doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.003

典型草原地面图像感知稳定系统设计与试验

张宇卓[1,2]　王德成[1]　尤　泳[1]　王天一[1]

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 苏州大学未来科学与工程学院, 苏州 215222)

摘要: 针对草原复杂地形导致植被图像模糊失真的问题,设计了一种集成振动补偿的图像感知稳定系统。通过草原地形振动试验,确定了振动主效应方向、振动位移和频率控制阈值。基于牛顿-欧拉法构建了稳定机构动力学模型,结合路况参数,设计了模糊 PID 振动补偿控制策略。通过 ANSYS 随机振动仿真验证了机构强度,应变、应力分布符合正态分布(置信区间 95%)。基于 ADAMS - Matlab 联合仿真构建虚拟样机,证实模糊 PID 控制策略可有效降低振动干扰。内蒙古自治区实地试验表明,系统使结构相似性指数、峰值信噪比和归一化互相关指标分别提升 0.420、12.8 dB 和 0.433。高质量图像占比增加 28.4%,中、低质量图像分别减少 17.8% 和 11.5%。研究表明,所提出的基于振动补偿的图像感知稳定系统,显著改善了复杂地形下的植被成像质量,为草原生态监测装备研发提供了理论依据和技术支撑。

关键词: 草原植被感知; 图像感知稳定系统; 随机振动; 联合仿真; 模糊 PID 控制

中图分类号: S225.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0042-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Typical Grassland Ground Image Perception and Stabilization System

ZHANG Yuzhuo[1,2]　WANG Decheng[1]　YOU Yong[1]　WANG Tianyi[1]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *School of Future Science and Engineering*, *Soochow University*, *Suzhou* 215222, *China*)

Abstract: An image perception stabilization system integrated with vibration compensation was designed to address the issue of image blurring and distortion caused by complex grassland terrain. Vibration tests conducted on the grassland terrain helped identify the primary direction of vibration effects, vibration displacement, and frequency control thresholds. Based on these findings, a dynamic model of the stabilization mechanism was established by using the Newton Euler method, and a fuzzy PID vibration compensation control strategy was developed, taking into account the road condition parameters. ANSYS random vibration simulations were performed to verify the strength of the mechanism, and the strain and stress distributions were found to conform to a normal distribution (95% confidence interval). Furthermore, a virtual prototype was built by using ADAMS - Matlab co-simulation, confirming that the fuzzy PID control strategy effectively reduced vibration interference. On-site experiments conducted in Inner Mongolia demonstrated that the system significantly improved the structural similarity index, peak signal-to-noise ratio, and normalized cross-correlation, with increases of 0.420, 12.8 dB, and 0.433, respectively. The proportion of high-quality images was increased by 28.4%, while medium and low-quality images were decreased by 17.8% and 11.5%, respectively. The research indicated that the proposed vibration-compensated image perception stabilization system substantially enhanced vegetation imaging quality under complex terrain conditions, providing both a theoretical foundation and technical support for the development of grassland ecological monitoring equipment. The system not only improved image stability by reducing vibration interference but also achieved notable improvements in image quality during practical applications, offering a feasible technological solution for future grassland ecological

收稿日期: 2025-07-30　修回日期: 2025-08-28

基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-34)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(中国农业大学 25TC013)

作者简介: 张宇卓(1997—),男,讲师,博士,主要从事感知机器人、图像处理和大模型研究,E-mail: zyzstar@suda.edu.cn

通信作者: 王天一(1990—),男,副教授,博士,主要从事无人机遥感技术和智能草业装备研究,E-mail: tianyi.wang@can.edu.cn

monitoring efforts.

Key words: grassland vegetation perception; image perception stabilization system; random vibration; co-simulation; fuzzy PID control

0　引言

典型草原作为温带半干旱地区的重要生态系统，在气候调节、水土保持及生物多样性维持方面具有不可替代的生态价值[1-4]。通过植被参数(高度、密度和盖度等)可监测草原资源动态[5-6]，实现退化预警，而精准的图像数据是量化分析的基础[7-8]。当前植被感知技术虽呈现“星-空”立体化发展趋势[9-11]，但针对典型草原场景存在限制：①卫星遥感虽覆盖范围广，但受限于分辨率(>0.5 m)与重访周期(≥3 d)，难以满足实时监测需求，且标注任务较为繁重[12-13]。②无人机平台搭载多光谱、激光雷达传感器虽能获取厘米级数据，但在典型草原强风环境(年均大于 5 级风日达 120 d)下，飞行控制、通讯存在限制[14-15]。因此，地面系统对于典型草原植被感知更为适合。然而，草原复杂地形引发的底盘振动导致图像模糊失真，直接影响地上生物量感知精度[16-17]。

近些年，研究人员从无人机平台、车载系统和特征环境应用等方面开展了图像稳定技术研究。例如，VERMA 等[18]开发的主动隔振系统通过模态解耦算法实现 75% 振动抑制，但未解决强风扰动下低频共振问题；KORTMANN 等[19]基于三轴稳定架构的 PID 控制策略在铺装路面取得良好效果，但对草原随机振动的补偿延迟达 0.8 s；ZHAO 等[20]设计的水下电缆驱动平台(CDUCSP)采用双环滑模控制策略，在湍流环境中将图像偏移量降低至 ±0.05°，但其机械结构难以适应地面移动载具的负载需求；SUN 等[21]研发的桥接式压电执行器通过位移放大机构(增益系数 5.7)实现 17 μm 精密调控，为多自由度补偿机构设计提供了新思路；文献[22-24]强调了对多自由度运动机构进行有效运动学和动力学分析的必要性，为多轴调节机制的开发提供了理论基础。

目前针对典型草原图像感知稳定系统的研究存在显著不足，主要面临以下技术瓶颈：①缺乏典型草原路况振动分析，导致振动补偿机制缺乏理论支撑[25-26]。②传统三轴稳定架构的自由度不足(仅 3 自由度)，难以有效补偿草原地形引发的振动。③稳定系统的整体设计方案与配套装备体系尚未建立，制约了技术的实际应用。针对上述问题，本研究基于草原路况振动的基础试验分析、多轴补偿机构及控制方案设计，拟研制一种四自由度图像感知稳定系统，以期为草地生态智慧监测装备研发提供理论依据与技术支撑。

1　草原路况及振动情况

1.1　草原路况类型划分

经过对典型草地进行 2 年的调研，可将实际道路条件划分为 8 种类型[27]，即裸露区、矮草区、高草区、硬茎草区、灌木区、丛生草区、碎石区和斜坡区，各类型道路情况及特点如表 1 所示。

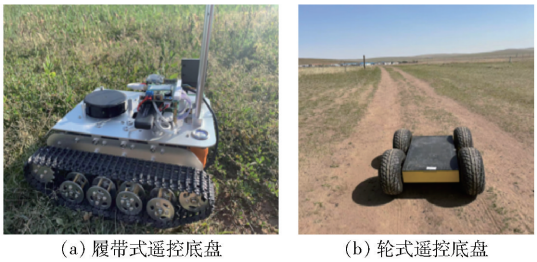
表 1　草原路况类型划分

Tab.1　Classification of grassland road conditions

草原路况类型	路况描述
裸露区	土壤硬度较大，几乎无植被覆盖，地面存在大量凸起
矮草区	草平均高度为 25 cm 以下
高草区	草平均高度为 40 cm 以上
硬茎草区	草区多分布茎部较坚韧的植被(如芨芨草)，高度为 140 cm 左右
丛生草区	植被通过密集分蘖形成显著簇丛，簇丛内部植株密度远高于周围区域，导致地表呈现明显的脊状或隆起状微地形(如部分针茅属植物、蒿属密集丛等)。其茎秆特性多样(从柔软到较坚韧)
碎石区	由风化侵蚀形成的岩石或山体分解并打磨成一些碎石
灌木区	灌木平均高度小于车轮直径，多为小叶锦鸡儿，高度为 40 cm 左右
斜坡区	坡高约为 15 cm，坡度为 5°~15°

