DOI: 10. 19650/j.cnki.cjsi.J1904923

桥梁检测机器人作业规划与位姿优化方法研究*

刘 理[1],王耀南[1],张 辉[2],万 智[3],贾 林[1]

(1.湖南大学电气与信息工程学院 机器人视觉感知与控制技术国家工程实验室 长沙 410082;
2.长沙理工大学电气与信息工程学院 长沙 410076; 3. 湖南桥康智能科技有限公司 长沙 410116)

摘 要:针对桥梁底部病害人工检测的作业难题,介绍了桥梁检测机器人的工作原理,结合桥梁的结构化特征和视觉检测拍摄参数约束,研究了桥梁检测机器人作业规划与位姿优化方法。首先,提出一种以最佳拍摄模型约束的桥梁检测机器人拍摄作业位姿规划方法。在最佳拍摄规划方法的基础上,针对小箱梁桥梁和 T 型梁桥梁底部的褶皱结构,研究了以安全拍摄模型为约束的拍摄位姿优化方法,设计了结合拍摄偏角和拍摄距离的权重函数,推导了优化算法公式并给出了收敛证明。通过对不同拍摄参数的配置,进行了针对空心板桥梁的拍摄作业位姿规划方法仿真;针对小箱梁桥梁的结构,在位姿规划仿真结果基础上进行了位姿优化方法的仿真。最后以研制的桥梁检测机器人为对象,进行了现场测试与验证,仿真和实验结果均表明,该规划和优化方法符合桥梁拍摄检测的要求,具有很好的鲁棒性和实时性。

关键词: 桥梁检测机器人;作业规划;位姿优化;不等式约束优化

中图分类号: TP242. 3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510. 8060

Research on operation planning and position & pose optimization method for bridge inspection robot

Liu Li[1], Wang Yaonan[1], Zhang Hui[2], Wan Zhi[3], Jia Lin[1]

(*1.National Engineering Laboratory for Robot Visual Perception and Control Technology, College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2.School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China; 3.Hunan Bridge-health Intelligent Technology Co., Ltd., Changsha 410116, China*)

Abstract: Aiming at the operation difficulty of disease manual detection on the bottom of the bridge, the working principle of the bridge inspection robot is introduced. Combined with the structural characteristics of the bridge and the constraints of visual inspection shooting parameters, the operation planning and position & pose optimization method of bridge inspection robot are studied. Firstly, a position and pose planning method for shooting operation of bridge inspection robot with the best shooting model constraint is proposed. Based on the optimal shooting planning method, aiming at the folding structure on the bottom of the small box girder bridge and T beam bridge, a shooting position and pose optimization method with the safety shooting model as constraint is studied. The weight function combining the shooting angle and shooting distance is designed. The optimization algorithm formula is derived and the convergence provement is given. Then, through the configuration of different shooting parameters, the simulation of the shooting operation position and pose planning method for hollow slab bridge is carried out. At the same time, on the basis of the simulation results of the position and pose planning, the simulation of the position and pose optimization method is also carried out. Finally, taking the developed bridge inspection robot as the target, field test and verification were carried out. The simulation and experiment results show that the proposed planning and optimization method meets the requirements of bridge shooting detection, and has good robustness and real-time performance.

Keywords: bridge inspection robot; operation planning; position and pose optimization; inequality constrained optimization

收稿日期:2019-03-31 Received Date:2019-03-31

*基金项目:国家自然科学基金项目(61573134,61733004,61601061,61841103)、国家重点研发计划项目(2018YFB1308200)、湖南省科技计划项目(2017XK2102,2018GK2022,2018JJ3079)、湖南省教育厅项目(17C0046)资助

0 引 言

随着我国公路、铁路的迅猛发展,桥梁数量也在迅速增加,截至 2016 年,我国公路桥梁数量已接近 80 万座,成为世界上第一桥梁大国[1-2]。但是,由于桥梁自身结构的退化和缺陷以及没有及时对桥梁进行健康检查和养护,使得桥梁坍塌事故时有发生[3]:2009 年株洲红旗路高架桥垮塌,砸坏车辆 22 台,造成 9 死 16 伤。因此,桥梁安全是关系国计民生的重要事情[4-5]。

桥梁在投入使用后,无法避免的要受到各种自然力的作用及损伤。若是桥梁损伤没有得到及时的发现和修复,就会形成安全隐患[6]。研究表明,90% 的混凝土桥梁的坍塌都与桥梁裂缝有关。桥梁裂缝检测是桥梁安全检测里面一个重要组成部分[7]。若桥梁表面出现裂缝,表明该桥梁已经处于亚健康状态,若是不进行及时的修补,将会导致桥梁内部的钢筋水泥遭受侵蚀腐化,最终可能导致重大的安全问题,这也是桥梁健康恶化的主要原因[8]。桥梁裂缝现场如图 1 所示。

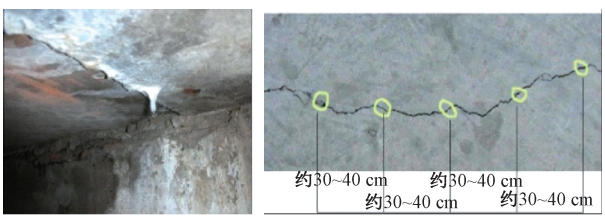


图 1 桥梁常见病害裂缝

Fig.1 Common disease cracks in bridge

目前传统的桥梁检测车大部分采用人工检测或者人工辅助检测,虽然在检测方法和流程上有一些行业技术规定,但是在实际操作时往往还是以人工主观意识为主,这样必然会带来很多病害的漏检[9]。为了提高数据采集的全面性和提升桥梁检测作业效率,本文研究桥梁检测数据采集规划与优化方法,将规划与优化的位姿期望数据和位姿测量结果一起作为输入量,由检测机器人的运动控制系统进行位姿调整,达到最佳拍摄位置和姿态,从而使得检测机器人能够获取桥梁底面、侧面最佳的拍摄图片和激光点云数据[10]。

1 机器人运动规划思路

1.1 机器人系统结构和工作原理

桥梁检测机器人的结构是以重型车辆平台为基础,装载一个 8 自由度的液压机械臂,其末端安装一个 6 自由度灵巧协作机器手[11],在机械手末端安装一个由工业检测相机、线激光扫描传感器、惯性导航传感器等设备组成的桥梁病害检测仪。

机器人工作原理如图 2 所示,通过对检测采集拍摄点的位置规划,组合联动控制车辆平台、液压机械臂和灵巧协作机器手,并融合桥梁病害检测仪的传感数据,完整的拍摄桥梁底侧面的表面图像信息和桥梁结构信息[11]。

图 2 桥梁检测机器人工作原理

Fig.2 Working principle of the bridge inspection robot

1.2 检测作业的运动模式

桥梁由若干桥跨单元组成,每个单元间结构相似度很高,仅在跨度或局部细节尺寸上有略微差异[12-13],因此采集检测任务可以做重复性工作归类。定义一个桥跨间的底面图像采集工作为一个工作单元,提出“长纵短横”循环的具体实现思路:末端采集设备先沿着底盘车辆运动方向进行采集检测,然后调整液压机械臂和末端机器人姿态,以此循环。该采集模式的优点是,车辆底盘运动只在两端换向,使用机械臂和 UR 机器人运动定位精确高、运动灵活和工作效率高。机器人采集模式如图 3 所示。

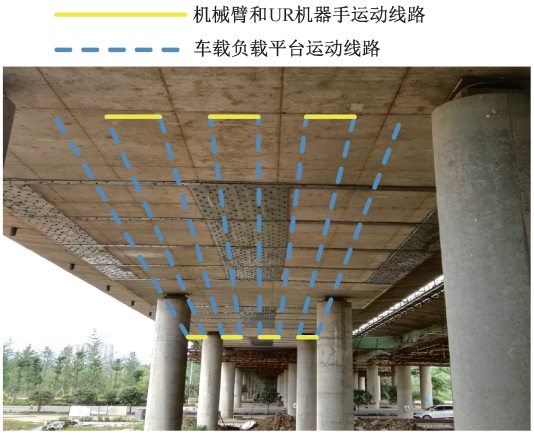


图 3 桥梁检测机器人“长纵短横”循环采集模式

Fig.3 The “long vertical and short horizontal” cycle acquisition mode of the bridge inspection robot

车辆在桥面沿着相同的轨迹进行来回往复运动,液压机械臂和 UR 机器人在车辆停止时进行拍摄位置和姿态调整。车辆行走运动系统有一个轮式滚动编码器,用于测量车辆前后运动变化位移,实时记录车辆运动过程中位置数据,并用编码器信号等间隔触发工业相机和裂

