of depth perception”, Machine Vision and Applications, 2013, Vol. 14, pp. 227-241.
  - [20] Mohammad R. Jahanshahi, Sami F. Masri, “Adaptive vision-based crack detection using 3D scene reconstruction for condition assessment of structures”, Automation in Construction, 2012, Vol. 22, pp. 567-576.
  - [21] Sukalpa Chanda, Guoping Bu, Hong Guan, Jun Jo, Umapada Pal, Yew-Chaye Loo, Michael Blumenstein, “Automatic Bridge Crack Detection – A Texture Analysis-Based Approach”, Artificial Neural Networks in Pattern Recognition, 2014, Vol. 8774, pp. 193-203.
  - [22] Alessio Arena, Claudio Delle Piane, Joel Sarout, “A new computational approach to cracks quantification from 2D image analysis: Application to micro-cracks description in rocks”, Computers & Geosciences, 2014, Vol. 66, pp. 106-120.
  - [23] R.S. Adhikari, O. Moselhi, A. Bagchi, “Image-based retrieval of concrete crack properties for bridge inspection”, Automation in Construction, 2014, Vol. 39, pp. 180-194.
  - [24] Hoang-Nam Nguyen, Tai-Yan Kam, Pi-Ying Cheng, “An automatic approach for accurate edge detection of concrete crack utilizing 2D geometric features of crack”, Journal of Signal Processing Systems, 2014, Vol. 77, No. 3, pp. 221-240.
  - [25] 李新科, 高潮, 郭永彩, 邵延华, 贺付亮, “利用改进的SIFT算法检测桥梁拉索表面缺陷”, 武汉大学学报, 2015, Vol. 40, No.1, pp. 71-76.
  - [26] 王翔, 王鹏, 程辉, “基于机器视觉的桥梁形变在线监测技术研究”, 公路工程, 2014, Vol. 39, No. 1, pp. 198-201.
  - [27] 叶肖伟, 张小明, 倪一清, 黄启远, 樊可清, “基于机器视觉技术的桥梁挠度测试方法”, 浙江大学学报, 2014, Vol. 48, No. 5, pp. 813-819.
  - [28] 刘朝涛, 杜子学, 武 维, 向中富, “基于图像处理的桥梁缆索检测系统研制”, 重庆交通大学学报, 2014, Vol. 33, No. 2, pp. 5-9.
  - [29] 董安国, 宋君, 张仙艳, 薛宏智, “基于图像的桥梁裂缝检测算法”, 自动化仪表, 2013, Vol. 34, No. 8, pp. 1-4.
  - [30] 单宝华, 陈勋, “桥梁结构水下基础表面缺陷立体视觉检测试验”, 实验力学, 2014, Vol. 29, No.4, pp. 426-432.

- [31] 张开洪, 罗林, 颜禹, “基于立体视觉的桥梁裂缝自动检测系统研究”, 重庆交通大学学报, 2014, Vol. 33, No. 5, pp. 37-42.
- [32] 叶偲, 李良福, 焦婷, “全景图像镶嵌中运动目标的重影处理方法”, 陕西师范大学学报, 2014, Vol. 42, no.4, pp.16-21.
- [33] 魏晓慧, 李良福, 钱钧, “基于混合高斯模型的运动目标检测方法研究”, 应用光学, 2010, Vol. 31, no.4, pp.574-578.
- [34] 刘侍刚, 吴成柯, 李良福, “基于1维子空间线性迭代射影重建”, 电子学报, 2007, Vol. 35, no.4, pp. 692-696.
- [35] 刘侍刚, 吴成柯, 李良福, “一种存在遮挡的射影重建算法”, 模式识别与人工智能, 2007, Vol. 20, no.4, pp. 565-570.
- [36] Liangfu Li, "Building an accurate 3D model of a circular feature for robot vision", Opto-Electronics Review, 2012, Vol. 20, No.2, pp.120-125.

## **2. 项目的研究内容、研究目标, 以及拟解决的关键科学问题 (此部分为重点阐述内容)**

### **2.1 研究内容**

本项目主要研究基于无人机图像多维空间融合感知的桥梁检测方法, 主要解决三维深度图像数据的准确匹配、融合彩色图像特征的深度图超分辨率致密重建算法、基于全景镶嵌图像的桥梁缺陷检测方法、基于三维空间深度点云与彩色图像融合的桥梁缺陷检测方法、桥梁裂缝发展动态监测与评价方法等问题, 具体研究内容包含如下五个方面:

#### **(1) 基于三维光流的深度图像高精度匹配方法研究**

深度图像匹配是无人机图像三维重建的前提和关键技术。研究低信噪比条件下图像帧间大范围运动时基于视觉信息的高效注意机制, 借鉴人类视觉注意机制, 采用摄像机全局运动估计模型与由粗到精的多分辨率分析方法, 基于三维光流图像全局运动估计模型进行图像匹配, 准确求解出图像变换参数, 以解决在复杂环境中有效、精确、实时全景图像三维重建问题。

研究基于相机运动估计的图像匹配方法, 通过估计图像的整体运动引导匹配区域的搜索方向和范围, 保证匹配对应点的一致性运动, 从而自动实现连续图像帧之间匹配对应点的准确求解, 以提高图像匹配的准确度。由于实际上三维景物各个独立的表面使得光流的速度场是非连续的, 因此当光流场计算基本公式不连续时, 研究采用非线性平滑条件、全局修正因子和局部约束来解决时变序列图像光流场的不连续性问题。