1.2　草原路况振动情况

为了解上述类型的道路条件，利用行驶底盘进行振动测试。根据前期草地试验结果，选择履带式和轮式 2 种底盘类型先进行草原道路行走试验(图 1)。试验结果表明，在草地上运行时，履带式底盘对植被造成较大的压碎和挤压损伤，而轮式底盘在维护上更为简便，控制更加便捷，且适合用于在固定点进行植被感知[28]。因此，轮式底盘更适合作为



(a) 履带式遥控底盘　　(b) 轮式遥控底盘

图 1　2 种底盘实际测试图

Fig. 1　Actual test diagrams of two types of chassis

草原植被感知任务的运载工具。

为进一步测定轮式底盘在道路上行走时的振动数据,将振动监测传感器安装在轮式底盘上,在草原实地试验中,底盘行驶速度为 1.0 ~ 1.5 m/s,实时监控并记录在草原条件下行驶过程中产生的振动数据,以便后续分析和模型建立。

采集的代表性数据如图 2 所示(图中 1 表示行驶速度为 1 m/s,2 表示行驶速度为 2 m/s)。可以看出,在不同路况下,底盘受地形影响产生的振动特点主要表现为 Z 轴方向振动显著。因此,稳定系统稳定性补偿需对 Z 轴方向振动进行较 X、Y 轴方向更大幅度的补偿。同时,系统也需对 X、Y 轴方向的振动进行及时反馈和补偿,确保传感器数据的稳定性和准确性。

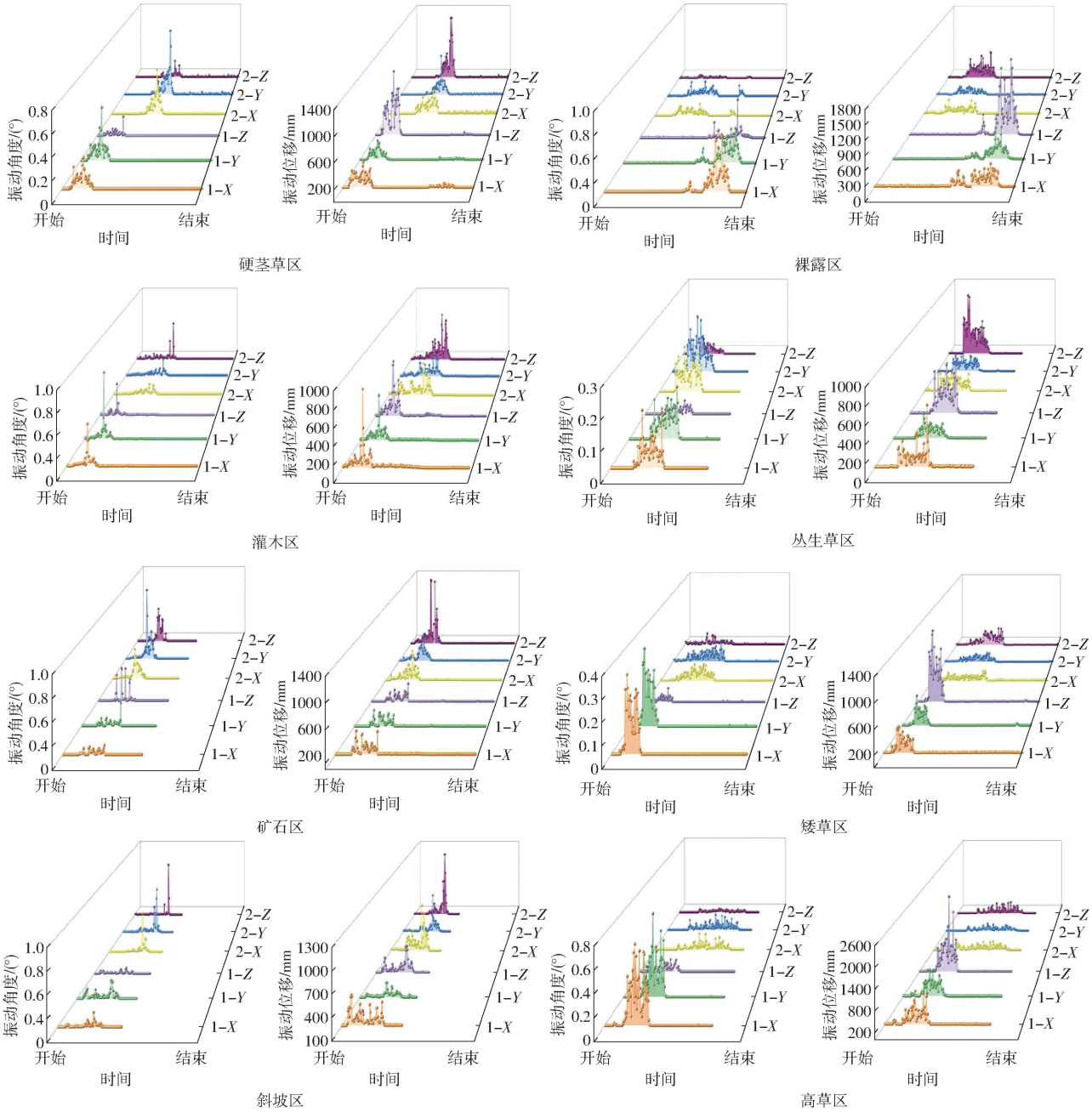
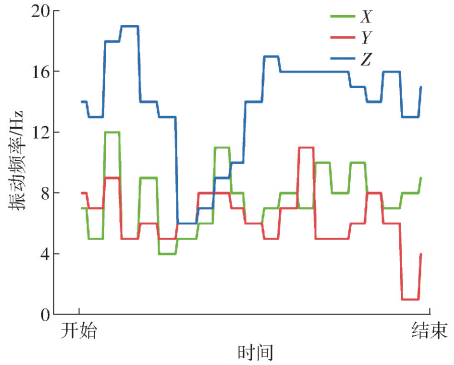


图 2 底盘在不同草地路况行驶时的振动情况

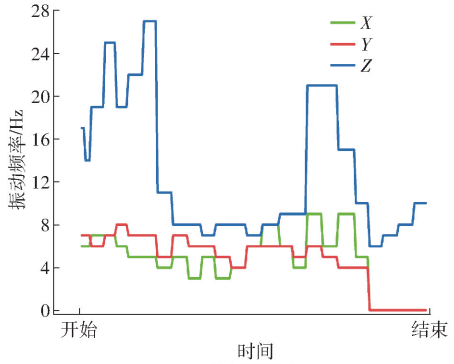
Fig. 2 Vibration of chassis when drivingunder different grassland conditions

经过实地调查得出,底盘振动频率不超过 35 Hz(收集了不同草原道路条件下的振动频率,可得部分数据如图 3 所示)。结合前期草原植被成像质量结果[29]可得,稳定系统应确保振动位移不超过 50 μm,且振动频率尽量保持在 15 Hz 以内。因此,针对典型草原路况,稳定系统设计要求如下:根据不同道路条件,系统应具备不同的适应性,即通过调整响应速度和输出功率,以适应不同补偿强度。同时,稳定系统应重点对 Z 轴方向的振动进行补偿,补偿幅度应大于 X 轴和 Y 轴方向,且能对其他 2 个方向的振动进

行及时反馈和补偿。



(a) 高草区



(b) 碎石区

图 3　典型草原道路条件下振动频率数据样本示意图

Fig. 3　Schematics of vibration frequency data samples under typical grassland road conditions

2　草原地面感知系统设计

2.1　感知系统整体设计

通过上述对草原道路情况及行驶底盘在道路上行驶过程中的振动规律分析，提出了地面感知系统设计方案，如图 4 所示。该装置主要由轮式底盘、车载吸盘、稳定机构、相机、减震弹簧和支撑机架组成。