纹检测激光完成触发采集。其优点是即使车速变化,相机和结构激光在桥下拍摄结果也是等间距,适合后期桥底面图像拼接和病害检测定位。

1.3　规划坐标系和参数定义

桥梁结构类型主要有小箱梁、大箱梁、T 型梁和空心板等几类,其中大箱梁和空心板具有相似结构[14]。几类主要桥梁横截面结构如图 4 所示。

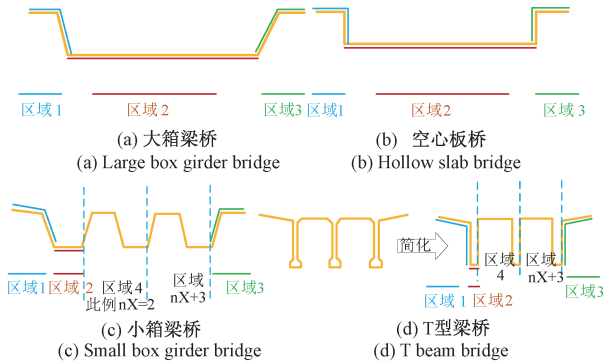


图 4　桥梁类型定义

Fig.4　Bridge type definition

本文将桥梁截面划分成不同区域,大箱梁和空心板桥梁有 3 个固定区域,分别为左右各一个侧面区域和一个底面区域,如图 4(a)和 4(b)所示。小箱梁区域数量为nX+3,其中 nX 为桥梁底面具备完整梯形起伏结构的个数,小箱梁截面如图 4(c)所示。T 型梁区域数量为nX+3,其中 nX 为桥梁底面具备完整的“Π”结构的个数,如图 4(d)所示。T 型梁截面底部是马蹄形,内部为近似矩形结构,其边缘有斜边倒角,将其简化成矩形[15]。以桥梁横截面结构为对象,对桥梁坐标和结构参数进行归一化定义。桥梁坐标系$\{b\}$的 Y 轴则为桥梁横截面的桥面从桥梁外侧指向内侧,Z 轴则垂直于桥面离开地心方向。原点为桥面最外侧上边缘与桥梁检测工作起始位置横截面交点。

桥面厚度为 H_b,为了简化规划计算,将坐标轴沿着 $Z-$方向平移 H_b,这样规划坐标系$\{X-Y-Z\}$方向与$\{b\}$一致,原点为桥梁最外侧面下边沿与桥梁检测工作起始位置横截面的交点,如图 5(a)所示。桥梁类型定义分为 3 类:

1)空心板(大箱梁),定义的桥梁横截面结构参数有 $L_1,L_2,L_3,\theta_1,\theta_2$,如图 5(b)所示,$L_1$:从桥梁外侧下边缘顶点开始的侧面第一条直线段长度;L_2:接着 L_1 拐弯的侧面第二条直线段长度;L_3:桥梁底面宽度;θ_1:从桥梁外侧下边缘顶点开始的侧面第一条直线段与桥面水平线夹角,$\theta_1\in[0,90°)$;θ_2:接着 L_1 拐弯的侧面第二条直线段与桥面水平线夹角,通常 $\theta_2>\theta_1$,$\theta_2\in(\theta_1,90°)$。

2)小箱梁,定义的桥梁横截面结构参数有 $L_1,L_2,L_3,L_4,\theta_1,\theta_2,nX$,如图 5(c)所示,$L_1$:从桥梁外侧下边缘顶点开始的侧面第一条直线段长度;L_2:接着 L_1 拐弯的侧面第二条直线段长度;L_3:小箱梁最底面梯形下直线段长度;L_4:小箱梁内部梯形上直线段长度;θ_1:从桥梁外侧下边缘顶点开始的侧面第一条直线段与桥面水平线夹角,$\theta_1\in[0,90°)$;θ_2:接着 L_1 拐弯的侧面第二条直线段与桥面水平线夹角,通常 $\theta_2>\theta_1$,$\theta_2\in(\theta_1,90°)$;$nX$:小箱梁完整的箱梁梯形个数。

3)T 型梁,定义的桥梁横截面结构参数有 $L_1,L_2,L_3,L_4,\theta_1,nX$,如图 5(d)所示,具体定义如下。$L_1$:从桥梁外侧下边缘顶点开始的侧面第一条直线段长度;L_2:T 型梁垂直线段高度;L_3:T 型梁底部宽度;L_4:T 型梁矩形内部上直线段宽度;θ_1:从桥梁外侧下边缘顶点开始的侧面第一条直线段与桥面水平线夹角,$\theta_1\in[0,90°)$;nX:T 型梁完整“Π”结构个数。

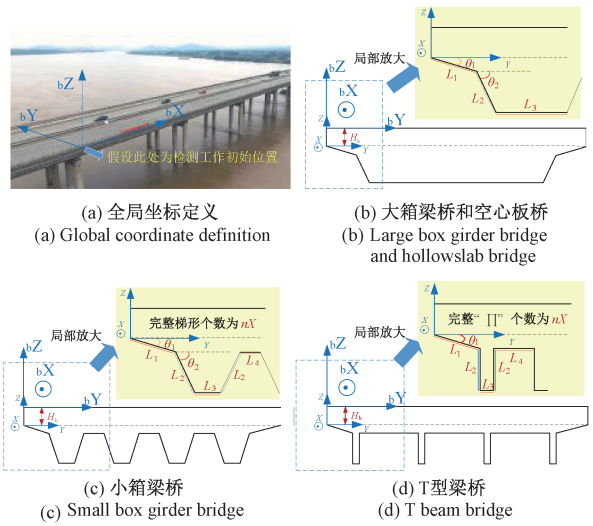


图 5　桥梁横截面坐标和结构参数定义

Fig.5　Coordinates and structural parameter definition of the bridge cross section

2　桥底面视觉拍摄位姿规划方法

2.1　视觉采集参数定义

我们选用的工业相机为 JAI 公司的 SP 20000,相机水平视场角 $\theta_w=22°$,视觉系统最佳拍摄距离 L 为 2~2.5 m,3 个相机相互相隔 $S=100$ mm,多相机拍摄重叠率 $\rho=50\%$,视觉成像系统水平视场角 θ_{all_w} 依据几何关系计算为:

$$\theta_{all_w}=2\tan^{-1}\frac{2L\tan\left(\frac{\theta_w}{2}\right)\times(0.5+\rho)-S}{L}=$$

$2\tan^{-1}\dfrac{0.39\,L\text{-}S}{L}$

其中 $\dfrac{0.39\,L-S}{L}<1$，设 $\dfrac{S}{L}=\tau$

$$\theta_{all_w}=2\tan^{-1}(0.39-\tau) \tag{1}$$

$\tan^{-1}(x)$ 在 $|x|<1$ 时的泰勒展开式为：

$$\tan^{-1}(x)=\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n\frac{x^{2n+1}}{2n+1},\ |x|<1 \tag{2}$$

$$\theta_{all_w}\approx 0.74-1.70\tau-0.78\tau^2\approx 0.74-1.70\tau \tag{3}$$

实际应用中 $\tau=\dfrac{100\ \text{mm}}{2\ 000\ \text{mm}}=5\%$，代入公式(3)，$\theta_{all_w}\approx 0.66\approx 38°$。考虑由于振动导致拍摄距离 $L=1\ 700$ mm 和 2 300 mm 时，计算可得 $\theta_{all_w}\approx 37°$ 和 38°，因此，在振动误差范围内，θ_{all_w} 变化不显著，因此可以取 $\theta_{all_w}=38°$。本文研究的规划方法将拍摄距离 L，相机组水平视场角 θ_{all_w} 和拍摄重叠率 ρ 做为最佳拍摄规划输入参数，计算坐标系 $\{Y-Z\}$ 下的二维坐标 (y,z) 和姿态方向角 β。

2.2 最佳拍摄参数约束位姿规划方法

为了获得最佳拍摄质量的图片数据，以拍摄参数最优作为问题约束，以桥梁横截面结构参数和视觉采集参数作为输入参数，求解约束问题的理论最优解序列。问题建模描述如下：

以桥梁横截面底面轮廓为起点，确保每次拍摄图像的重叠度为 ρ，拍摄点镜头光轴与物表面垂直，而且物距为 L；在轮廓线拐点处独立设置一个拍摄位姿规划点，光轴沿着内角(外角)平分线方向。

计算思路：以底面端点 O_0 为起点，单次成像增加长度为 λ

$$\lambda=\rho\times 2L\times\tan\left(\frac{\theta_{all_w}}{2}\right) \tag{4}$$

以 λ 为单次计算步长，计算 $\{Y-Z\}$ 坐标系下成像中心点坐标位置，其中在直线拐角处也增加一个成像中心点，最终得到成像中心点序列 $\{O_i\}=\{(y_{oi},z_{oi})\}$，$i=0,1,2,3\cdots$，如图 6 所示。

假设拍摄点位置坐标 $\{P_i\}=(y_i,z_i)$，直线 P_iO_i 垂直于被拍摄面，如果 O_i 为线段拐点，则 P_iO_i 为 $\angle O_{i-1}O_iO_{i+1}$ 的内角(外角)平分线，规划方法计算步骤如下：