#### **(2) 融合彩色图像特征的深度图超分辨率致密重建算法研究**

由于深度图像反映的是三维空间离传感器的距离和位置信息, 而彩色图像反

映的是三维空间经过透视投影后得到的二维图像信息，因此，取长补短，研究将三维深度图像信息与二维彩色图像信息进行有效融合，得到彩色三维图像信息数据，实现在三维空间中进行多维数据融合的环境感知方法。研究基于非线性自适应增强算法对彩色图像进行超分辨率细节增强预处理，得到高分辨率的彩色图像。将高分辨率彩色图像作为先验信息和启发参考图，使得深度图像的超分辨率问题转化为最优化问题进行求解，并结合马尔科夫随机场将彩色图像和深度图像在局部区域的相似结构关系融合到目标函数的正则约束项中，研究基于彩色图像局部特征引导的深度图超分辨率重建算法。

针对在边缘部分区域由于反射方向的变化引起的图像空洞问题，研究深度图像的空洞补偿与边缘保持方法。由于基于双边滤波的方法容易导致图像过平滑问题，研究引入深度相似项及梯度域项，开发出基于彩色图像的局部结构参数模型引导的联合双边高斯滤波器的超分辨率深度图像重建算法，以减少边缘过平滑问题，进而提高重建效果。联合双边高斯滤波器的值域核并不是由深度图像计算得到，而是从引导的高分辨率彩色图像计算得到的，即深度图像作为被滤波的对象，而彩色图像作为引导图像来计算双边滤波核的权重项，因此，所研究的滤波器是融合彩色信息与深度信息的联合双边滤波器。

### **(3) 基于全景镶嵌图像的桥梁缺陷检测与特征量化方法研究**

在桥梁检测时，既需要保存某些裂缝在局部位置区域的图像，又需要保存裂缝在全局全景桥梁图像中的位置图像。而要得到全景图像，采用基于广角镜头的全景相机会出现鱼眼效果，只能通过图像处理的方法在无人机飞行时进行全景图像镶嵌才具有可行性。因此，需要研究基于全景镶嵌图像的桥梁缺陷检测方法。针对桥梁图像的全景拼接技术，需要研究从高精度图像匹配、图像畸变校正、参数累积误差补偿、全局光照不平衡校正、局部过渡区域的无缝平滑处理等多方面解决宽视场、高分辨率、高均匀性的图像镶嵌问题。

研究裂缝的量化方法，采用长度、方向、宽度、长宽比、区域面积、边界周长、小波矩等数据进行裂缝的特征参数化描述，其中小波矩特征表示图像在多分辨率分析中具有不变性特征的本质，解决了小波不变量的多尺度表示问题。由这些特征分量综合组成特征矢量来描述裂缝，并作为支持向量机的输入矢量用于裂缝训练和分类。研究结合独立成分分析与支持向量机解决多分类问题，采用多级分类器结构，把一个复杂的多类别分类问题转化为若干个二类别分类问题进行分级解决。核函数的选择是识别正确的关键，研究非线性分类的最优核函数及其参数选择方法。

### **(4) 三维空间中多深度融合感知的桥梁缺陷检测方法研究**

研究三维空间中多深度融合感知的桥梁裂缝缺陷检测方法。针对三维桥梁场景的重建，需要研究从深度图像畸变校正、匹配重建参数累积误差补偿、重建局

部过渡区域的无缝平滑处理等多方面解决大范围、超分辨率全景可视化的三维图像重建问题。桥梁裂缝在二维图像上主要表现为颜色与周围背景不同，具有较大变化；而在三维空间中则不但表现为颜色与周围背景不同，深度与背景也有明显的差异。因此，三维空间中的桥梁缺陷检测问题可以结合彩色图像信息与三维点云深度信息进行融合研究。

裂缝在三维空间中的分类可以结合其在二维全景镶嵌图像中的初步分类和定位，研究基于三维空间多维数据融合的桥梁缺陷精确检测与分类方法。裂缝主要表现为形状不规则，但是具有一定的方向性；裂缝的深度与周围有突变，中间深、两边浅。因此，需要研究裂缝在三维空间中的统计特征描述方法。研究基于数据驱动的直方图核函数的统计方法，在计算三维目标特征直方图之间的距离时充分考虑到在不同特征量化区间的不同区别性能，增强核函数对不同三维目标的区分能力。

## **(5) 桥梁裂缝发展动态监测与评价方法研究**

研究建立桥梁裂缝发展动态监测体系与评价方法，定期检测和监控缺陷的发展动态，并对缺陷的发展进行评价，对于发展速度过快的裂缝要及时采取维护、告警和安全措施。由于无人机定期检测时飞行轨迹的差异和镶嵌过程中的累积误差会导致全景镶嵌图像之间会存在轻微的差别，研究含有裂缝的全景宽视野镶嵌图像序列之间的图像匹配与目标检测问题。

研究结合单幅全景镶嵌图像中裂纹尖端的生长趋势与不同时期全景镶嵌图像序列中裂缝的动态发展结果进行综合评价，建立桥梁缺陷安全评价函数。在对裂缝进行评价后如果有异常就必须采取有效的维护措施与告警处理，避免引起桥梁交通安全事故。研究检查和监测桥梁裂缝的动态变化发展情况并对未来的裂缝生长趋势进行预测，在三维空间中显示裂缝的长度、宽度、深度、发展变化轨迹等可视化动态参数，实现桥梁缺陷检测的动态化、全局化、全景化与三维可视化。