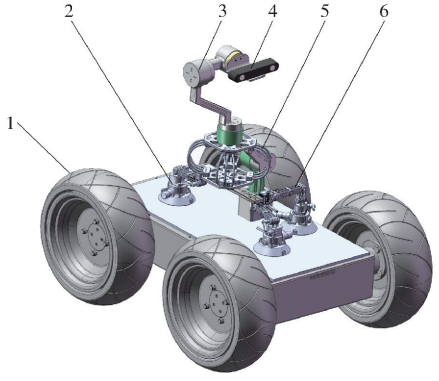


图 4　地表植物量感知系统结构示意图

Fig. 4　Structure schematic of surface plant quantity perception system

1. 轮式底盘　2. 车载吸盘　3. 稳定机构　4. 相机　5. 减震弹簧　6. 支撑机架

2.2　图像感知稳定机构设计

图 5 为图像感知稳定机构的运动简图，根据感知装置构件化的本体建模完成设计[30]，利用欧拉角表示其姿态。

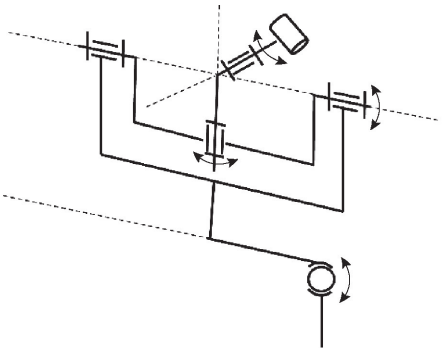


图 5　稳定机构运动简图

Fig. 5　Motion diagram of stabilization mechanism

稳定机构获取振动信息对俯仰角(Pitch)、偏航角(Yaw)和横滚角(Roll)进行补偿反馈，根据上述研究可知，横滚角补偿(定义 Z 轴方向)振动较为显著。将 Z 轴方向的简化机构投影于二维平面，对其进行动力学分析(图 6)。定义稳定机构的状态，通过质量代换，定义连杆 1 的质量集中于末端点，连杆 2 的质量集中于安装摄像头的端点。因此，每个连杆质心惯性张量为零矩阵。由于重力的作用，点 O 固定且存在向下的重力。杆件无平移只进行旋转运动。因此，根据上述得到基本参数和杆件间变换矩阵为

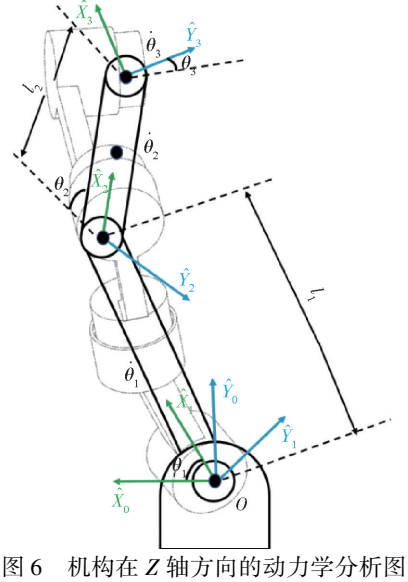


图 6　机构在 Z 轴方向的动力学分析图

Fig. 6　Dynamics analysis diagram of institution in the Z direction

$$\begin{cases} {}^{1}\boldsymbol{P}_{C_1} = l_1\hat{\boldsymbol{X}}_1 \\ {}^{2}\boldsymbol{P}_{C_2} = l_2\hat{\boldsymbol{X}}_2 \\ {}^{C_1}\boldsymbol{I}_1 = 0 \\ {}^{C_2}\boldsymbol{I}_2 = 0 \\ \boldsymbol{\omega}_0 = 0 \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_0 = 0 \\ {}^{0}\dot{\boldsymbol{v}}_0 = g\hat{\boldsymbol{Y}}_0 \end{cases} \tag{1}$$

式中 ${}^{1}\boldsymbol{P}_{C_1}$——相对质心的第 1 个杆件坐标系下的向量

${}^{2}\boldsymbol{P}_{C_2}$——相对质心的第 2 个杆件坐标系下的向量

$\boldsymbol{\omega}_0$——第 0 杆件角速度

${}^{0}\dot{\boldsymbol{v}}_0$——第 0 杆件加速度

g——重力加速度

${}^{C_1}\boldsymbol{I}_1$——第 1 杆件转动惯量

${}^{C_2}\boldsymbol{I}_2$——第 2 杆件转动惯量

l_1——第 1 杆件长度

l_2——第 2 杆件长度

$\hat{\boldsymbol{X}}_1$——沿着 X_1 方向

$\hat{\boldsymbol{X}}_2$——沿着 X_2 方向

$\hat{\boldsymbol{Y}}_0$——沿着 Y_0 方向

$$ {}_{i+1}^{i}\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} c_{i+1} & -s_{i+1} & 0 \\ s_{i+1} & c_{i+1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

c_{i+1}表示 $\cos\theta_{i+1}$，s_{i+1}表示 $\sin\theta_{i+1}$。

根据牛顿-欧拉法进行运动向外迭代，可得第 1 轴角速度 $\boldsymbol{\omega}_1$，其角速度表达为第 0 轴的角速度 $\boldsymbol{\omega}_0$ 与杆件 1 本身转动的角速度的和，其公式为

$$ {}^{1}\boldsymbol{\omega}_1={}_{0}^{1}\boldsymbol{R}\,{}^{0}\boldsymbol{\omega}_0+\dot{\theta}_1\hat{\boldsymbol{Z}}_1=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

同理，其角加速度${}^{1}\dot{\boldsymbol{\omega}}_1$ 为

$$ {}^{1}\dot{\boldsymbol{\omega}}_1={}_{0}^{1}\boldsymbol{R}\,{}^{0}\dot{\boldsymbol{\omega}}_0+{}_{0}^{1}\boldsymbol{R}\,{}^{0}\boldsymbol{\omega}_0\times\dot{\theta}_1\hat{\boldsymbol{Z}}_1+\ddot{\theta}_1\hat{\boldsymbol{Z}}_1=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

杆件 1 所在质点的线加速度 $\boldsymbol{a}_1$ 表达式包含杆件 0 的线速度(等效重力加速度)、坐标系角加速度与向量的转换(即杆件转动的切线加速度与法线加速度)即

$$ {}^{1}\boldsymbol{a}_1={}_{0}^{1}\boldsymbol{R}\left[{}^{0}\boldsymbol{a}_0+{}^{0}\dot{\boldsymbol{\omega}}_0\times{}^{0}\boldsymbol{P}_1+{}^{0}\boldsymbol{\omega}_0\times({}^{0}\boldsymbol{\omega}_0\times{}^{0}\boldsymbol{P}_1)\right]=\begin{bmatrix} gs_1 \\ gc_1 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5}$$

杆件 1 质心线加速度${}^{1}\boldsymbol{a}_{C_1}$为

$$ {}^{1}\boldsymbol{a}_{C_1}={}^{1}\boldsymbol{a}_1+{}^{1}\dot{\boldsymbol{\omega}}_1\times{}^{0}\boldsymbol{P}_{C_1}+{}^{1}\boldsymbol{\omega}_1\times({}^{1}\boldsymbol{\omega}_1\times{}^{0}\boldsymbol{P}_{C_1})=\begin{bmatrix} gs_1-l_1\dot{\theta}_1^2 \\ gc_1+l_1\ddot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

杆件 1 惯性力${}^{1}\boldsymbol{F}_1$ 及惯性力矩${}^{1}\boldsymbol{N}_1$ 计算式为

$$ {}^{1}\boldsymbol{F}_1=m^{1}\boldsymbol{a}_{C_1}=\begin{bmatrix} m_1gs_1-m_1l_1\dot{\theta}_1^2 \\ m_1gc_1+m_1l_1\ddot{\theta}_1^2 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$ {}^{1}\boldsymbol{N}_1={}^{C_1}\boldsymbol{I}^{1}\dot{\boldsymbol{\omega}}_1+\omega_1\times{}^{C_1}\boldsymbol{I}\boldsymbol{\omega}_i=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

同理，可获得杆件 2 惯性力${}^{2}\boldsymbol{F}_2$ 及力矩${}^{2}\boldsymbol{N}_2$ 计算式为

$$ {}^{2}\boldsymbol{F}_2=\begin{bmatrix} m_2l_1\ddot{\theta}_1s_2+m_2gs_{12}-m_2l_1\dot{\theta}_1^2c_2-m_2l_2(\dot{\theta}_1+\dot{\theta}_2)^2 \\ m_2l_1\ddot{\theta}_1c_2+m_2gc_{12}+m_2l_1\dot{\theta}_1^2s_2+m_2l_2(\ddot{\theta}_1+\ddot{\theta}_2) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$ {}^{2}\boldsymbol{N}_2=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{10}$$