1) O_0：

$$(y_{o0},z_{o0})=(0,0) \tag{5}$$

2) O_i：

$$(y_{oi},z_{oi})=(i\times\lambda\times\cos\theta_1,i\times\lambda\times\sin(-\theta_1)) \tag{6}$$

满足条件：O_i 在直线段 L_1 之内，即：$i\times\lambda<L_1$

3) O_i：

$$(y_{oi},z_{oi})=(L_1\times\cos\theta_1,L_1\times\sin(-\theta_1)) \tag{7}$$

满足条件：O_i 在直线段 L_1 与直线段 L_2 连接拐角处，即：

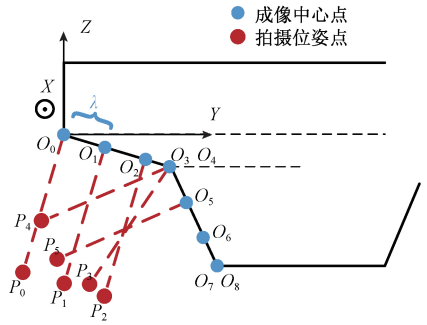


图 6 最佳拍摄参数位姿规划模型

Fig.6 Position and pose planning model of optimal shooting parameters

$$(i-1)\times\lambda<L_1,i\times\lambda>L_1$$

4) O_i：

$$(y_{oi},z_{oi})=(L_1\times\cos\theta_1,L_1\times\sin(-\theta_1)) \tag{8}$$

满足条件：O_i 也在直线段 L_1 与直线段 L_2 连接拐角处，也是 L_2 的起点，与前一点 O_{i-1} 坐标相同，即：

$$(y_{oi},z_{oi})=(y_{oi-1},z_{oi-1})$$

5) O_i：

$$y_{oi}=L_1\times\cos\theta_1+(i-i_{L_1}-2)\times\lambda\times\cos\theta_2 \tag{9}$$

$$z_{oi}=L_1\times\sin(-\theta_1)+(i-i_{L_1}-2)\times\lambda\times\sin(-\theta_2) \tag{10}$$

式中：i_{L_1} 为处于 L_1 线段末端的 O_i 的标号，L_1 与 L_2 相交拐点不算，$i_{L_1}=\left[\dfrac{L_1}{\lambda}\right]$，满足条件：$O_i$ 在直线段 L_2 之内，即：

$$(i-i_{L_1}-2)\times\lambda<L_2$$

6) O_i：

$$y_{oi}=L_1\times\cos\theta_1+L_2\times\cos\theta_2 \tag{11}$$

$$z_{oi}=L_1\times\sin(-\theta_1)+L_2\times\sin(-\theta_2) \tag{12}$$

满足条件：O_i 在直线段 L_2 与直线段 L_3 连接拐角处，即：

$$(i-i_{L_1}-3)\times\lambda<L_2,(i-i_{L_1}-2)\times\lambda>L_2$$

7) O_i：

$$y_{oi}=L_1\times\cos\theta_1+L_2\times\cos\theta_2 \tag{13}$$

$$z_{oi}=L_1\times\sin(-\theta_1)+L_2\times\sin(-\theta_2) \tag{14}$$

满足条件：O_i 也在直线段 L_2 与直线段 L_3 连接拐角处，也是 L_3 的起点，与前一点 O_{i-1} 坐标相同，即：

$$(y_{oi},z_{oi})=(y_{oi-1},z_{oi-1})$$

8) O_i：

$$y_{oi}=L_1\times\cos\theta_1+L_2\times\cos\theta_2+(i-i_{L_2}-2)\times\lambda \tag{15}$$

$$z_{oi}=L_1\times\sin(-\theta_1)+L_2\times\sin(-\theta_2) \tag{16}$$

式中：i_{L_2} 为处于 L_2 线段末端的 O_i 的标号，L_2 与 L_3 相交拐点不算，$i_{L_2}=\left[\dfrac{L_1}{\lambda}\right]+\left[\dfrac{L_2}{\lambda}\right]+2$，满足条件：$O_i$ 在桥梁底面

直线段 L_3 之内,即:

$$(i - i_{L_2} - 2) * \lambda < L_3$$

9) O_i:

$$y_{oi} = L_1 \times \cos\theta_1 + L_2 \times \cos\theta_2 + L_3 \tag{17}$$

$$z_{oi} = L_1 \times \sin(-\theta_1) + L_2 \times \sin(-\theta_2) \tag{18}$$

满足条件:O_i 在桥梁底面直线段 L_3 与桥梁另一端侧面直线段 L_2 连接拐角处,即:

$$(i - i_{L_2} - 3) \times \lambda < L_3, (i - i_{L_2} - 2) \times \lambda > L_3$$

10) O_i:

$$y_{oi} = L_1 \times \cos\theta_1 + L_2 \times \cos\theta_2 + L_3 \tag{19}$$

$$z_{oi} = L_1 \times \sin(-\theta_1) + L_2 \times \sin(-\theta_2) \tag{20}$$

满足条件:O_i 也在桥梁底面直线段 L_3 与桥梁另一端侧面直线段 L_2 连接拐角处,也是桥梁另一侧面 L_2 的起点,与前一点 O_{i-1} 坐标相同,即:

$$(y_{oi}, z_{oi}) = (y_{oi-1}, z_{oi-1})$$

11) O_i:

$$y_{oi} = L_1 \times \cos\theta_1 + L_2 \times \cos\theta_2 + L_3 + (i - i_{L_3} - 2) \times \lambda \times \cos\theta_2 \tag{21}$$

$$z_{oi} = L_1 \times \sin(-\theta_1) + L_2 \times \sin(-\theta_2) + (i - i_{L_3} - 2) \times \lambda \times \sin\theta_2 \tag{22}$$

式中:i_{L_3} 为处于 L_3 线段末端的 O_i 的标号,L_3 与桥梁对侧 L_2 相交拐点不算,$i_{L_3} = \left[\frac{L_1}{\lambda}\right] + \left[\frac{L_2}{\lambda}\right] + \left[\frac{L_3}{\lambda}\right] + 4$,满足条件:$O_i$ 在对侧直线段 L_2 之内,即:

$$(i - i_{L_3} - 2) \times \lambda < L_2$$

12) O_i:

$$(y_{oi}, z_{oi}) = (L_1 \times \cos\theta_1 + 2 \times L_2 \times \cos\theta_2 + L_3, L_1 \times \sin(-\theta_1)) \tag{23}$$

满足条件:O_i 在桥梁对侧直线段 L_2 与对侧直线段 L_1 连接拐角处,即:

$$(i - i_{L_3} - 3) \times \lambda < L_2, (i - i_{L_3} - 2) \times \lambda > L_2$$

13) O_i:

$$(y_{oi}, z_{oi}) = (L_1 \times \cos\theta_1 + 2 \times L_2 \times \cos\theta_2 + L_3, L_1 \times \sin(-\theta_1)) \tag{24}$$

满足条件:O_i 也在桥梁对侧直线段 L_2 与对侧直线段 L_1 连接拐角处,也是桥梁另一侧面 L_1 的起点,与前一点 O_{i-1} 坐标相同,即:

$$(y_{oi}, z_{oi}) = (y_{oi-1}, z_{oi-1})$$

14) O_i:

$$y_{oi} = L_1 \times \cos\theta_1 + 2 \times L_2 \times \cos\theta_2 + L_3 + (i - i_{L'_2} - 2) \times \lambda \times \cos\theta_1 \tag{25}$$

$$z_{oi} = L_1 \times \sin(-\theta_1) + (i - i_{L'_2} - 2) \times \lambda \times \sin\theta_1 \tag{26}$$

式中:$i_{L'_2}$ 为处于桥梁对侧 L_2 线段末端的 O_i 的标号,桥梁对侧 L_2 与桥梁对侧 L_1 相交拐点不算,$i_{L'_2} = \left[\frac{L_1}{\lambda}\right] + 2 * \left[\frac{L_2}{\lambda}\right] + \left[\frac{L_3}{\lambda}\right] + 6$,满足条件:$O_i$ 在对侧直线段 L_1 之内,即:

$$(i - i_{L'_2} - 2) * \lambda < L_1$$

以上 14 个分段步骤为求解成像中心点坐标 $\{O_i\} = \{(y_{oi}, z_{oi})\}$,接下来按照垂直拍摄和拐角处平分角拍摄的要求,计算方向角 β_i(定义为 $\{Y - Z$ 坐标系$\}$)如下,计算步骤序号 1) ~ 14) 分别与 $\{O_i\}$ 计算步骤序号 1) ~ 14) 对应:

1) P_0:$\beta_0 = \frac{\pi}{2} - \theta_1$　　2) P_i:$\beta_i = \frac{\pi}{2} - \theta_1$

3) P_i:$\beta_i = \frac{\pi - \theta_1 - \theta_2}{2}$　　4) P_i:$\beta_i = \frac{\pi}{2} - \theta_2$