## **2.2 研究目标**

本课题的研究目标旨在解决无人机图像多维空间融合感知的桥梁检测问题，它包含低信噪比条件下的多维图像数据的匹配方法、图像重建过程中的参数累积误差策略、融合彩色图像特征的深度图超分辨率致密重建算法、三维图像的无缝平滑、全景镶嵌图像的桥梁缺陷检测与特征量化方法、三维空间深度点云与彩色图像融合的桥梁缺陷检测方法、桥梁裂缝发展动态监测与评价方法等。具体的研究目标如下：

- (1) 基于无人机视觉系统，实现复杂环境中基于三维空间感知和多维异源数据融合的桥梁检测研究方法。**
- (2) 提出三维光流高精度匹配方法，实现彩色图像局部特征引导的超分辨率致密**

重建，从全局优化角度消除重建过程中的参数累积误差。

- (3) 在无缝镶嵌图像中实现桥梁缺陷检测特征参数化描述、裂缝的自动分类与全景感知。
- (4) 融合空间深度点云与彩色图像信息，实现三维空间中多特征融合的桥梁裂缝缺陷检测与分类方法。
- (5) 建立基于三维视觉的桥梁裂缝发展动态监测与评价方法。

### 2.3 拟解决的关键科学问题

- (1) 要实现多维图像空间的超分辨率致密重建，关键是从高精度三维图像匹配方法、超分辨率深度图重建、参数累积误差的消除等多方面解决致密三维重建过程中的断层现象、虚影和重影问题。
- (2) 要实现三维空间中桥梁裂缝的检测，关键是提高目标在三维空间中的分辨率，融合彩色传感器与深度传感器特征信息，构建裂缝特征在三维空间中的表达和描述方法，建立基于数据驱动的多维核函数直方图方法，增强核函数对不同三维目标的识别能力。
- (3) 要实现桥梁裂缝发展动态监测与评价，关键是结合单幅全景镶嵌图像中裂纹尖端的生长趋势与不同时期全景镶嵌图像序列中裂缝的动态发展结果进行综合评价，建立桥梁缺陷安全评价函数，实现桥梁缺陷检测的动态化、全局化、全景化与三维可视化。

### 3. 拟采取的研究方案及可行性分析（包括研究方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明）

针对以上研究目标、研究内容和关键科学问题，课题组拟在多维图像的匹配方法、全景图像的无缝镶嵌策略、超分辨率三维重建方法、参数累积误差的补偿策略、多维图像桥梁裂缝动态监测方法上展开研究，具体的技术路线如图 3 所示。



