

基于 Harris 和卡尔曼滤波的农业机器人田间稳像算法

王 杰¹ 经俊森^{1,2} 陈正伟¹ 徐照胜¹ 王少平¹

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230031; 2. 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 合肥 230601)

摘要: 针对田间颠簸环境影响农业机器人采集实时稳定图像问题,提出了基于 Harris 和卡尔曼滤波的农业机器人田间稳像算法。首先,利用摄像头获取田间抖动视频图像序列,进行图像子区域划分并计算各区域灰度均方差,进而确定各区域 Harris 角点阈值;通过自适应角点阈值设置,增加角点距离约束,完成图像角点检测。然后,对检测出的角点进行光流跟踪,计算出帧间运动估计参数。最后,利用自适应卡尔曼滤波算法对运动估计参数进行平滑操作并动态调整滤波平滑性能,获得精确运动估计矢量。测试结果表明,改进后的 Harris 角点检测算法区域平均分布标准差减小;自适应卡尔曼滤波算法在保证平滑随机运动前提下,跟踪主动运动性能平均提升 30.75 个百分点;稳像后的图像峰间信噪比提升 15.93%,单帧处理时间为 25.66 ms,满足农业机器人 30 f/s 高速图像采集时同步稳像对实时性要求。

关键词: 农业机器人; 稳像算法; Harris 角点; 卡尔曼滤波

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)01-0030-07

OSID:



Field Image Stabilization Algorithm for Agricultural Robot Based on Harris and Kalman Filter

WANG Jie¹ JING Junsen^{1,2} CHEN Zhengwei¹ XU Zhaosheng¹ WANG Shaoping¹

(1. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

2. Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Aiming to solve the problem of image jitter of the tracked agricultural robot on the bumpy road in the field. Firstly, the field jitter video image sequence was obtained by the camera, the image was divided into molecular regions, and the mean square error of gray value of each region was calculated, and then the Harris corner threshold of each region was determined, and the adaptive corner threshold was set. The corner distance constraint was added to complete the corner detection of the image. Secondly, optical flow tracking was performed on the detected corners, and the parameters of interframe motion estimation were calculated. Finally, the motion estimation parameters were smoothed by the adaptive Kalman filter algorithm, and the smoothing performance of the filter was dynamically adjusted to obtain the accurate motion estimation vector. The experimental results showed that the improved Harris corner detection algorithm reduced the standard deviation of the average distribution of the region. Under the premise of ensuring smooth random motion, the tracking performance of active motion of adaptive Kalman filter was improved by 30.75 percentage points. After image stabilization, the signal to noise ratio of the image was improved by 15.93%, and the processing time of single frame was 25.66 ms, which can meet the real-time processing at the acquisition rate of 30 f/s. The traditional Harris corner detection algorithm was improved to overcome the phenomenon of uneven corner distribution and easy clustering. An adaptive Kalman filter algorithm was proposed to suppress the random motion of the camera and improve the performance of tracking the active motion of the camera, which had a good image stabilization performance in tracked agricultural robots.

Key words: agricultural robot; image stabilization algorithm; Harris corner; Kalman filtering

收稿日期: 2022-02-22 修回日期: 2022-03-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020AAA0108103)、中国科学院机器人与智能制造创新研究院自主项目(C2021002)和中国科学院合肥物质科学研究院院长基金项目(YZJJZX202013)

作者简介: 王杰(1986—),男,助理研究员,主要从事智能农机装备研究,E-mail: jwang@hficas.ac.cn

通信作者: 王少平(1976—),男,副研究员,主要从事自动驾驶应用技术研究,E-mail: spwang@iim.ac.cn

0 引言

随着智慧农业^[1-2]发展,农业机器人辅助或者替代人工参与农业作业逐渐成为研究热点,其中计算机视觉是重要的机器人环境感知研究内容,如植物工厂、温室大棚以及丘陵果园中的植株病虫害^[3-4]巡检机器人^[5-6]、高附加值果蔬精准施药机器人^[7-8]以及各类采摘作业机器人^[9-10]等。通常,研究人员需要机器人行走运动同时进行高速图像采集处理工作。例如,在农业巡检机器人病虫害巡检方面,机器人通过前端图像采集,利用专家数据库或深度学习等方法实现特定病虫害自动识别,实时向后端传输采集图像,交付人工远程复检或完成机器人无法自动识别的内容,提升巡检效率,并将图像信息作为后期植保、施肥等管护作业基础数据支持^[11];在农业机器人自主行走方面,针对无卫星或者卫星信号严重遮挡情况下的机器人定位导航问题,基于视觉或视觉与激光雷达融合技术的定位导航方法是区别于 UWB、蓝牙等技术的重要研究内容^[12]。由于田间路面起伏,易造成机器人视觉图像抖动,且机器人运动速度越高,抖动越严重,不利于类似前述图像采集数据进一步应用,譬如通过实时画面对作物表型进行人工精准识别,以及基于视觉或视觉与激光雷达融合的田间自主行走导航控制。因此,针对农业机器人运动图像采集工作,研究实时稳像方法具有重要意义。