5) P_i:$\beta_i = \frac{\pi}{2} - \theta_2$　　6) P_i:$\beta_i = \frac{\pi - \theta_2}{2}$

7) P_i:$\beta_i = \frac{\pi}{2}$　　8) P_i:$\beta_i = \frac{\pi}{2}$

9) P_i:$\beta_i = \frac{\pi + \theta_2}{2}$　　10) P_i:$\beta_i = \frac{\pi}{2} + \theta_2$

11) P_i:$\beta_i = \frac{\pi}{2} + \theta_2$　　12) P_i:$\beta_i = \frac{\pi + \theta_1 + \theta_2}{2}$

13) P_i:$\beta_i = \frac{\pi}{2} + \theta_1$　　14) P_i:$\beta_i = \frac{\pi}{2} + \theta_1$

由成像中心点与拍摄点的方向角 β_i 计算拍摄点位置坐标位 $\{P_i\} = (y_i, z_i)$。与 $\{O_i\}$ 满足的成立条件相同,计算公式如下:

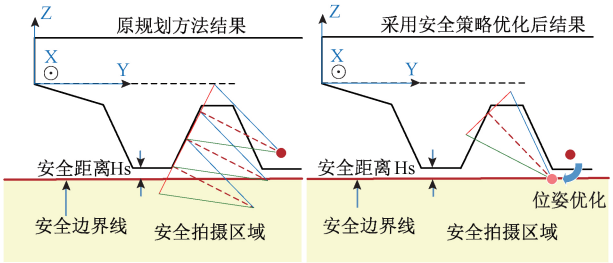
$$(y_i, z_i) = (L \times \cos(\beta_i + \pi) +, L \times \sin(\beta_i + \pi)) + (y_{oi}, z_{oi}) \tag{27}$$

将 β_i 和 (y_{oi}, z_{oi}) 带入公式(27)计算可得 1) ~ 14) 步骤的 (y_i, z_i)。

小箱梁桥和 T 型梁桥与空心板桥和大箱梁桥的结构区别是前者有 nX 段上下起伏结构,其规划方法和计算过程与后者基本相同,只是在起伏段对规划布置进行循环重复。小箱梁和 T 型梁的循环重复规划位姿具有很大程度的相似性,因此将规划方法中若干步骤进行循环重复计算即可实现小箱梁起伏梯形结构和 T 型梁"Π"结构的位姿规划。

3　安全保护约束位姿优化方法

因小箱梁底面向内凹进的结构使得通过最佳拍摄参数约束位姿规划方法计算的作业点不完全符合工程应用,如图 7(a)所示。因此,采用安全保护策略对位姿规划结果进行优化,为了确保检测设备安全,定义一个安全工作高度,即末端拍摄位置距离桥梁最低面的最小距离 H_s。优化思路是事规划结果能够满足安全同时,达到最佳拍摄效果,如图 7(b)所示。



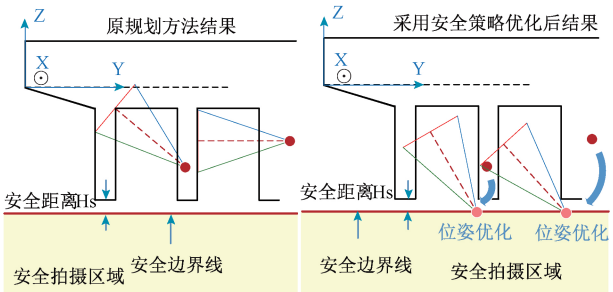
(a) 优化前位姿 (b) 优化后位姿

(a) Position and pose before optimization (b) Position and pose after optimization

图 7 采用安全保护策略的小箱梁桥梁位姿优化

Fig.7 Position and pose optimization of small box girder bridge adopting safety protection strategy

如图 8 所示,T 型梁“Π”结构的上底面距离拍摄安全边界线的距离大于拍摄参数 L,因此,也必须采用安全保护策略对位姿规划结果进行优化。



(a) 优化前位姿 (b) 优化后位姿

(a) Position and pose before optimization (b) Position and pose after optimization

图 8 采用安全保护策略的 T 型梁桥梁位姿优化

Fig.8 Position and pose optimization of T beam bridge adopting safety protection strategy

基于安全保护策略的位姿优化方法思路具体计算方法,如图 9 所示,原位姿点 A 如果修正到位姿点 B,此时拍摄角度是该条件下最优结果,但是却不在安全区域之内,因此只能将位姿调整为 C 点才是当前可行的最佳优化结果。

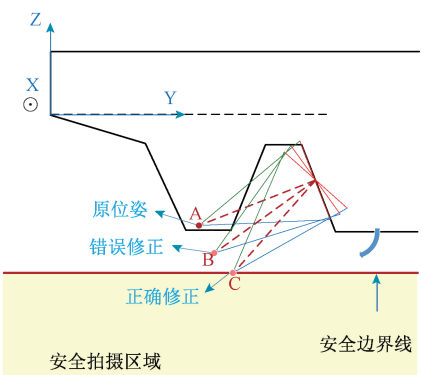


图 9 正确的位姿修正

Fig.9 Correct position and pose correction

因为有多种拍摄参数的要求,会出现按照给定参数要求而无解情况,因此将位姿修正问题可以描述为,在一定约束条件下求解计算最优解问题。

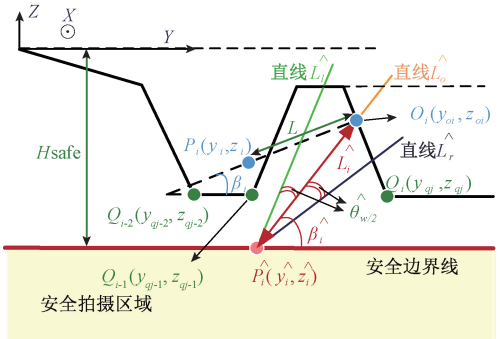


图 10 优化方法数学模型

Fig.10 Mathematical model of the optimization method

如图 10 所示,优化计算数学模型参数有:

采用最佳拍摄位置规划方法获得的输入参数:当前成像中心点坐标 $\{O_i\}=\{(y_{oi},z_{oi})\}$;拍摄点坐标 $\{P_i\}=\{(y_i,z_i)\}$;拍摄点姿态方向角 β_i。

计算输入参数:最佳拍摄距离 L;安全线高度;H_{safe};相机组视场角 θ_{all_w} 经过修正后的视场半角 $\hat{\theta}_{w/2}$;桥底面拐点坐标序列 $\{Q_j\}=\{(y_{qj},z_{qj})\}$。

其中 $\hat{\theta}_{w/2}$ 计算时考虑会有遮挡情况出现(例如底面拐角挡住内侧面拍摄,如图 9 中 B 点所示),以相机组半视角 $\frac{\theta_{all_w}}{2}$ 的为基数,多预留 20%,则

$$\hat{\theta}_{w/2}=120\%\times\frac{\theta_{all_w}}{2}=0.6*\theta_{all_w} \tag{28}$$

优化计算输出参数:拍摄点优化坐标 $\{\hat{P_i}\}=\{(\hat{y_i},\hat{z_i})\}$;姿态优化方向角 $\hat{\beta_i}$;优化后的拍摄距离 $\hat{L_i}$。

优化计算过程如下:

优化后的拍摄坐标点为 $\{\hat{P_i}\}=\{(\hat{y_i},\hat{z_i})\}$,姿态优化方向角为 $\hat{\beta_i}$,连接 $\hat{P_i}O_i$ 的直线 $\hat{L_o}$ 的方程为:

直线 $\hat{L_o}$:

$$\sin\hat{\beta_i}(y-y_{oi})-\cos\hat{\beta_i}(z-z_{oi})=0 \tag{29}$$

相机组拍摄视角左视角线 $\hat{L_l}$ 方程为:

直线 $\hat{L_l}$:

$$\sin(\hat{\beta_i}+\hat{\theta_{\frac{w}{2}}})(y-y_{oi})-\cos(\hat{\beta_i}+\hat{\theta_{\frac{w}{2}}})(z-z_{oi})=0 \tag{30}$$

相机组拍摄视角右视角线 $\hat{L_r}$ 方程为:

直线 $\hat{L_r}$:

$$\sin(\hat{\beta_i}-\hat{\theta_{\frac{w}{2}}})(y-y_{oi})-\cos(\hat{\beta_i}-\hat{\theta_{\frac{w}{2}}})(z-z_{oi})=0 \tag{31}$$

以桥梁的基本结构参数通过几何推导计算出桥梁底面拐点的坐标序列 $\{Q_j\}=\{(y_{qj},z_{qj})\}$。如果拍摄成像面

受到桥底面拐点的阻挡,即至少有一个桥底面拐点出现在相机视场范围之内,并且拐点距离远小于标准拍摄距离。桥底面拐点出现在相机视场范围之内,即$\overrightarrow{P_i^{\hat{}}Q_j}$的方向角$\beta_{P_i^{\hat{}}Q_j} \in (\beta_i^{\hat{}} - \theta_{w/2}^{\hat{}}, \beta_i^{\hat{}} + \theta_{w/2}^{\hat{}})$。