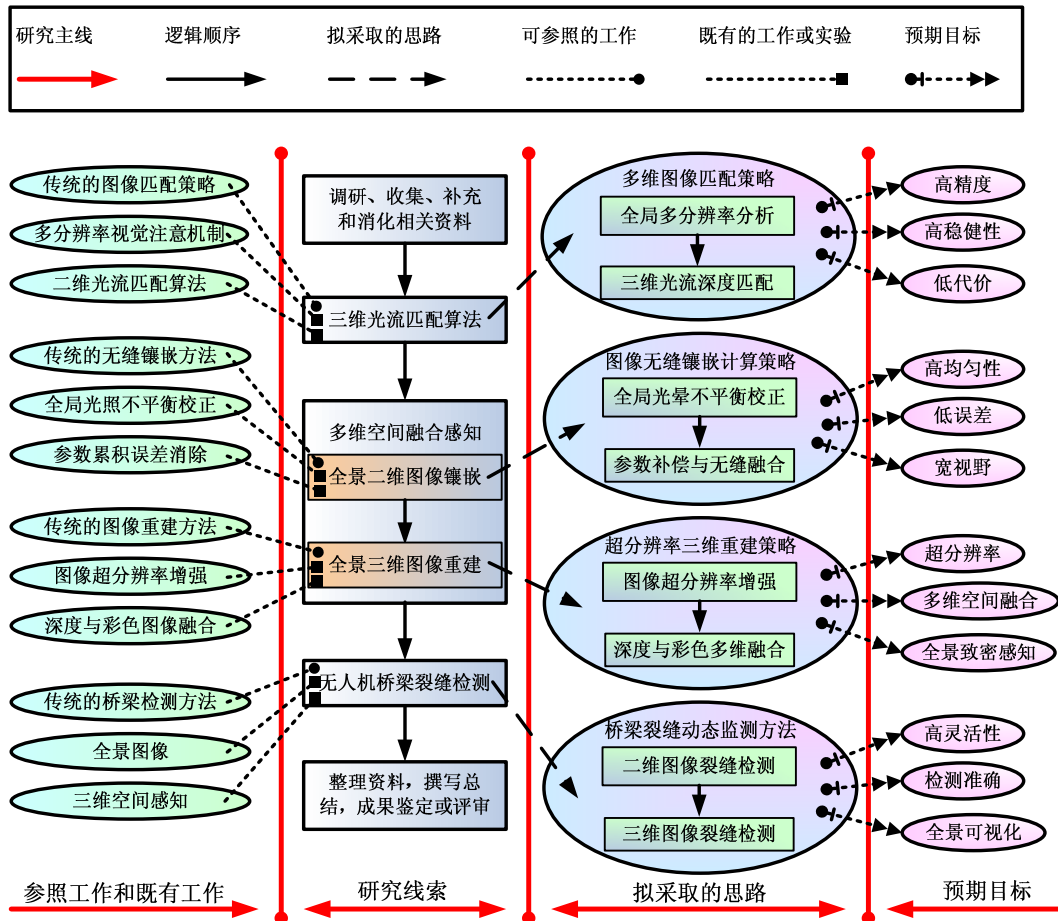


图 3. 项目总体技术路线图

### 3.1 研究方法

研究方法主要包括深度图像匹配、深度图像超分辨率重建、镶嵌图像中的桥梁检测、三维空间中的桥梁检测、裂缝发展的动态监测与评价方法等，以下分别进行展开和说明。

#### (1) 基于多分辨率分析的三维光流场图像匹配方法研究

研究采用基于多分辨率的运动估计框架进行不同运动信息表达的计算，通过全局视觉注意机制模型约束运动估计的总体结构，在估计过程中则采用局部模型进行由粗到精的求解。将深度连续模型应用到三维光流方程中，采用最小平方误差的计算方法和泰勒公式展开求解，能够得到仿射变换参数矩阵。在摄像机全局运动模型的引导下，采用由粗到精的分层策略将深度图像分解成不同的分辨率，随着层数的增加，分辨率越来越低，并将在粗尺度低分辨率下得到的结果作为下一层高分辨率的初始值，在不同的分辨率上对深度图像序列进行光流场计算，有效解决无人机运动速度较快时的三维图像匹配问题。

由于光流场基本约束方程采用了泰勒级数展开，通常认为图像的深度以及亮度场的变化都是连续的。然而，在三维深度图像匹配中，图像深度保持假设对于

一些图像序列来讲是不合适的,尤其是在图像的深度突变边缘处或者当运动速度较高时,基于深度保持假设的约束存在较大误差,这时可以采用非线性平滑条件。在图像的深度突变区域,速度场是有很大的变化的,非线性平滑约束能够考虑所估计的光流场在这一过渡区域的突变性,此过程不会平滑掉有关物体三维形状的非常重要的信息。由于光流约束方程并不能唯一地确定光流的速度场,因此需要导入其他的约束。采用全局修正方法假定光流在整幅图像内满足一定的约束条件,由运动和投影模型求解出修正因子;采用局部约束假定在给定点周围的小范围内,光流满足一定的约束条件。因此,从非线性平滑条件、全局修正因子和局部约束等多方面解决时变序列图像光流场的突变问题,实现在大运动位移、光照变化、边缘突变过程中的三维光流匹配。

## **(2) 基于彩色图像局部特征引导的深度图超分辨率重建算法研究**

深度图像与彩色图像采集于不同的传感器,图像的视场大小、拍摄角度、分辨率等都可能会不同,因此首先需要研究两个传感器的高精度参数标定方法,分别得到两个传感器的内部参数和外部参数。通过标定内部参数,可以消除由于相机生产制造过程中产生的各种畸变;通过标定外部参数,可以将两个传感器统一到同一个坐标系下。图像分辨率是衡量图像信息量大小的一个重要指标,通过改善成像系统的硬件设备来提高图像分辨率通常价格比较昂贵。而且由于成像系统硬件工艺的限制,传感器无法提供图像细节非常强、分辨率非常大的图像,从软件算法的角度研究提高图像的分辨率是一种可行的解决方案。由于无人机在飞行运动过程中,连续图像序列帧之间的重叠部分较少,而彩色图像与深度图像重叠范围较大,因此,基于序列图像的超分辨率重建算法不具有可行性,只能研究基于单帧图像的超分辨率重建算法。

由于深度图像与颜色纹理图像是对应于相同三维场景的不同观察结果,两者具有很强的结构和特征相关性,因此研究基于彩色图像局部特征引导的深度图超分辨率重建算法。研究构建满足一定约束条件的全局能量项,采用基于无向概率图模型的方法,将输入图像与待估计图像之间的差异构建成最大似然项,结合待估计图像需要满足的先验约束条件构建出概率表达式,然后进行概率最大化求解。使用高斯混合模型与自适应联合双边滤波器相结合,不断交替迭代双边滤波器与更新深度图像模型。将非局部滤波的思想引入深度图像修补方法中,在估计各个像素点间的相似度时考虑像素点间的结构化相关度、空间距离以及深度图像中被遮挡的点可能属于远距离物体的约束条件,最终获得深度图像填充补偿结果。

## **(3) 二维全景镶嵌图像中的桥梁缺陷检测方法研究**

要实现高精度全景图像的无缝镶嵌,需要从多方面研究分析图像镶嵌系统误差产生的来源并研究其解决方法。首先,因为图像序列任何连续两帧之间的参数

误差都会累积到后续的镶嵌图像中，从而导致全景镶嵌图像的变形。因此，研究参数累积误差的处理方法，从全局的角度对所有的参数进行优化处理和误差补偿。另外，研究高精度的摄像机标定方法消除图像的畸变，也是从源头解决镶嵌误差的一个重要途径。从摄像机成像模型和光照原理等各方面研究全景图像的无缝平滑技术，利用多帧图像之间的对应点关系，建立并最优化求解非线性目标函数，以消除图像序列之间产生的光照不平衡效应，实现在未知变化光照条件下散光、曝光以及光晕的去除方法。