通过力的向内迭代，根据动力学方程，关节力矩 τ 计算式为

$$ \tau=\boldsymbol{M}(\theta)\ddot{\theta}+\boldsymbol{V}(\theta,\dot{\theta})+\boldsymbol{G}(\theta) \tag{11}$$

其中

$$ \boldsymbol{M}(\theta)=\begin{bmatrix} l_2^2m_2+2l_1l_2m_2c_2+l_1^2(m_1+m_2) & l_2^2m_2+l_1l_2m_2c_2 \\ l_2^2m_2+l_1l_2m_2c_2 & l_2^2m^2 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$ \boldsymbol{V}(\theta,\dot{\theta})=\begin{bmatrix} -(m_2l_1l_2s_2\dot{\theta}_2^2+2m_2l_1l_2s_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2) \\ m_2l_1l_2s_2\dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$ \boldsymbol{G}(\theta)=\begin{bmatrix} m_2l_2gc_{12}+m_1l_1gc_1+m_2l_1gc_1 \\ m_2l_1gc_1 \end{bmatrix} \tag{14}$$

式中 $\boldsymbol{M}(\theta)$——稳定机构的质量矩阵

$\boldsymbol{V}(\theta,\dot{\theta})$——离心力和柯氏力矢量

$\boldsymbol{G}(\theta)$——重力矢量

根据上述设计方法，确定了稳定机构的设计方案，其包括俯仰轴补偿臂、横滚轴补偿臂、偏航轴补偿臂、纵向补偿摇臂、支撑底座 5 个主要零部件和其余零部件(图 7)。结合传感器的布置和实际连接情况，经过尺寸细化后，稳定机构总高为 517 mm，总宽为 178 mm，总长为 260 mm。

2.3 控制方案设计

模糊控制器结构和参数设置优化设计是控制性能提升的关键。如图 8 所示，模糊控制器输入变量包括位置偏差和偏差变化率，这些变量将用于控制系统的调节。控制器输出则通过一系列的迭代试验进行优化获得。变量 e 表示摄像机位置误差，而 e_c 表示该误差变化率。输出使用的控制变量为 ΔK_p、ΔK_i 和

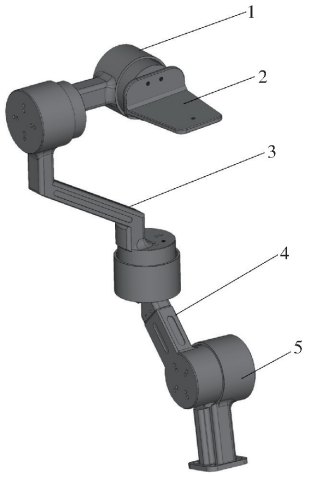


图 7　感知稳定机构模型图

Fig. 7　Model diagram of stabilization mechanism

1. 俯仰轴补偿臂　2. 横滚轴补偿臂　3. 偏航轴补偿臂　4. 纵向补偿摇臂　5. 纵向支撑底座

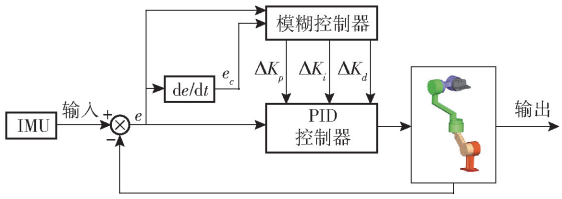


图 8　基于模糊 PID 的振动补偿控制算法原理图

Fig. 8　Schematic diagram vibration compensation control algorithm based on fuzzy PID

ΔK_d，分别对应 PID 控制器比例、积分和微分增益调节项。对变量 e 和 e_c 进行模糊化处理，并将它们划分为 7 个明确和模糊的子集，包括 NB、NM、NS、ZO、PS、PM 和 PB。每个模糊子集隶属度定量地表示输入变量与该类别的一致性水平。隶属函数用于定义这些模糊集，以表达输入数据不确定性或模糊性。

如图 9 所示，整个控制系统由系统本体、控制中心、执行机构和反馈模块 4 部分组成。系统本体包括俯仰模块、横滚模块、航向模块和各轴驱动电机。俯仰轴补偿臂与俯仰轴电机固连，通过俯仰轴旋转形成俯仰模块；俯仰框通过俯仰轴电机连接横滚补偿臂与横滚电机，绕横滚轴旋转构成横滚模块；横滚框通过横滚轴电机连接航向补偿臂与航向轴电机，绕航向轴旋转构成航向模块；纵向框通过第 4 轴电机连接纵向补偿臂，形成纵向模块。整体系统本体实现了 4 轴 4 模块结构（在控制系统设计中，纵向模块整合到俯仰模块中）。

控制中心采用以单片机（微控制单元）为核心的控制系统，负责接收反馈元件采集的数据，进行处理与计算，并发送指令控制其他器件的协同工作。执行机构由本研究设计的 4 个补偿臂组成，带编码器的电机安装在轴框中，电机通过三相线与控制板连接，受控于控制板，执行转角和转速等驱动任务，

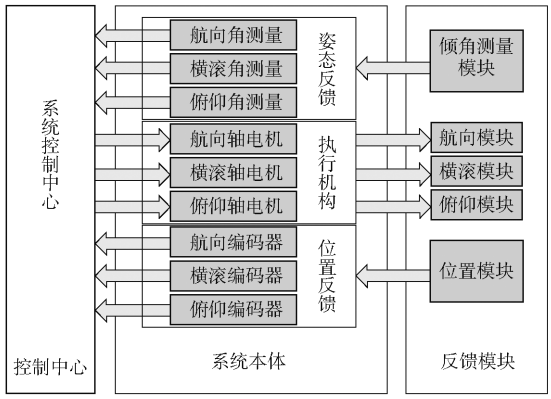


图 9　稳定控制系统方案

Fig. 9　Image stabilization control system scheme

从而带动轴臂运动，完成姿态调整和振动补偿。反馈元件主要通过陀螺仪和加速度计等传感器感知相机的空间位置与姿态变化。陀螺仪用于感知姿态角变化，加速度计用于感知角速度变化。两者结合成 IMU，安装于相机底部，采集姿态角、角速度等数据，反映相机姿态和位置变化。根据上述总体方案可进行硬件配置与电路连接的具体实施。

设计的系统主要为电机驱动，因此电机扭矩要符合实际工况要求。根据系统负载和机械结构对各关节轴进行受力分析，各关节受力简图如图 10 所示。图中，f 为第 4 轴关节，a 为航向轴关节，r 为横滚轴关节，p 为俯仰轴关节，G_1 表示第 4 轴关节所受载荷，G_2 表示航向轴关节所受载荷，G_3 表示横滚轴关节所受载荷，G_4 表示俯仰轴关节所受载荷。根据计算得出的第 4 轴电机转矩知，纵向电机除了要承载一定比例的 3 轴机构质量，同时需要更大的转矩来进行振动补偿，因此 G_1 所受载荷最大。根据计算得出第 4 轴电机转矩为 1.5 N·m。因此，选 PM6025 型无刷大扭矩电机。

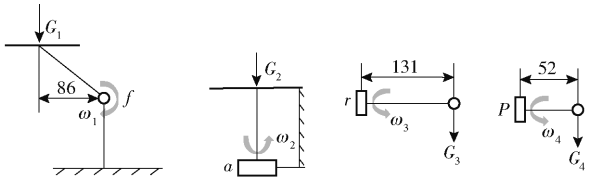


图 10　电机受力分析图

Fig. 10　Motor force analysis diagram

在完成硬件配置之后，根据所配置的硬件进行外部电路连接。外部电路连接如图 11 所示，从左向右看，首先是 IMU 板通过 1^2C 总线连接到第二级子板；第二级子板通过 UVW 三相线连接到俯仰轴电机，同时通过 1^2C 总线连接到第一级子板；第一级子板通过 UVW 三相线连接到横滚轴电机，同时通过 1^2C 总线连接到主板；主板通过 UVW 三相线连接到航向轴电机，同时通过电源线连接到电池，通过 1^2C 总线连接到 USB 转接板；USB 转接板通过 USB 数据线连接到主控 PC。其中，第 4 轴纵向补偿的电机连