参考桥梁设计经验和实验测试,大部分桥梁的结构参数 L_2 均在 3 m 以内,而拍摄距离 $L \in [1.5\ \mathrm{m}, 3\ \mathrm{m}]$,遮挡情况仅仅只有底面拐角(图 10{$Q_j$})出现在拍摄视野内,此时$|\overrightarrow{P_i^{\hat{}}Q_j}|$约为 $L - L_2$,L_2 小于并接近 L,因此$|\overrightarrow{P_i^{\hat{}}Q_j}| \ll L$,设$|\overrightarrow{P_i^{\hat{}}Q_j}| < \sigma L$。$\sigma$ 数值选取是为了将桥底面遮挡的情况进行量化。从工程应用角度分析,σ 的取值仅决定是否可以滤除桥梁拐点遮挡拍摄的情况,且随着 σ 的增加,对计算结果的影响越小,σ 只需做概略的估计。大部分应用时选取 $H_s = 500$ mm,最佳拍摄距离 L 为 2 500 mm,如果桥梁底面拐角遮挡了桥梁拍摄目标时,$|\overrightarrow{P_i^{\hat{}}Q_j}|$近似等于安全距离 H_s,因此 σ 估算为$\frac{|\overrightarrow{P_i^{\hat{}}Q_j}|}{L} \approx \frac{500}{2\ 500} = 0.2$,预留一倍安全余量,$\sigma$ 取大于 0.4 均可。成像系统的前景深调节到约为 482 mm,因此取 $\sigma = 0.7 < \frac{2\ 500 - 482}{2\ 500} = 0.8$,使得 σL 略小于最短成像距离。则拍摄成像面不受桥梁底面拐点阻挡时,应满足公式:

$$\beta_{P_i^{\hat{}}Q_j} = \tan^{-1}\frac{z_{qj} - z_i^{\hat{}}}{y_{qj} - y_i^{\hat{}}} \geqslant \beta_i^{\hat{}} + \theta_{w/2}^{\hat{}} \tag{32}$$

或

$$\beta_{P_i^{\hat{}}Q_j} = \tan^{-1}\frac{z_{qj} - z_i^{\hat{}}}{y_{qj} - y_i^{\hat{}}} \geqslant \beta_i^{\hat{}} - \theta_{w/2}^{\hat{}} \tag{33}$$

或

$$|\overrightarrow{P_i^{\hat{}}Q_j}| = \sqrt{(y_{qj} - y_i^{\hat{}})^2 + (z_{qj} - z_i^{\hat{}})^2} \geqslant 0.7\ L \tag{34}$$

优化点坐标 $\{P_i^{\hat{}}\} = \{(y_i^{\hat{}}, z_i^{\hat{}})\}$ 必在安全边界线以下,即

$$z_i^{\hat{}} \geqslant -H_{safe} \tag{35}$$

将 $z_i^{\hat{}}$ 代入公式(27)计算得

$$z_i^{\hat{}} = L \times \sin(\beta_i^{\hat{}} + \pi) + z_{oi} = -L \times \sin\beta_i^{\hat{}} + z_{oi} \tag{36}$$

将(36)代入(35)可得,

$$L_i^{\hat{}}\sin\beta_i^{\hat{}} - z_{oi} - H_{safe} \geqslant 0 \tag{37}$$

求解 $\beta_i^{\hat{}}$,使其越接近 β_i,即 $\min|\beta_i^{\hat{}} - \beta_i|$;求解 $L_i^{\hat{}}$,使其越接近 L,即 $\min|L_i^{\hat{}} - L|$。以上两个目标函数进行最优求解时,容易出现 $|\beta_i^{\hat{}} - \beta_i|$最小,但是 $|L_i^{\hat{}} - L|$不是最小的情况,因此我们引入尺度权重因子 $\varepsilon \in (0,1)$,即求解

$$\min\left(\varepsilon\frac{|\beta_i^{\hat{}} - \beta_i|}{\beta_i} + (1-\varepsilon)\frac{|L_i^{\hat{}} - L|}{L}\right)$$

综上所述,约束最优化问题(1)描述为

$$\min f(\beta_i^{\hat{}}, L_i^{\hat{}}) = \varepsilon\frac{|\beta_i^{\hat{}} - \beta_i|}{\beta_i} + (1-\varepsilon)\frac{|L_i^{\hat{}} - L|}{L}, \varepsilon \in (0,1) \tag{38}$$

$$\text{s.t. } g_0(\beta_i^{\hat{}}, L_i^{\hat{}}) = L_i^{\hat{}}\sin\beta_i^{\hat{}} - z_{oi} - H_{safe} \geqslant 0 \tag{39}$$

$$g_{j1}(\beta_i^{\hat{}}, L_i^{\hat{}})|_{Q_j} = \tan^{-1}\frac{z - z_i^{\hat{}}}{y - y_i^{\hat{}}}\Big|_{(y=y_{qj}, z=z_{qj})} - \beta_i^{\hat{}} - \theta_{w/2}^{\hat{}} \geqslant 0 \tag{40}$$

或

$$g_{j2}(\beta_i^{\hat{}}, L_i^{\hat{}})|_{Q_j} = -\tan^{-1}\frac{z - z_i^{\hat{}}}{y - y_i^{\hat{}}}\Big|_{(y=y_{qj}, z=z_{qj})} + \beta_i^{\hat{}} - \theta_{w/2}^{\hat{}} \geqslant 0 \tag{41}$$

或

$$g_{j3}(\beta_i^{\hat{}}, L_i^{\hat{}})|_{Q_j} = \sqrt{(y_{qj} - y_i^{\hat{}})^2 + (z_{qj} - z_i^{\hat{}})^2} \geqslant 0.7\ L \tag{42}$$

求解范围为

$$\beta_i^{\hat{}} \in [0, \pi], L_i^{\hat{}} \in [0.5\ L, 1.5\ L] \tag{43}$$

其中 i 为当前优化点的下标,$i = 0, 1 \cdots n$,n 为需要安全保护优化的拍摄点个数,每个拍摄点优化均需要求解一次最优问题;其中 j 为桥底面拐点序列点的下标,$j = 0, 1 \cdots m$,m 为桥底面拐点个数;$g_{j1}(\beta_i^{\hat{}})|_{Q_j}$ 和 $g_{j2}(\beta_i^{\hat{}})|_{Q_j}$ 为 m 维代数式,是(y_{qj}, z_{qj})带入 $g_{j1}(\beta_i^{\hat{}})$ 和 $g_{j2}(\beta_i^{\hat{}})$ 的结果。

求解范围依据优化算法的工程意义确定:$\beta_i^{\hat{}} \in [0, \pi]$ 表示拍摄姿态只能向上;0.5 L 和 1.5 L 则是视觉成像质量较好的近远极限位置,超过该范围则基本无法拍摄清晰图像,实际优化计算时可根据成像质量要求缩小范围。

1)不等式约束优化问题的代数求解方法

为了求解不等式约束的最优化问题,将不等式约束方程变换为取值的可行域[16],进一步将不等式约束优化问题等效为以下具备可行域的无约束问题(2),即为:

$$\min f(\beta_i^{\hat{}}, L_i^{\hat{}}) = \varepsilon\frac{|\beta_i^{\hat{}} - \beta_i|}{\beta_i} + (1-\varepsilon)\frac{|L_i^{\hat{}} - L|}{L}, \varepsilon \in (0,1) \tag{44}$$

可行域为,

$$D = \{(\beta_i^{\hat{}}, L_i^{\hat{}}) \mid g_0(\beta_i^{\hat{}}, L_i^{\hat{}})) \geqslant 0 \cap (g_{j1}(\beta_i^{\hat{}}, L_i^{\hat{}})|_{Q_j} \geqslant 0 \cup g_{j2}(\beta_i^{\hat{}}, L_i^{\hat{}})|_{Q_j} \geqslant 0 \cup g_{j3}(\beta_i^{\hat{}}, L_i^{\hat{}})|_{Q_j} \geqslant 0) \cap g_1(\beta_i^{\hat{}}) \geqslant 0 \cap g_2(\beta_i^{\hat{}}) \geqslant 0 \cap g_3(L_i^{\hat{}}) \geqslant 0 \cap g_4(L_i^{\hat{}}) \geqslant 0\} \tag{45}$$