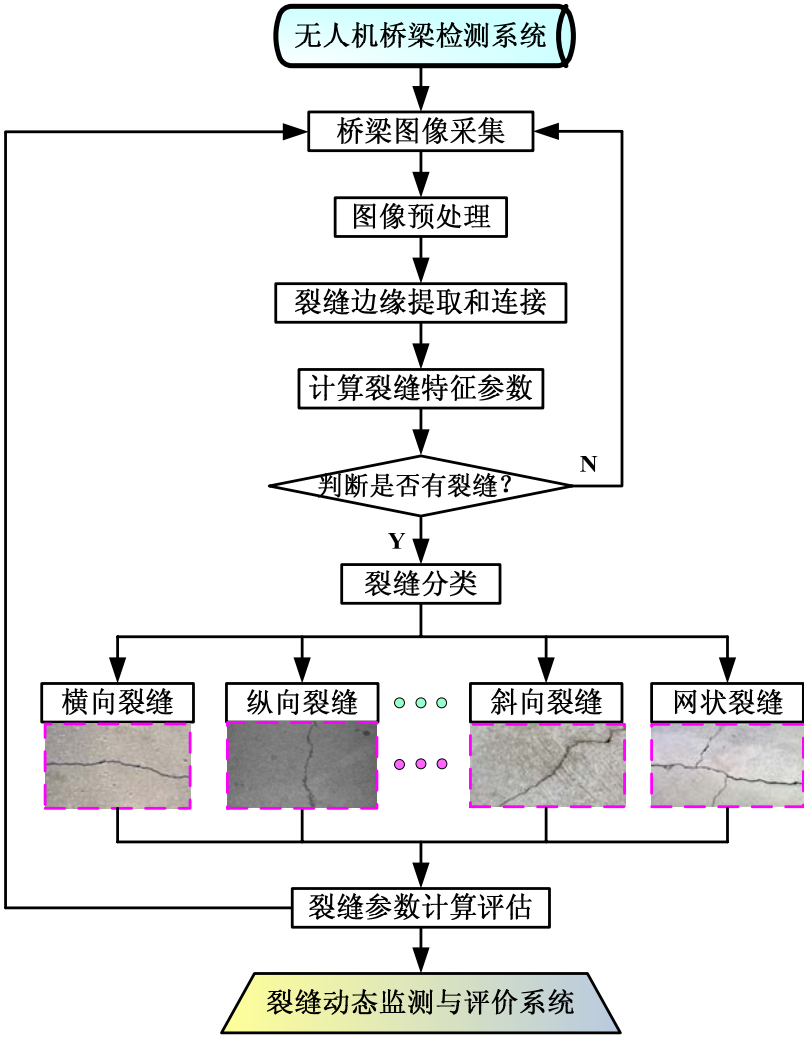


图 4. 桥梁裂缝检测方法

桥梁裂缝检测方法流程图如图 4 所示。采用裂缝的各种几何特征与小波特征建立特征描述模型。通常图像信号处理中都是假设随机变量满足高斯分布，但实际上图像中存在着非高斯随机变量，用高斯分布去近似描述得到的结果不尽理想，因此需要研究采用随机变量的高阶统计特性。为了提高特征提取的精度，图像中的高阶统计特性也需要考虑，独立成分分析得到的各个分量不仅去除了各个分量的相关性，而且还相互统计独立，能够针对非高斯信号进行多维特征的统计描述。研究利用独立成分分析的高阶统计特性，最终从多通道图像数据中分离出

独立元。研究采用线性变换解混阵施加到观测图像信号中,使得各个输出信号间尽可能相互独立,实现多维图像特征信号的独立分量提取。解混阵的求解是一个优化过程,需要建立一个分离结果独立程度描述的目标函数进行优化求解。针对裂缝分类问题,研究自适应核函数的分类与识别能力,结合局部核函数和全局核函数的优点,研究基于高斯核函数和多项式核函数构成的特征自适应混合核函数。

#### **(4) 基于三维空间深度点云与彩色图像融合的桥梁缺陷检测方法研究**

从多方面研究桥梁三维重建系统误差产生的来源并研究其解决方法,以实现高精度的场景三维重建。首先,研究重建参数累积误差的处理方法,从全局的角度采用参考图像对累积误差进行补偿和优化处理,解决重建过程中的断层问题。另外,研究从深度相机的成像模型、采样原理等各方面解决深度图像的畸变校正问题。利用三维空间中图像数据点之间的对应关系,建立并最优化求解非线性目标函数,利用带有边界约束条件的泊松方程和深度图像的梯度信息引导插值融合,在梯度域实现三维图像数据的合成,基于自适应梯度域融合消除深度图像序列之间的无缝平滑问题。

基于三维空间深度点云与彩色图像融合的三维目标识别系统的关键是目标的表达,用于描述目前的数据和物体模型。由于桥梁裂缝多是自由形态,现有三维目标的表达方法无法有效实现自由形态物体的表达和描述。桥梁裂缝的颜色分布与背景不同,桥梁裂缝的距离分布与背景也不一样,因此,研究采用形状直方图、颜色直方图与距离直方图结合的整体特征来实现三维目标的识别。构建多维核函数直方图进行三维裂缝目标的描述,以适应裂缝目标在各种姿态变换时的检测。通过形状分布直方图分布的不同,结合全景镶嵌图像中裂缝目标的分类结果,对各种裂缝目标进行再次分类确认,提高在三维空间中基于超分辨率深度图像与彩色图像融合条件下裂缝目标分类的准确率。根据传感器的标定参数,结合裂缝在全景镶嵌图像和三维图像中的准确位置,计算出裂缝的特征量化参数。