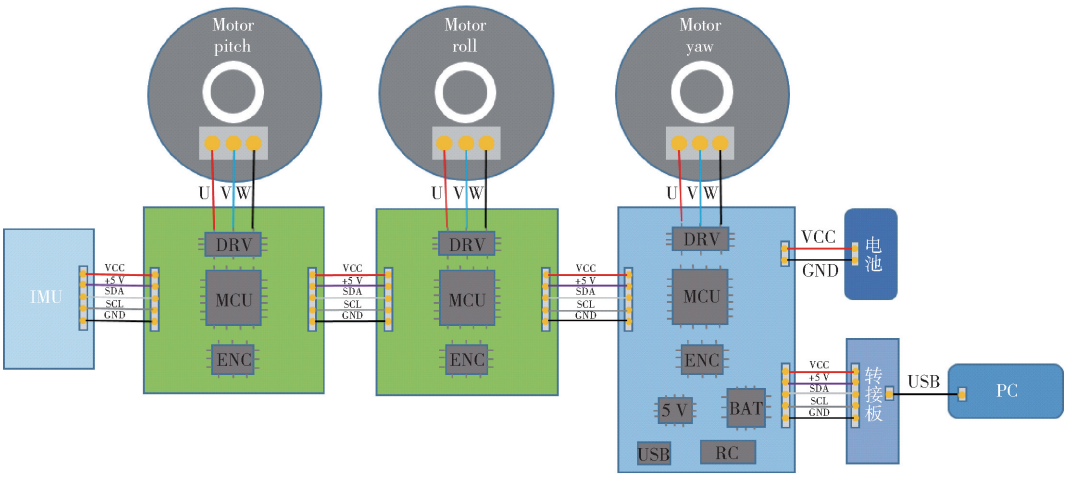


图 11 控制系统的外部电路连接图

Fig. 11 External circuit connection diagram of control system

接整合到俯仰模块中,如上述所示。

3 稳定系统仿真试验

3.1 静态、模态和随机振动试验

为确保整体结构在几何形状、材料性能、应力分布方面与实际情况相符,在 ANSYS Workbench 中建立了一个静态仿真项目。项目中重新定义所有材料,确保其属性与实际应用一致。通过对 1 ~ 5 mm 网格尺寸对比,确定 3 ~ 5 mm 的网格尺寸无法满足一般的模拟理论要求。因此,选择 2 mm 的网格单元尺寸进行划分。网格方法采用四面体和六面体的融合策略,以软件的自动判断功能对不同部位进行最优化分析。固定支撑位于底部支撑架下方,添加标准地球重力。相机质量小于 0.5 kg。

模态分析的结果如图 12 所示。本研究详细分析了六阶模态的固有频率与主要振动形态。在一阶模态中,固有频率为 5.579 3 Hz,其中主要变形来源于偏航轴补偿臂,六阶模态固有频率为 48.391 Hz,这表明整体结构的固有频率相对较低,振动特征对整体结构完整性和数据采集准确性的影响有限。由于这些固有频率远低于电机励磁频率,装置不易产生共振,满足了实际工况下的安全性要求。

由于振动对成像质量有较大影响,在模态分析的基础上,需更全面评估结构动态响应,且要考虑激励的随机性,提高设计可靠性。因此在软件中进行随机振动分析。以 PSD 加速度为准,计算表达式为

$$u = \sqrt{\frac{\pi\gamma^2\varphi^2 P_{SD}}{4eM^2(2\pi)^4 f^3}} \tag{15}$$

式中 u——位移幅值,表示系统在随机振动下的响应幅度

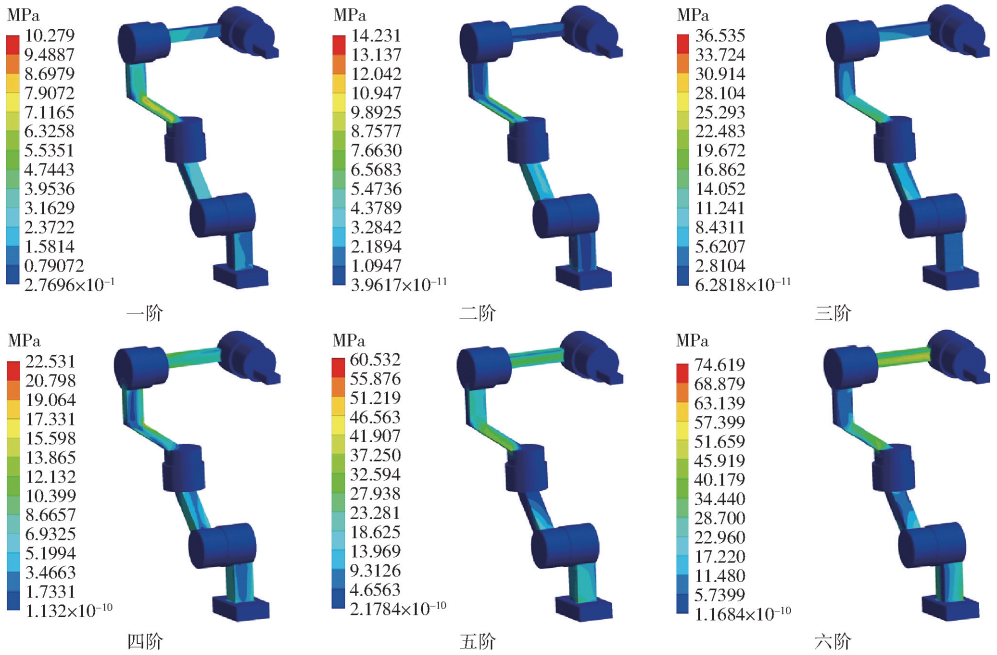


图 12 稳定机构六阶模态分析云图

Fig. 12 Sixth order modal analysis cloud map of stable mechanism

γ——一阶模态参与系数
φ——一阶模态最大振型振幅
M——广义质量　　P_{SD}——功率谱密度
f——一阶模态频率

在 Z 轴方向进行随机振动仿真试验，结果如图 13 所示，结果表明，在不同置信区间满足正态分布，经过计算证明仿真结果可信，应变和应力均满足机构材料强度和数据获取准确性。