其中,

$$g_0(\beta_i^{\hat{}}, L_i^{\hat{}}) = L_i^{\hat{}}\sin\beta_i^{\hat{}} - z_{oi} - H_{safe}$$

$$g_{j1}(\beta_i^{\hat{}}, L_i^{\hat{}})|_{Q_j} = \tan^{-1}\frac{z - z_i^{\hat{}}}{y - y_i^{\hat{}}}\Big|_{(y=y_{qj}, z=z_{qj})} - \beta_i^{\hat{}} - \theta_{w/2}^{\hat{}}$$

$$g_{j2}(\beta_i^{\hat{}}, L_i^{\hat{}})|_{Q_j} = -\tan^{-1}\frac{z - z_i^{\hat{}}}{y - y_i^{\hat{}}}\Big|_{(y=y_{qj}, z=z_{qj})} + \beta_i^{\hat{}} - \theta_{w/2}^{\hat{}}$$

$$g_1(\beta_i^{\hat{}}) = \beta_i^{\hat{}}$$

$$g_2(\beta_i^{\hat{}}) = \pi - \beta_i^{\hat{}}$$

$g_3(\hat{L_i}) = \hat{L_i}$

$g_4(\hat{L_i}) = 1.5\ L - \hat{L_i}$

求解上述可行域约束问题,采用罚函数方法[17]如下:

设函数 $S_k(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) = min^2\{g_k(\hat{\beta_i},\hat{L_i}),0\}$,则构造函数,

$$S(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) = \sum_{k=0}^{4} S_k(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) + \sum_{j=0}^{m}\left(\prod_{k=0}^{3} S_{jk}(\hat{\beta_i},\hat{L_i})\right) \tag{46}$$

继续构造罚函数 $P_\mu(\hat{\beta_i},\hat{L_i})$

$$P_\mu(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) = \frac{1}{2}\mu S(\hat{\beta_i},\hat{L_i}),\text{取}\mu > 0,\text{且}\mu\text{较大} \tag{47}$$

为无约束问题(2)构造辅助函数

$$F_\mu(\hat{\beta_i},\hat{L_i})F_\mu(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) = f(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) + P_\mu(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) \tag{48}$$

则,

$$\begin{cases} F_\mu(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) = f(\hat{\beta_i},\hat{L_i}),\ \forall(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) \in D \\ F_\mu(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) > f(\hat{\beta_i},\hat{L_i}),\ \forall(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) \notin D \end{cases} \tag{49}$$

当 $(\hat{\beta_i},\hat{L_i})$ 远离可行域 D 时,有 $F_\mu(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) \gg f(\hat{\beta_i},\hat{L_i})$。求解方程组,

$$\begin{cases} \dfrac{\partial F_\mu(\hat{\beta_i},\hat{L_i})}{\partial \hat{\beta_i}} = 0 \\ \dfrac{\partial F_\mu(\hat{\beta_i},\hat{L_i})}{\partial \hat{L_i}} = 0 \end{cases} \tag{50}$$

即可获得最优解 $(\hat{\beta_{ibest}},\hat{L_{ibest}})$[18]。

采用计算机数值序列迭代求解算法(2)如下:

步骤 0)取初始点 $(\beta_i^0,L_i^0) \in (R,R)$,罚参数序列 $\{\mu_h\}$,精度 $\delta > 0$。令 $h = 0$。

步骤 1)构造增广目标函数

$$F_\mu(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) = f(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) + P_\mu(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) = f(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) + \frac{1}{2}\mu_h\left(\sum_{k=0}^{4} S_k(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) + \sum_{j=0}^{m}\left(\prod_{k=0}^{3} S_{jk}(\hat{\beta_i},\hat{L_i})\right)\right) \tag{51}$$

步骤 2)求解无约束问题

$\min F_\mu(\hat{\beta_i},\hat{L_i}),(\hat{\beta_i},\hat{L_i}) \in (R,R)$

步骤 3)终止准则:惩罚项充分小,或等价的 (β_i^h,L_i^h) 近似可行,若

$$P_\mu(\beta_i^h,L_i^h) \geqslant \delta \tag{52}$$

或者

$$-\min\{g_i(\beta_i^h,L_i^h) \mid i \in I\} \geqslant \delta \tag{53}$$

式中:I 表示所有不等式约束集合。

满足精度控制公式(52)或(53)则解得 $(\hat{\beta_{ibest}},\hat{L_{ibest}})$,否则,令 $h = h + 1$,转步骤 1。

2)不等式约束优化问题的数值求解方法

此不等式约束优化问题(1)的数值迭代算法(3)步骤如下:

以 (β_i,L) 为初始点,选取适合的搜索步长 λ_{β_i} 和 λ_L,代入公式(38)进行计算

将当期数值代入公式(39)-(42)使得不等式成立的结果作为备选解集合,对代入公式(38)的结果进行排序从备选解集合中,选择代入公式(38)最小值的数值结果所对应的解 $(\hat{\beta_{ibest}},\hat{L_{ibest}})$。

4 仿真与实验

4.1 最佳拍摄参数约束位姿规划方法的仿真结果

在 2.2 节之中,介绍了桥底面视觉拍摄位姿规划方法及算法实现步骤,为了验证规划方法的正确性,用 MATLAB 进行组合参数对比仿真。桥梁结构参数为 $L_1 = 473$ mm,$L_2 = 1\ 809$ mm,$L_3 = 6\ 000$ mm,$\theta_1 = 0°$,$\theta_2 = 76°$,取自长沙市东六路与龙华路交汇处一座空心板桥梁。相机拍摄参数组合如表 1 所示,分别取 L,θ_{all_w} 和 ρ 的 12 组参数组合进行仿真测试。

表 1 桥底面视觉拍摄位姿规划方法仿真参数

Table 1 Simulation parameters of position and pose planning method for visual shooting on the bridge bottom

编号	拍摄参数		
	拍摄距离 L/mm	视场角 θ_{all_w}	图像重叠率 ρ/%
1	2 500	20°	70
2	1 500	38°	70
3	1 500	60°	70
4	2 500	60°	70
5	1 500	20°	50
6	1 500	38°	50
7	2 500	38°	50
8	2 500	60°	50
9	1 500	20°	30
10	2 500	20°	30
11	2 500	38°	30
12	1 500	60°	30

拍摄位姿规划仿真结果如图 11,图中蓝色粗线表示桥梁下底面轮廓,红色标记点表示拍摄位置点,在红色标记点相交的绿色和蓝色虚线构成相机拍摄视场和方向角。由结果可以得出结论:1)拍摄距离越大,规划点数量越少;2)相机组视场角越大,规划点数量越少;3)图像拍摄重叠度越小,规划点数量越少。拍摄距离的增加会降低图像采集的物体分辨率,图像拍摄重叠减小会影响图像拼接效果,因此要减少规划拍摄数量提高采集速度和效率,只能增大视场角即增加相机个数。

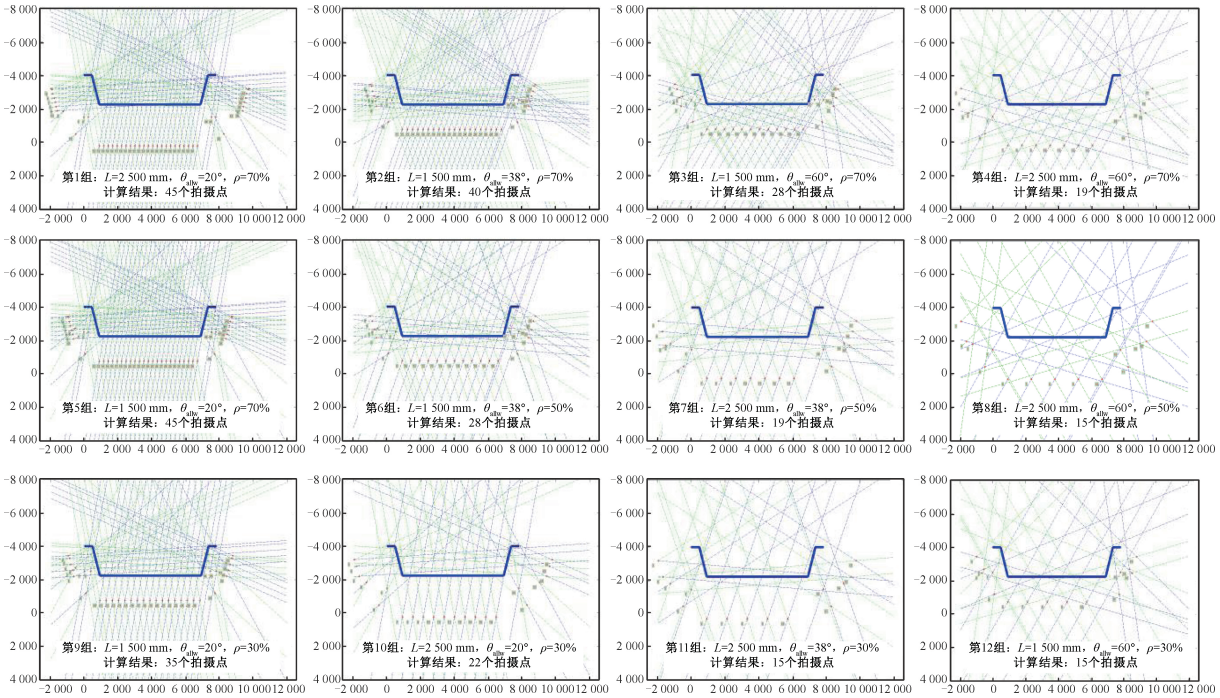


图 11　不同参数组合的空心板桥梁最佳拍摄位姿规划仿真结果

Fig.11　Simulation results of optimal shooting position and pose planning for hollow slab bridge with different parameter combinations