#### **(5) 桥梁裂缝发展动态监测与评价可视化方法研究**

在计算连续两帧全景图像之间的精确仿射变换参数时,需要考虑场景的旋转和缩放。研究采用尺度不变特征变换检测算法精确提取连续两帧图像中的角点,通过彩色投影算法求得的全局平移运动来约束特征点匹配搜索的范围和方向,从而有效剔除错误匹配点,并采用最小二乘法计算连续两帧图像序列之间的精确运动参数。这样,通过在动态桥梁场景中采用全局运动估计方法就避免了局部运动目标对全局运动参数计算的影响,实现复杂动态场景的序列图像变换参数的精确计算方法。

对所有已经得到的不同时期的全景镶嵌桥梁图像,以前一帧全景图像作为基准,将当前帧全景图像与前一帧全景图像进行匹配,计算得到两帧图像之间的图

像参数变换矩阵。将当前帧全景图像采用参数变换矩阵反变换到前一帧全景图像坐标系中，并与前一帧全景图像进行背景差分，就可以得到包含有动态变化裂缝的帧间差分图。如图 5 所示。将动态变化裂缝的参数在变化图中体现，建立裂缝安全度评价函数，并在三维空间中可视化显示与评价，便于桥梁维护人员进行定位和维修。

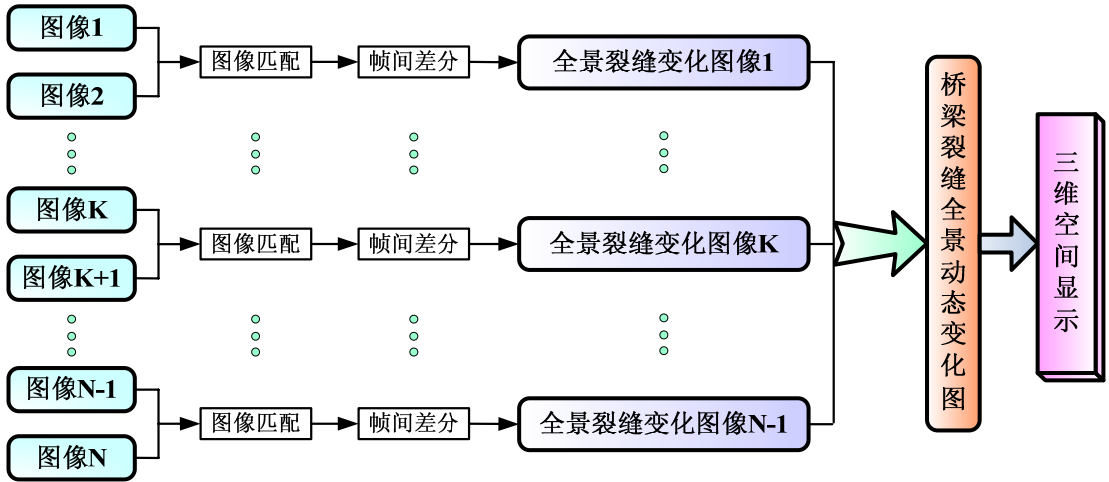


图 5. 桥梁裂缝发展动态监测与评价

### 3.2 技术路线

本项目的技术路线如图 6 所示，图中主要分为图像采集、传感器标定、图像变换参数的计算、图像校正、超分辨率图像增强、图像匹配、图像镶嵌、致密三维重建、桥梁裂缝检测、裂缝发展动态监测与评价等模块。由无人机视觉系统采集实时的深度图像序列和彩色图像序列，对彩色传感器和深度传感器分别进行标定，得到传感器的内部参数和外部参数。采用内部参数分别对彩色图像和深度图像进行校正，消除成像过程中的各种畸变。采用外部参数计算深度传感器与彩色传感器之间的变换参数矩阵，用于对校正后的彩色图像进行变换和图像增强，统一到深度图像坐标系中进行异源图像的融合，得到超分辨率增强后的深度图像。

对超分辨率增强后的深度图像进行基于三维光流的深度图匹配计算和三维匹配参数累积误差补偿，得到致密的三维重构图像数据。而对增强后的彩色图像进行图像镶嵌和二维图像匹配参数累积误差补偿，得到全景镶嵌彩色图像。分别在三维空间和二维全景镶嵌图像上进行桥梁裂缝检测和分类，并进行桥梁裂缝发展动态监测与评价，得到评价的结果，为桥梁维护人员提供裂缝的精确定位信息，以便于及时维护。