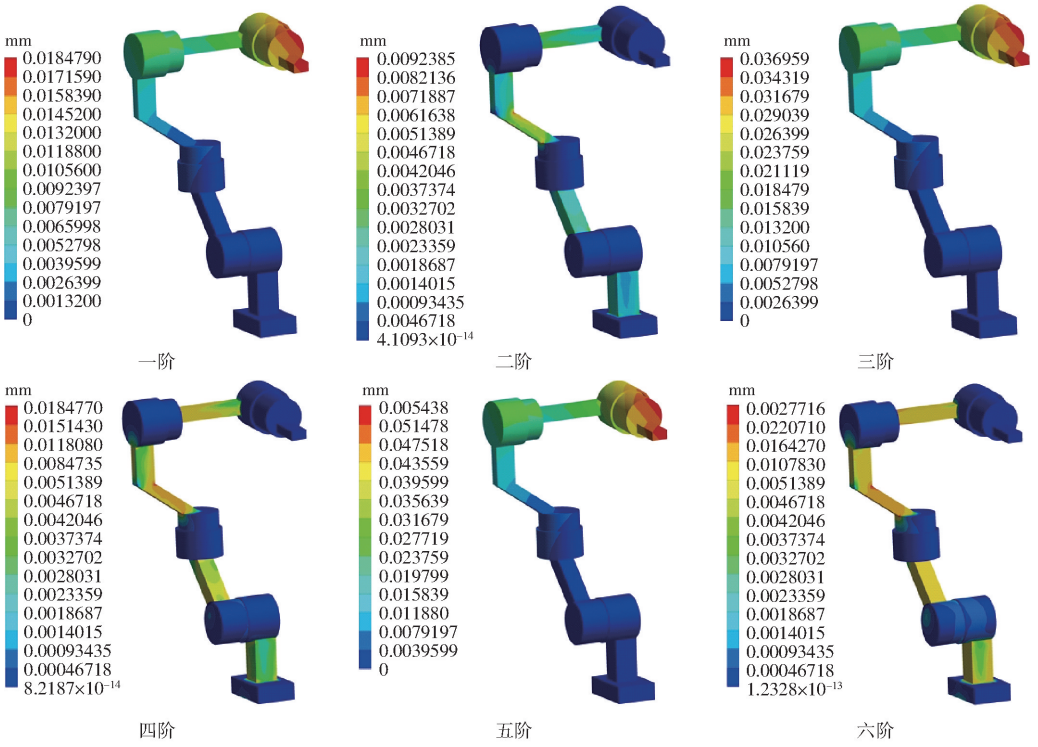


图 13　稳定机构随机振动分析云图

Fig. 13　Random vibration analysis cloud map of stabilization mechanism

3.2　虚拟样机及控制系统仿真

为了探究控制系统的稳定有效性，采用简化模型建立虚拟样机，并将其导入 ADAMS 中进行模拟。通过添加所有必要的约束和连接，将 ADAMS 中的机械模型导出到 Matlab 中，通过 Simulink 搭建控制模型，如图 14 所示。模糊控制器的输入变量为位置偏差及偏差变化率。

如图 15 所示，稳定系统能够提供反馈以补偿振动。通过改变模糊 PID 中函数的变量设置为 2 种调节模式。在补偿策略中，随着模糊 PID 控制下，系统能够在受到振动时提供及时反馈。然而，随着振动的加剧，其反馈效果会逐渐减小。由于草原道路条件下的显著振动，模糊 PID 中参数需要通过响应的优化算法来执行。特别是，可以基于振动的道路条件进行自学习。随着振动的增加，系统对振动补偿的学习能力逐渐增强。PID 控制的神经网络调整也存在问题，其响应不及时并且缺乏灵活性。因此在模糊 PID 控制器上需要引入优化算法（本文以 PSO 为例），其中可根据草原路况而确定不同的算法。

4　样机搭建与田间试验

4.1　样机及试验区选取

对设计方案进行实地应用的优化后，完成地面感知装置的整体搭建，样机如图 16 所示。整个装置由电源模块、车载吸盘、支撑机架、减震弹簧、双目深度相机、稳定机构、热红外传感器、平衡台、工控机、交互显示屏、网关设备、轮式底盘构成。

电源模块对整个系统（稳定系统、工控等）进行供电，供电单元由多组电池组成，电源电压为 24 V。电源模块添加了多组变压模块来满足不同用电设备的电压需求。车载吸盘根据整个系统的质量和尺寸进行定制，吸盘支撑架材质为铝合金，吸盘材质为丁腈橡胶，利用抽真空的方式实现较强吸力，可承载 30 kg 以上。支撑机架可根据实际情况进行底端布置和高度调整，分别由 11 根主支架和 3 根副支架构成。减震弹簧材质选用强度较高的钢丝绳，主体能完成初步减振并能在稳定机构静止时达到平衡状态。稳定机构各部件基于 3D 打印，为了便于测试和降低成本，材料选定为树脂。在稳定系统进行调控前，需要让各个轴的方向达到平衡。为了平衡稳定机构的俯仰轴，装置设置了平衡台，平衡台可用于放置热红外传感器。为了满足平衡质量还需要添加一些平衡块。双目深度相机选用 ZED 2i 型，热红外传感器选用 HM－TD2067T－25/X 型号。为了满足感知任务中数据的高质量获取和实现与 PC 端的高

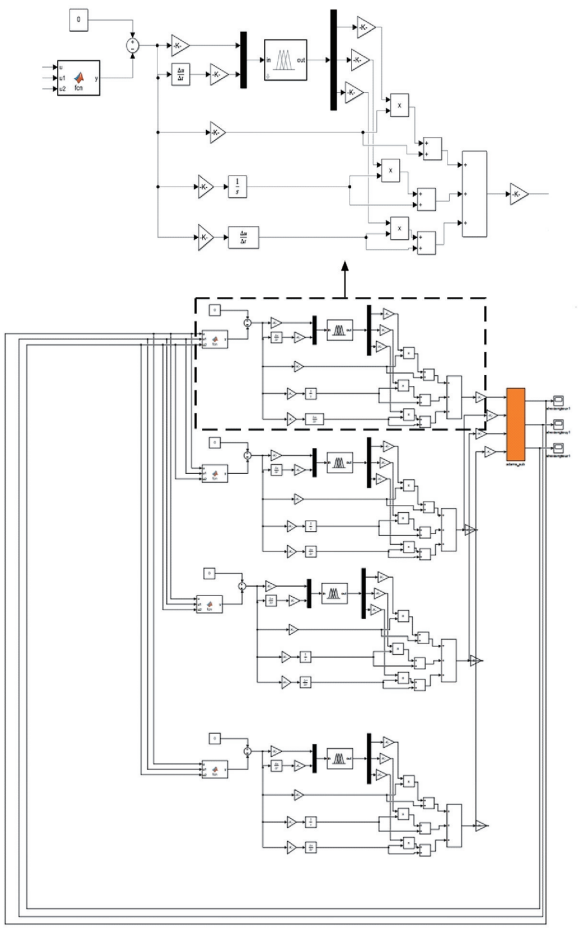


图 14 基于 Simulink 的控制模型

Fig. 14 Control model framework based on Simulink

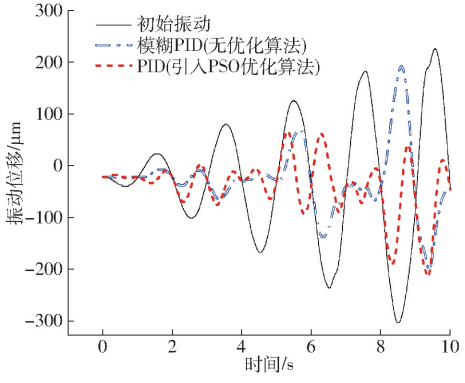


图 15 Z 轴方向振动位移补偿

Fig. 15 Z-direction vibration displacement compensation

速数据传输,选用英伟达公司生产的 Jetson Ori NX 型工控机作为整个系统的主控单元。

试验在内蒙古自治区锡林郭勒盟锡林浩特市白音锡勒牧场进行(如图 17 所示)。试验当天温度在 18°左右,能见度 17 km,气压 998 hPa。风力在 4 ~ 5 级,阵风达到 45 km/h 以上,风力较强。经测试,民用无人机 DJI P4 型(大疆创新科技有限公司)无法正常采集数据。为了评估稳定系统性能,开展实地试验,在稳定系统运行前后,车载相机分别采集 10 组图像数据,每组数据场景相同且包含 200 幅图像,

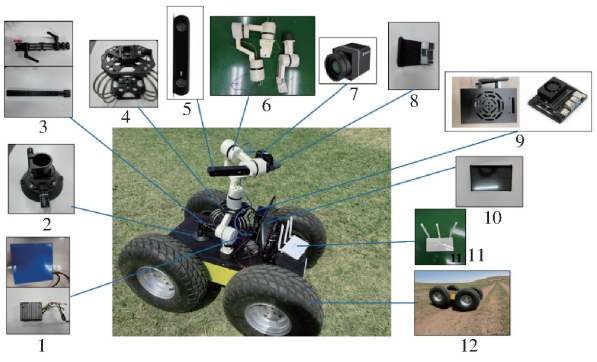


图 16 地面感知装置实物图

Fig. 16 Physical image of ground sensing device

1. 电源模块 2. 车载吸盘 3. 支撑机架 4. 减震弹簧 5. 双目深度相机 6. 稳定机构 7. 热红外传感器 8. 平衡台 9. 工控机 10. 交互显示屏 11. 网关设备 12. 轮式底盘