从 12 组规划结果中选择的原则是:1)规划点越少越好,即桥梁检测任务规划运动点越少;2) θ_{all_w} 较小,以减小硬件成本;3)ρ 较大,提高后期图像拼接效果。其中第 11 组数据 $L=2\ 500$ mm,$\theta_{all_w}=38°$,$\rho=30\%$ 为选择的最佳拍摄参数并在此东六路空心板桥梁检测中应用。规划结果为 15 个拍摄点,数据结果如表 2 所示。

表 2　空心板桥梁最佳规划数据结果

Table 2　Data results of optimal planning for hollow slab bridge

拍摄点序号	Y 坐标 y_i/mm	Z 坐标 z_i/mm	方向角 β_i(°)
1	0	−2 500	90
2	−1 220.1	−2 167.0	52
3	−1 952.7	−804.8	14
4	−1 661.2	−1 774.2	14
5	−474.6	−3 528.3	52
6	910.6	−4 255.3	90
7	2 115.8	−4 255.3	90
8	3 320.9	−4 255.3	90
9	4 526.1	−4 255.3	90
10	5 731.2	−4 255.3	90
11	8 295.9	−3 528.3	−52
12	9 482.5	−1 774.2	−14
13	9 774.0	−804.8	−14
14	9 041.3	−2 167.0	−52
15	7 821.3	−2 500	−90

4.2　最佳拍摄参数约束位姿规划方法的仿真结果

小箱梁和 T 型梁有向内凹进的结构,需要安全保护优化,我们选择长沙市比亚迪路的圭塘河小箱梁桥做为优化算法的实验对象,桥梁参数为 $L_1=431$ mm,$L_2=1\ 720$ mm,$L_3=912$ mm,$L_4=899$ mm,$\theta_1=10°$,$\theta_2=67°$,$n\hat{X}=3$,最佳拍摄距离 $L=2\ 000$ mm,相机组视场角 $\theta_{all_w}=38°$;图像重叠率 $\rho=50\%$。

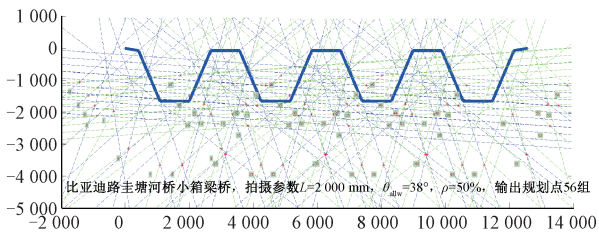


图 12　小箱梁桥梁最佳规划数据结果

Fig.12　Data results of optimal planning for small box girder bridge

采用最佳拍摄位姿规划方法计算拍摄点位姿结果如图 12 所示,移除拍摄视场角标识线以后的拍摄点规划位置与安全边界线关系如图 13,规划拍摄点数量为 56 组,其中安全区为 29 组,非安全区数据为 27 组。

为了确定合适的尺度权重因子 ε,我们先选取待优化数据编号为 12,设置求解范围 $\hat{\beta_i}\in[0,\pi]$,$\hat{L_i}\in$

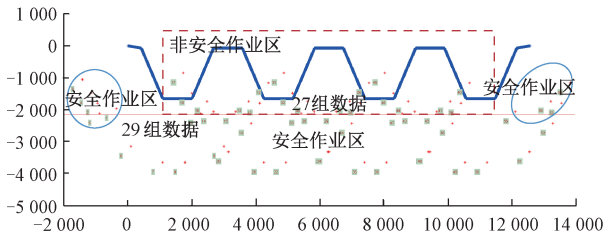


图 13 小箱梁桥梁拍摄点规划位置与安全边界线关系

Fig.13 Relationship between shooting point planning position and safety boundary line for small box girder bridge

[1 500 mm,3 000 mm]，选取计算步长为 $\left(\frac{\pi}{1\ 000},1\ \text{mm}\right)$，对其进行优化计算。选择尺度权重因子 ε 从 0.1 到 0.9 步进量 0.05 共 17 组数据比较计算。为了确定合适尺度权重因子 ε，取待优化数据编号为 12，求解范围 $\hat{\beta_i}\in[0,\pi]$，$\hat{L_i}\in[1\ 500\ \text{mm},3\ 000\ \text{mm}]$，选取计算步长为 $\left(\frac{\pi}{1\ 000},1\ \text{mm}\right)$，进行优化计算。

优化计算结果如图 14 所示，“*”标记点表示原规划数据点位置，点虚线和点划线虚线表示原规划拍摄视角，“○”标记点表示优化后的位置，直虚线表示优化后的拍摄方向角。尺度权重因子与位姿数据优化结果关系比较如表 3 所示，从优化结果发现 $\frac{|\hat{\beta_i}-\beta_i|}{\beta_i}$ 与 $\frac{|\hat{L_i}-L|}{L}$ 呈反向变化趋势，即拍摄距离越优，则拍摄倾角越差，如果拍摄倾角好，则拍摄距离不是最佳。

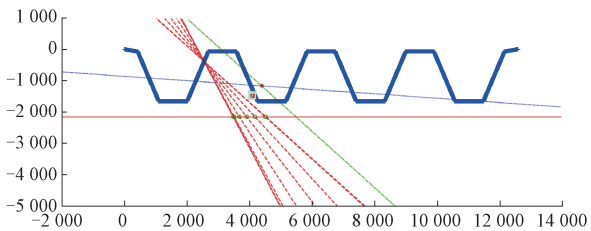


图 14 12 号位姿数据优化结果

Fig.14 Optimization result of the position and pose data of No. 12

从成像质量角度出发，侧重于拍摄距离最优，选择第 6 号组合 $\varepsilon=0.35$。采用安全保护位姿规划优化方法对非安全作业区的 27 组数据进行优化计算结果如图 15 所示，粗线为桥梁底面结构；细直线为安全作业边界线，安全线以上为非安全作业区，以下为安全作业区；“+”标记点为安全作业区的拍摄位姿数据，共 29 组；“*”标记点为非安全作业区的拍摄位姿数据，共 27 组；“○”标记点为优化后的拍摄位姿数据，均在安全边界线以下。

表 3 尺度权重因子与位姿数据优化结果关系比较

Table 3 Relation comparison of scale weighting factor and position & pose data optimization result

12 号位姿数据 $\beta_i=157°$，$L_i=2\ 000$ mm			
序号	ε	$\hat{\beta_{ibest}}$/(°)	$\hat{L_{ibest}}$/mm
1	0.10	117.72	2 000
2	0.15	117.72	2 000
3	0.20	117.72	2 000
4	0.25	117.72	2 000
5	0.30	117.72	2 000
6	0.35	117.90	2 001
7	0.40	117.90	2 001
8	0.45	117.90	2 001
9	0.50	117.90	2 001
10	0.55	117.90	2 001
11	0.60	118.62	2 014
12	0.65	122.58	2 098
13	0.70	127.62	2 232
14	0.75	132.66	2 404
15	0.80	137.88	2 636
16	0.85	138.06	2 646
17	0.90	138.06	2 646

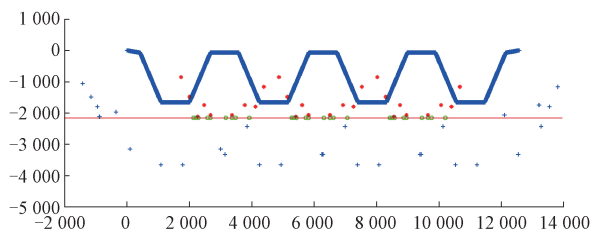


图 15 小箱梁桥梁拍摄位姿规划和优化结果

Fig.15 Shooting position & pose planning and optimization result for small box girder bridge

4.3 现场应用实验

在比亚迪路小箱梁桥上进行了作业规划与位姿优化方法的实验测试和调试工作。机器人末端位姿测量采用线激光传感器并结合基于序列 2D 结构化线特征的位姿估计方法[19]，测试中也采用了基于 UWB (ultra wideband)定位技术的位姿测量方法[20]，其中机器人末端安装定位标签，桥底面设置定位基站。以此对机器人位姿规划和优化结果进行测量评估，如图 16 所示，左图为检测机器人测试工作状态，右图为末端视觉检测单元依照规划的位姿的实际状态。