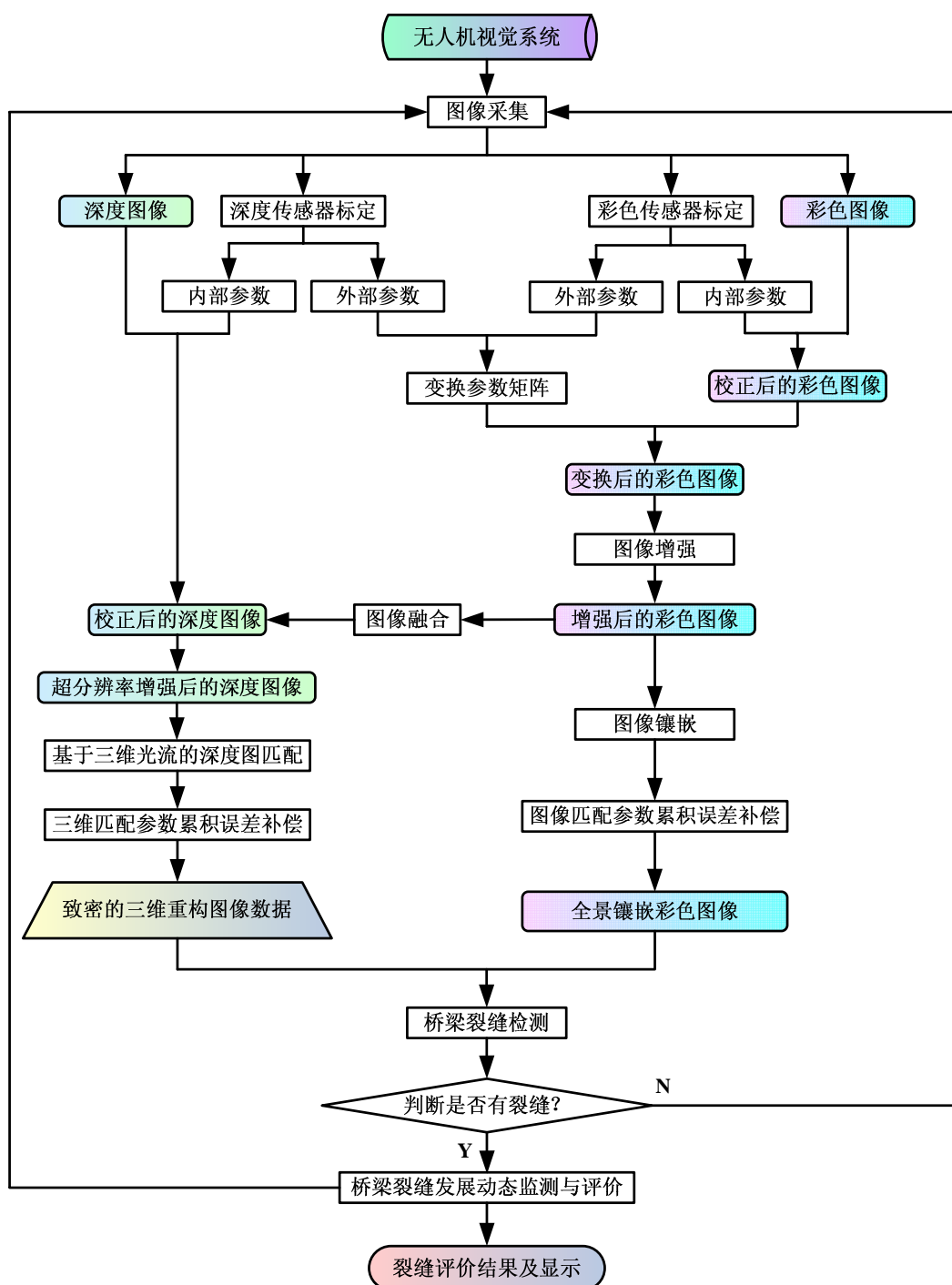


图 6. 基于无人机图像多维空间融合感知的桥梁检测技术方案图

### 3.3 关键技术的解决方法

#### (1) 多维图像超分辨率致密三维重建方法

研究高精度三维图像匹配方法，基于彩色图像局部特征引导得到超分辨率深度图，并消除重建过程中的参数累积误差，避免出现重建断层现象。当光流场计算基本公式不连续时，采用非线性平滑条件、全局修正因子和局部约束来解决时

变序列图像光流场的不连续性问题，实现在大运动位移、光照变化、边缘突变过程中的三维光流匹配。从深度图像畸变校正、匹配重建参数累积误差补偿、重建局部过渡区域的无缝平滑处理等多方面解决桥梁三维重建系统的误差。充分利用彩色图像的信息，将高分辨率彩色图像作为先验信息和启发参考图，使得深度图像的超分辨率问题转化为最优化问题进行求解，并结合马尔科夫随机场和联合双边高斯滤波器将彩色图像和深度图像在局部区域的相似结构关系融合到目标函数的正则约束项中，并构建满足一定约束条件的全局能量项，最终获得超分辨率致密深度图像。

## **(2) 三维空间中桥梁裂缝的检测方法**

研究基于三维空间多维数据融合的桥梁缺陷精确检测与分类方法。基于三维空间深度点云与彩色图像融合的三维目标识别系统的关键是目标的表达，用于描述目前的数据和物体模型。通过融合彩色图像的高分辨率和彩色特征信息，提高深度图像的分辨率和目标特征。研究构建多维核函数直方图进行三维裂缝目标的描述，以适应裂缝目标在各种姿态变换时的检测能力。研究采用形状直方图、颜色直方图与距离直方图结合的整体特征来实现三维目标的识别。裂缝主要表现为形状不规则，但是具有一定的方向性；裂缝的深度与周围有突变，中间深、两边浅。研究基于数据驱动的直方图核函数的统计方法，在计算三维目标特征直方图之间的距离时充分考虑到在不同特征量化区间的不同区别性能，增强核函数对不同三维目标的区分能力。