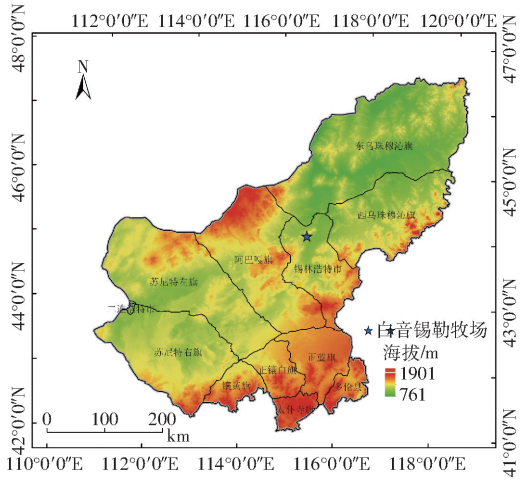


图 17 实地草地试验区域

Fig. 17 Field grassland experimental area

最终结果取均值。

4.2 植被成像评价指标

采用结构相似性指数(r_{SSIM})、峰值信噪比(r_{PSNR})和归一化互相关(r_{NCC})作为评价振动因素对植被成像质量影响的指标。r_{SSIM}用于评估两幅图像之间的相似度,考虑了亮度、对比度和结构。r_{SSIM}取值范围为[-1, 1],其值越接近 1,表示图像间的相似度越高,计算式为

$$r_{SSIM}(x,y)=\frac{(2\mu_x\mu_y+c_1)(2\sigma_{xy}+c_2)}{(\mu_x^2+\mu_y^2+c_1)(\sigma_x^2+\sigma_y^2+c_2)} \tag{16}$$

式中 x、y——两幅图像的像素值分布

μ_x、μ_y——x、y 像素值的均值

σ_x、σ_y——x、y 之间距离的协方差

c_1、c_2——稳定字母常数

σ_{xy}——两幅图像的结构相似性

r_{PSNR}用于衡量两幅图像之间的差异程度。它通过比较两幅图像的像素值来评估它们之间的差异。r_{PSNR}值越大,表明两幅图像的相似度越高。r_{MSE}是通过计算两幅图像相应像素之间的平方差得到的。计

算式为

$$r_{PSNR}=10\lg\left(\frac{\mathrm{MAX}^2}{r_{MSE}}\right) \tag{17}$$

其中 $$r_{MSE}=\frac{1}{mn}\sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n}(I(i,j)-K(i,j))^2 \tag{18}$$

式中　MAX——图像像素值的最大可能值(通常为 255,对应 8 位图像)

m、n——图像的高度和宽度

$I(i,j)$——位置(i,j)处参考图像像素值

$K(i,j)$——位置(i,j)处目标图像像素值

NCC 通过执行归一化互相关运算来量化两幅图像之间的相似度。该分析考虑了亮度和差异性的影响。NCC 值的范围为[-1,1]。值越接近 1,表示两幅图像之间的相似度越高。其中,r_{SSIM}强调视觉结构一致性,r_{NCC}强调像素强度线性关联,双指标联用可规避单一指标的盲区,为研究结论提供更坚实的支撑。相关计算式为

$$r_{NCC}(I_1,I_2)=\frac{\sum_{x,y}(I_1(x,y)-\mu_1)(I_2(x,y)-\mu_2)}{\sqrt{\sum_{x,y}(I_1(x,y)-\mu_1)^2}\sqrt{\sum_{x,y}(I_2(x,y)-\mu_2)^2}} \tag{19}$$

式中　I_1、I_2——两幅图像

μ_1、μ_2——两幅图像的平均值

为全面评估系统的实际应用效果,引入图像质量占比指标,以植被信息的有效识别作为评价标准。其计算式为

$$c_t=\frac{c_i}{c_z} \tag{20}$$

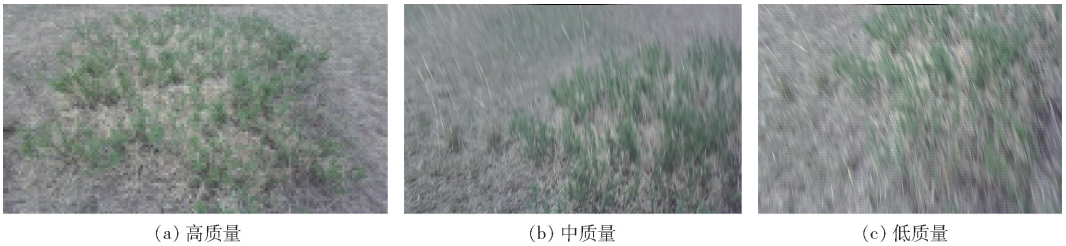
式中　c_t——图像质量占比

c_i——目标质量图像数

c_z——测试图像总数

图像质量分别定位高、中、低 3 等。图 18 为不同成像状况的示意图。图像质量的高低根据能否达到检测绿色植被的标准进行评估,该标准定义为通过实例分割算法,IoU 能否达到 0.5。

通过地上生物量感知系统采集图像数据。在稳定系统运行前后,车载相机分别采集 10 组图像数据,每组数据包含 200 幅图像,并根据 r_{NCC}、r_{PSNR}、r_{SSIM}指标对图像质量进行分析,最终取每组数据均值。试验结果见表 2。为验证其是否具有统计显著性,对 3 组指标进行了配对样本 t 检验,结果表明:稳定系统在极显著性水平($P<0.001$)下对图像质量有提升,且效应量均超过 7.8,证明性能提升具有



(a) 高质量　　(b) 中质量　　(c) 低质量

图 18　典型草原植被图像质量示意图

Fig. 18　Schematics of image quality of typical grassland vegetation

表 2　图像质量实地试验结果

Tab. 2　Field test results of image quality

测试	r_{NCC}		r_{PSNR}/dB		r_{SSIM}	
组号	A	B	A	B	A	B
1	0.536	0.924	40.3	51.8	0.513	0.905
2	0.437	0.871	37.6	50.5	0.402	0.853
3	0.453	0.885	35.3	48.6	0.397	0.863
4	0.412	0.834	41.5	52.0	0.385	0.825
5	0.521	0.911	33.7	45.3	0.463	0.889
6	0.426	0.852	36.0	48.1	0.353	0.843
7	0.471	0.894	35.9	50.2	0.485	0.896
8	0.473	0.906	42.3	53.5	0.522	0.920
9	0.393	0.817	25.6	44.4	0.368	0.806
10	0.480	0.905	40.5	52.9	0.457	0.884
平均值	0.460	0.880	36.9	49.7	0.435	0.868

注:A 和 B 分别表示为稳定系统启动前和启动后,下同。

实际意义。稳定系统启用前,r_{NCC}平均值为 0.460,稳定后提升至 0.880,提升幅度为 0.420,表明系统在保持图像特征方面具有显著优势。所有测试组在稳定后 r_{NCC}值均明显提高,最大提升幅度为 0.531。稳定前 r_{PSNR}平均值为 36.9 dB,稳定后增至 49.7 dB,提升了 12.8 dB,图像信噪比显著提高,表明稳定系统在提高图像清晰度和细节方面效果显著。所有测试组的 r_{PSNR}在处理后均有显著提升,最大提升值为 18.8 dB。稳定前 r_{SSIM}平均值为 0.435,稳定后提升至 0.868,提升幅度为 0.433,表明图像结构相似性得到显著改善,稳定系统在保持图像结构特征方面表现优异,最高提升值达到 0.552。

图像质量占比试验结果见表 3。为验证其是否具有统计显著性,对 3 组指标进行了配对样本 t 检验,结果表明,P 值均低于 0.001,效应量超过 5.5,稳定前后差异具有统计学意义。由表 3 可知,稳定系统显著提高了高质量图像占比,并有效降低了中、

表 3 图像质量占比实地试验结果

Tab. 3 Field test results on proportion of image quality %

测试组号	高质量占比		中质量占比		低质量占比	
	A	B	A	B	A	B
1	57.5	87.5	36.5	12.5	16.0	0
2	52.5	80.0	34.0	17.5	13.5	2.5
3	48.0	84.0	41.5	14.0	10.5	2.0
4	63.5	90.5	30.5	3.5	6.0	6.0
5	49.5	82.0	35.5	16.0	15.0	2.0
6	47.0	76.0	32.5	20.0	20.5	4.0
7	53.5	85.5	24.0	12.5	22.5	2.0
8	60.5	86.5	18.5	5.0	21.0	8.5
9	63.5	81.0	20.0	13.5	16.5	5.5
10	66.5	93.0	26.5	6.0	7.0	1.0
平均值	56.2	84.6	29.9	12.1	14.9	3.4