图 16　桥梁检测机器人应用工作现场

Fig.16　Application scene photo of the bridge inspection robot

拍摄位姿规划优化算法模块集成到桥梁检测机器人软件系统之中,如图 17 所示。通过现场实验和测试,以该方法规划的位姿点获取的桥底面图像质量能够满足检测应用要求,具有良好的效果。

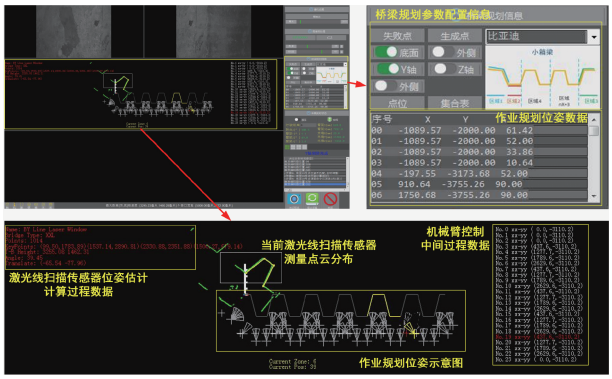


图 17　桥梁检测机器人软件界面规划优化结果

Fig.17　Planning optimization result of the bridge inspection robot software interface

5　结　　论

本文主要研究了桥梁检测机器人作业规划与位姿优化方法,首先介绍研究工作的目的。其次介绍了桥梁检测机器人工作原理、采集规划思路和桥梁坐标系与结构参数定义。然后,重点介绍桥梁检测数据采集规划方法,详细阐述采用最佳拍摄参数约束的桥底面视觉拍摄位姿规划方法,并推导了算法公式;针对小箱梁和 T 型梁向内凹进的特殊结构导致规划的拍摄位姿结果不符合工程应用的问题,提出采用安全保护策略的位姿优化方法,并建立了不等式约束优化问题模型,设计和推导了代数求解方法并给出数值法求解步骤。最后分别选用了空心板和小箱梁对桥底面拍摄位姿规划和安全位姿优化方法进行了仿真测试;并将研究的规划优化算法集成到桥梁检测机器人控制软件系统之中,为桥梁检测制定工作任务和流程控制计划,经现场测试,采集的图像能够满足检测要求。

参考文献

[1] 李万恒. 桥梁养护管理的思考[J]. 中国公路, 2016(5):104-105.
LI W H. Ponder on bridge maintenance and management[J]. China Highway, 2016 (5): 104-105.

[2] 薛来生,孔祥兴. 混凝土桥梁裂缝分级的现状及问题[J]. 施工技术,2015(s1):366-368.
XUE L S, KONG X X. The status and problems of concrete bridge crack classification [J]. Construction Technology, 2015 (s1): 366-368.

[3] 叶华文,张澜,秦健淇,等. 魁北克大桥垮塌全过程分析[J]. 中外公路,2015, 35(5):138-142.
YE H W, ZHANG L, QIN J Q, et al. The whole process analysis of the collapse of Quebec bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35 (5): 138-142.

[4] 巴珊. 桥梁裂缝产生的原因及整治措施[J]. 铁道建筑,2007(7):21-22.
BA SH. Causes for cracks in bridges and improvement measures[J]. Railway Construction, 2007 (7): 21-22.

[5] OH J K, LEE A Y, OH S M, et al. Design and Control of Bridge Inspection Robot System [C]. International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE Xplore, 2007:3634-3639.

[6] 余加勇,彭旺虎,朱建军,等.测量机器人在大跨径桥梁检测中的应用研究[J].中南公路工程,2007,32(3):33-36.
YU J Y, PENG W H, ZHU J J, et al. The application of measuring robot in long span bridge detection [J]. Central South Highway Engineering, 2007, 32 (3): 33-36.

[7] 乔陶鹏,邓焱,严普强, 等.利用位移测量推估梁及桥梁动态应变的方法研究[J].仪器仪表学报,2003,24(5):540-542,546.
QIAO T P, DENG Y, YAN P Q, et al. Approach of speculating the dynamic strain by measuring displacement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003,24(5):540-542,546.

[8] 蔡钊雄. 基于多足爬墙机器人平台的桥梁裂缝检测方法研究.[华南理工大学硕士学位论文],广州: 华南理工大学,2012.
CAI ZH X. Research on bridge crack detection method based on multi foot and wall climbing robot platform. [Master´s degree thesis of South China University of Technology], Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

[9] PEEL H, LUO S, COHN AG, et al. Localisation of a mobile robot for bridge bearing inspection [J]. Automation in Construction.2018, Vol. 94: 244-256.

[10] 樊绍胜,杨迪,邹德华,等.输电线路螺栓紧固带电作业机器人的视觉搜索、识别与定位方法[J].电子测量与仪器学报,2017,31(9):1514-1523.
FAN SH SH, YANG D, ZOU D H, et al. Vision-based tracing, recognition and positioning strategy for bolt tightening live working robot on power transmission line[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017,31(9):1514-1523.

[11] 周用安,万智,陈晓辉.桥梁检测机器人系统及应用[J].公路工程,2017,42(3):145-150.
ZHOU Y G, WAN Z, CHEN X H. Automatic crack detection robot system for bottom surface of concrete bridges[J]. Highway engineering, 2017, 42 (3): 145-150.

[12] 赵慧洁,葛文谦,李旭东.最小误差准则与脉冲耦合神经网络的裂缝检测[J].仪器仪表学报,2012,33(3):637-642.
ZHAO H J, GE W Q, LI X D. Detection of crack defect based on minimum error and pulse coupled neural networks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012,33(3):637-642.

[13] OH J K, LEE A Y, OH S M, et al. Design and control of bridge inspection robot system [C], International Conference on Mechatronics and Automation. 2007.

[14] DEVAULT J E. Robotic system for underwater inspection of bridge piers[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2000,3(3): 32-37.

[15] QUIN P, PAUL G, LIU D. Experimental evaluation of nearest neighbor exploration approach in field environments[J]. IEEE Transactions On Automation Science And Engineering, 2017,14(2): 869-880.

[16] 连淑君 唐加会 杜爱华. 带等式约束的光滑优化问题的一类新的精确罚函数[J]. 运筹学学报,2018,22(4):108-116.
LIAN SH J, TANG J H, DU A H. A new class of simple smooth exact penalty functions for equality constrained optimization problems. Operations Research Transactions, 2018,22(4):108-116.

[17] 陈伟,贾立.间歇过程 PSO-SQP 混合优化算法研究[J].仪器仪表学报,2016,37(2):339-347.
CHEN W, JIA L. PSO-SQP Hybrid optimization algorithm for batch processes[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016,37(2):339-347.

[18] 史晋峰,许向阳,戴亚平.基于非线性规划的间歇反应过程动态优化算法[J].仪器仪表学报,2012,33(5):1048-1054.
SHI J F, XU X Y, DAI Y P. Dynamic optimal algorithm for batch processes based on nonlinear programming[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012,33(5): 1048-1054.

[19] 刘理,王耀南,万智, 等.基于序列 2D 结构化线特征的桥梁检测机器人末端位姿估计方法[J].电子测量与仪器学报,2018,32(8):59-68.
LIU L, WANG Y N, WAN Z, et al. Estimation method of collecting terminal pose of bridge detection robot based on sequence 2D structured line features[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(8):59-68.

[20] 符世琛,李一鸣,宗凯,等.面向掘进机的超宽带位姿检测系统精度分析[J].仪器仪表学报,2017,38(8):1978-1987.
FU SH CH, LI Y M, ZONG K, et al. Accuracy analysis of UWB pose detection system for roadheader[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(8): 1978-1987.

作者简介

刘理(通信作者),2019 年于湖南大学获得博士学位,现为湖南大学电气与信息工程学院博士后,研究方向为机器人路径规划与智能控制。
E-mail: liuli@hnu.edu.cn

Liu Li (Corresponding author) received Ph. D. from Hunan University in 2019. At present, he is a postdoctoral fellow in College of Electrical and Information Engineering, Hunan University. His research interest includes robot path planning and intelligent control.

王耀南,1995 年于湖南大学获得博士学位,现为湖南大学电气与信息工程学院院长、机器人学院院长,教授、博士生导师,主要研究方向为智能控制、模式识别。

Wang Yaonan received Ph. D. from Hunan University in 1995. Now, he is the director of College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, the dean of the School of Robotics, a professor and Ph.D supervisor. His main research intersect includes intelligent control and pattern recognition.

张辉, 2012 年于湖南大学获得博士学位。现为长沙理工大学副教授,硕士生导师,湖南大学控制科学与工程博士后,主要研究方向为工业机器视觉,数字图像处理。
E-mail:zhanghuihby@126.com

Zhang Hui received his Ph. D. from Hunan University in 2012. He is currently an associate professor, master student supervisor at Changsha University of Science and Technology, and a postdoctoral fellow in control science and engineering, Hunan University. His main research interest includes industrial machine vision and digital image processing.