## **(3) 桥梁裂缝发展的动态监测与评价方法**

研究结合单幅全景镶嵌图像中裂纹尖端的生长趋势与不同时期全景镶嵌图像序列中裂缝的动态发展结果进行综合评价，建立桥梁缺陷安全评价函数。研究建立桥梁裂缝发展动态监测体系与评价方法，定期检测和监控缺陷的发展动态，并对缺陷的发展进行评价，对于发展速度过快的裂缝要及时采取维护、告警和安全措施。由于无人机定期检测时飞行轨迹的差异和镶嵌过程中的累积误差会导致全景镶嵌图像之间会存在轻微的差别，研究含有裂缝的全景宽视野镶嵌图像序列之间的图像匹配与目标检测问题。研究检查和监测桥梁裂缝的动态变化发展情况并对未来的裂缝生长趋势进行预测，在三维空间中显示裂缝的长度、宽度、深度、发展变化轨迹等可视化动态参数。

## **4. 本项目的特色与创新之处**

本项目主要提出了一种基于无人机图像多维空间融合感知的桥梁检测方法，其主要特色与创新之处在于：

- (1) 提出三维光流高精度匹配方法，实现彩色图像局部特征引导的超分辨率致密重建，从全局优化角度消除重建过程中的参数累积误差。**



(2) 提出基于无人机视觉系统,实现复杂环境中基于三维空间感知和多维异源数据融合的桥梁缺陷检测与分类方法。

(3) 提出在无缝镶嵌图像中实现桥梁缺陷检测特征参数化描述、裂缝的自动分类与全景感知方法。

(4) 提出建立基于三维视觉的桥梁裂缝发展动态监测与评价方法。

**5. 年度研究计划及预期研究结果** (包括拟组织的重要学术交流活动、国际合作与交流计划等)

### **5.1 年度研究计划**

#### **2016 年 1 月——2016 年 12 月**

- 在已有的研究工作基础上,进一步调研、收集和消化国内外相关研究资料,提出总体技术研究方案,制定详细的理论和实验研究计划(1 月~3 月)
- 进行无人机视觉系统集成,在已有的无人机上集成深度图像传感器与彩色图像传感器(4 月~6 月)
- 研究采用摄像机全局运动估计模型与多分辨率分析方法,实现基于三维光流的深度图像高精度匹配方法(7 月~9 月)
- 研究基于彩色图像局部特征引导的深度图超分辨率重建算法(10 月~12 月)

#### **2017 年 1 月——2017 年 12 月**

- 研究累积误差的处理方法,研究从全局的角度对三维重建中所有的变换参数进行优化处理和误差补偿(1 月~3 月)
- 择时参加国际学术会议或国内学术会议,与相关领域学者进行交流研究(4 月~6 月)
- 研究基于全景镶嵌图像的桥梁缺陷检测与特征量化方法,研究裂缝的特征参数化描述(7 月~9 月)
- 研究桥梁裂缝的多级分类检测方法,研究非线性分类的最优核函数及其参数选择方法(10 月~12 月)

#### **2018 年 1 月——2018 年 12 月**

- 研究从深度图像畸变校正、匹配重建参数累积误差补偿、重建局部过渡区域的无缝平滑处理等多方面解决三维图像重建问题(1 月~3 月)
- 邀请国外知名学者讲学,与相关领域学者进行交流(4 月~6 月)
- 研究三维空间中多深度融合感知的桥梁裂缝缺陷检测方法,解决裂缝在三维空间中的统计特征描述和识别问题(7 月~9 月)
- 研究不同时期全景镶嵌图像序列中裂缝的动态发展评价方法,建立桥梁缺陷安全评价函数研究 (10 月~12 月)

#### **2019 年 1 月——2019 年 12 月**

- 进行算法的设计和程序的全面实现(1 月~3 月)
- 进行算法和程序的全面仿真实验、外场实验、数据分析和算法完善(4 月~6 月)



月)

- 实验结果、实验数据的整理，发表高质量论文、专利等研究成果数篇，撰写总结，成果鉴定或评审(7月~9月)
- 继续进行外场无人机图像多维空间融合感知的桥梁检测实验验证和算法改进与完善工作(10月~12月)

## 5.2 预期研究结果

- (1) 建立基于无人机图像多维空间融合感知的桥梁检测关键技术研究框架，突破多维图像空间的超分辨率致密重建、三维空间中桥梁裂缝的检测、桥梁裂缝发展动态监测与评价等关键技术，取得一些创新性的研究成果；
- (2) 研究裂缝特征在三维空间中的表达方法，融合多传感器特征信息，建立基于数据驱动的多维核函数直方图描述方法，实现有效的三维空间中多深度融合感知的桥梁缺陷检测方法；
- (3) 探索从全局优化角度消除重建过程中的参数累积误差、高精度三维光流匹配方法、彩色图像局部特征引导的超分辨率致密重建等多方面提高三维重建精度的计算方法；
- (4) 本项目的技术成果有望在桥梁安全检测系统的工程样机中得到实际应用；
- (5) 在国际、国内高水平学术刊物上发表相关的高质量研究论文 10~15 篇，可望获得国家发明专利 2 项以上，反映研究工作在理论和技术上的成果与进展；
- (6) 在项目有关研究方向培养青年教师、博士和硕士研究生 12~16 名。