低质量图像占比。稳定系统启用后,高质量图像占比平均增加 28.4 个百分点,显著提升了图像的清晰度和质量。中质量图像占比平均减少 17.8 个百分点,低质量图像占比则平均减少 11.5 个百分点,进一步验证了系统在图像质量提升的有效性。

5 结论

(1)对草原地形路况引起的振动进行实地调研分析,结果表明:当振动位移在 50 μm 以内,振动频率在 15 Hz 以内时,整体成像质量较好;要对 Z 轴方向的振动进行较 X、Y 轴方向更大幅度的补偿。根据上述需求,完成地表植物量感知装置的整体设计。据牛顿-欧拉法,对稳定机构进行 Z 轴方向上的动力学分析,得出关键参数,完成图像感知稳定机构的设计和控制方案。

(2)基于 ANSYS 软件,通过仿真对稳定机构进行随机振动分析,试验结果表明:在不同置信区间满足正态分布,证明无论是应变还是应力均满足机构材料强度和数据获取准确性。通过 ADAMS 和 Matlab 进行联合仿真,利用 Simulink 搭建控制模型,证明通过优化方法的模糊 PID 控制方法可以有效满足振动反馈。

(3)完成整个系统的搭建和软硬件集成,实地试验结果表明:图像质量在稳定系统的调控后有显著提升。试验组的平均 r_{NCC}、r_{PSNR} 和 r_{SSIM} 分别提升 0.420、12.8 dB 和 0.433。系统采集的图像数据中,高质量图像占比平均增加 28.4 个百分点,中质量图像占比平均减少 17.8 个百分点,低质量图像占比平均减少 11.5 个百分点,验证了系统在提升整体图像质量方面的有效性。

参 考 文 献

[1] LUO R, KUZYAKO Y, LIIU D, et al. Nutrient addition reduces carbon sequestration in a Tibetan grassland soil: disentangling microbial and physical controls[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 144: 107764.

[2] CHEN Y, XU T, VERESOGLO S D, et al. Plant diversity represents the prevalent determinant of soil fungal community structure across temperate grasslands in northern China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 110: 12 - 21.

[3] CAI Y, ZHANG F, DUAN P, et al. Vegetation cover changes in China induced by ecological restoration-protection projects and land-use changes from 2000 to 2020[J]. Catena, 2022, 217: 106530.

[4] 王圆,毕玉革. 基于无人机高光谱的荒漠草原地物精简学习分类模型[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 236 - 243.
WANG Yuan, BI Yuge. Simplified learning classification model based on UAV hyperspectral remote sensing for desert steppe terrain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 236 - 243. (in Chinese)

[5] CHENG Y, LAN S, FAN X, et al. A dual-branch weakly supervised learning based network for accurate mapping of woody vegetation from remote sensing images[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023, 124: 103499.

[6] QIN Q, XU D, HOU L, et al. Comparing vegetation indices from Sentinel - 2 and Landsat 8 under different vegetation gradients based on a controlled grazing experiment[J]. Ecological Indicators, 2021, 133: 108363.

[7] BROWNING D M, MAYNAR J J, KARL J W, et al. Breaks in MODIS time series portend vegetation change: verification using long-term data in an arid grassland ecosystem[J]. Ecological Applications, 2017, 27(5): 1677 - 1693.

[8] YAO Z, QING H, YANG L, et al. Non-destructive aboveground biomass estimation of Leymus chinensis individual across large scale[J]. Ecological Indicators, 2021, 131: 108212.

[9] LI H, LI F, XIAO J, et al. A machine learning scheme for estimating fine-resolution grassland aboveground biomass over China with Sentinel - 1/2 satellite images[J]. Remote Sensing of Environment, 2024, 311: 114317.

[10] GUO R, GAO J, FU S, et al. Estimating aboveground biomass of alpine grassland dduring the wilting period using in situ hyperspectral, Sentinel - 2, and Sentinel - 1 data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 1 - 16.

[11] LIIAN X, MORFOPOULO C, GENTINE P. Water deficit and storm disturbances co-regulate Amazon rainforest seasonality [J]. Science Advances, 2024, 10(36): eadk5861.

[12] WANG Y, ALBRECH C M, ZHU X X. Multilabel-guided soft contrastive learning for efficient earth observation pretraining [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, arXiv:2405.20462.

[13] YASUD K, SHIBASAK R, YASUD R, et al. Terminal congestion analysis of container ports using satellite images and AIS [J]. Remote Sensing, 2024, 16(6): 1082.
[14] SHAH K, BALLARD G, SCHMIDT A, et al. Multidrone aerial surveys of penguin colonies in Antarctica[J]. Science Robot, 2020, 5(47): eabc 3000.
[15] O'CONNELL M, SHI G, SHI X, et al. Neural-Fly enables rapid learning for agile flight in strong winds[J]. Science Robot, 2022, 7(66): eabm6597.
[16] 郑一力,田真,关鹏,等. 草原植被盖度与物候智能监测系统研制[J]. 农业工程学报, 2023, 39(18): 162 - 171.
ZHENG Yili, TIAN Zhen, GUAN Peng, et al. Development of an intelligent monitoring system for vegetation coverage and phenology in grassland[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(18): 162 - 171. (in Chinese)
[17] 肖如林,高吉喜,刘爱军,等. 多尺度特征和多模型相融合的草原区牧畜遥感监测[J]. 遥感学报,2023,27(10):2383 - 2394.
XIAO Rulin, GAO Jixi, LIU Aijun, et al. Remote sensing monitoring method of livestock in grassland based on multi-scale features and multi-models fusion[J]. Journal of Remote Sensing, 2023, 27(10): 2383 - 2394. (in Chinese)
[18] VERMA M, LAFARGA V, BARON M, et al. Active stabilization of unmanned aerial vehicle imaging platform[J]. Journal of Vibration and Control, 2020, 26(19 - 20): 1791 - 1803.
[19] KORTMANN F, PEITZMEIER H, MEIER N, et al. Enabling road condition monitoring with an on-board vehicle sensor setup [C]//2019 IEEE Sensors, 2019:1 - 4.
[20] ZHAO F, DONG M, QIN Y, et al. Adaptive neural-sliding mode control of active suspension system for camera stabilization [J]. Shock and Vibration, 2015, 2015: 1 - 8.
[21] SUN M, FENG Y, WANG Y, et al. Design, analysis and experiment of a bridge-type piezoelectric actuator for infrared image stabilization[J]. Micromachines, 2021, 12(10): 1197.
[22] SUDHARSAN J, KARUNAMOORTHY L. Path planning and co-simulation control of 8 DOF anthropomorphic robotic arm[J]. International Journal of Simulation Modelling, 2016, 15(2): 302 - 312.
[23] KANG M, FAN Z, YU X, et al. Division-merge based inverse kinematics for multi-DOFs humanoid robots in unstructured environments[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107090.
[24] LI T, XIE F, ZHAO Z, et al. A multi-arm robot system for efficient apple harvesting: perception, task plan and control[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 107979.
[25] WANG Y, JIA P, WANG Z, et al. Performance evaluation of optical-beam stabilization platforms with different supports used in large-aperture electro-optical system[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(2): 1 - 10.
[26] ALIZADEGAN A, ZHAO P, NAGAMUNE R, et al. Robust control of miniaturized optical image stabilizers against product variabilities[J]. Control Engineering Practice, 2018, 80: 70 - 82.
[27] ZHANG Y, WANG T, YOU Y, et al. A transformer-based image detection method for grassland situation of alpine meadows [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 210: 107919.
[28] ZHANG Y, WANG T, YOU Y, et al. A method for estimating the height of Achnatherum splendens based on image processing [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224: 109226.
[29] ZHANG Y, WANG T, YOU Y, et al. Design of vehicle image stabilization system and imaging quality impact test for typical grasslands[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024: 1 - 26.
[30] ZHANG Y, WANG T, YOU Y, et al. Optimization design method for typical grassland perception robot system[J]. Memetic Computing, 2024, 16(4): 563 - 586.