电子稳像技术作为图像处理的一个重要发展方向,在军事、航空等领域研究较多。相比云台等专业稳像设备,电子稳像不需额外硬件,具有一定成本优势,且可以针对图像感兴趣区域进行局部稳像,尽可能提高稳像实时性,减小甚至消除抖动,获得平稳图像序列,因此,农业领域相关研究也在逐渐增多。电子稳像方法^[13-15]中最关键技术是运动估计。根据运动估计方法差异,分为块匹配^[16]、位平面匹配法^[17]、灰度投影法^[18]、特征匹配法^[19]和光流法^[20]。光流法具有跟踪精度高和应用范围广等优势,是电子稳像研究热点。由于传统光流法是计算整幅图像光流矢量,存在计算量大和实时性差缺陷,所以本文对每帧图像进行角点检测,仅计算角点处光流,达到降低计算量和提高整体算法实时性目的。因此,当使用光流法作为运动估计方法时,角点检测必不可少。研究表明,利用 SIFT^[21]和 SURF^[22]提取特征点进行稳像的速度相较于使用基于 Harris 角点检测的稳像算法慢很多。而传统 Harris 角点检测算法^[23]存在角点提取分布不均匀,角点数目少问题,尤其在农业领域,由于环境复杂,该问题更为突出。针对以

上问题,本文通过改进 Harris 角点检测算法和卡尔曼滤波算法,设计一种适用于农业机器人颠簸田间环境的实时电子稳像方法。

1 研究方法

1.1 传统 Harris 角点检测原理

HARRIS 等^[24]首次提出 Harris 角点检测方法,其主要思路是利用图像自相关性,并结合微分运算来提取图像特征点,具有很好鲁棒性。

Harris 角点检测核心是描述像素邻域梯度分布的二阶矩阵 M ,其具体形式为

$$M = \sum_{(x,y) \in w} w(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 I_x ——图像在 x 方向上梯度

I_y ——图像在 y 方向上梯度

$w(x,y)$ ——以点 (x,y) 为中心的窗口函数,通常取高斯函数

二阶矩阵 M 存在 2 个特征值 λ_1 和 λ_2 ,特征值反映了像素点的位置关系和突出程度。通常利用两个特征值构建角点响应函数 re

$$re = \det M - k \operatorname{tr}(M)^2 \quad (2)$$

式中 $\det M$ ——矩阵 M 的行列式

$\operatorname{tr}(M)$ ——矩阵 M 的迹

k ——系数,取 0.04 ~ 0.06

角点响应函数 re 值越大的点,表明该点突出程度越高,代表性越强。如果 re 大于设定阈值 T ,则该像素点为角点,反之不为角点。

1.2 改进的 Harris 角点检测算法

传统 Harris 角点检测算法基于阈值 T 进行检测,如果整幅图像采用相同阈值 T ,当图像灰度差异过大时,将导致特征点分布不均匀,易造成特征点聚簇且影响算法实时性。因此,本文设计了一种自适应阈值选取方法:将图像分割为无重合子区域,通过计算每块区域的灰度均方差进行自适应阈值构建。

当某块图像区域灰度值具有差异明显,反映该区域存在大量的特征角点,反之特征角点较少。图像灰度差异通常由图像灰度均方差计算获得,灰度均方差较大区域,应设置较大阈值,灰度均方差较小区域,应设置较小阈值。通过不同区域设置不同阈值,保持每块区域的特征角点分布更加均匀。

具体的步骤如下:

(1) 将每帧图像进行等比例分割,分割成 3×3 同等尺寸子区域。

(2) 计算每个子区域平均灰度,计算式为

$$\bar{I} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I(i,j) \quad (3)$$

式中 m, n ——子区域的尺寸参数

$I(i, j)$ ——图像在点 (i, j) 的灰度

(3) 计算每块子区域灰度均方差 P , 计算式为

$$P = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_i^m \sum_j^n (I(i, j) - \bar{I})^2} \quad (4)$$

(4) 计算子区域中最大灰度均方差 $P_{\max}$ 。

(5) 根据各子区域灰度均方差与 $P_{\max}$ 的比例设定自适应阈值 T , 计算式为

$$T = \frac{P}{P_{\max}} T_0 \quad (5)$$

式中 T_0 ——初始设置最大的阈值参数

该阈值设置方法能够实现图像灰度差异较大时, 提取到的特征角点分布均匀。

为了克服局部角点过于聚簇的问题, 需要对提取后的角点增加距离约束。具体角点选取步骤: 先通过选取每块子区域的角点响应函数 re 值大于该区域自适应阈值 T 的像素点作为特征角点, 并避免选取的点距离过近, 设定距离约束条件 d , 图像尺寸与 d 相关, 本文选取 5 个像素; 然后对特征角点依次遍历, 若在特征角点邻域内存在其他特征角点, 比较两个点之间的距离, 若距离小于约束条件 d , 再判断两点测量噪声协方差矩阵 R 值, 保留 R 值更大的点作为角点。

针对田间路况, 采用基于图像金字塔的 L-K 光流法^[25]对提取的角点进行跟踪, 再利用 RANSAC^[26]算法去除 Harris 角点检测中存在的误匹配点, 最终得到水平偏移量 dx 、垂直偏移量 dy 和旋转量 $d\theta$ 。

1.3 自适应卡尔曼滤波算法

前述运动估计参数包含相机的主动运动和随机运动, 可利用卡尔曼滤波算法^[27]对相机的运动进行分离, 对相机的随机运动进行抑制或消除, 仅保留相机的主动运动, 从而实现对得到的运动估计量的平滑操作。

卡尔曼滤波的预测模型计算式为

$$\begin{cases} X(k|k-1) = AX(k-1|k-1) \\ P(k|k-1) = AP(k-1|k-1)A^T + Q \end{cases} \quad (6)$$

式中 $X(k|k-1)$ ——第 k 帧对应的状态量预估值

$P(k|k-1)$ ——第 k 帧对应的状态协方差

A ——系统的状态转移矩阵

Q ——过程噪声方差矩阵

卡尔曼滤波的更新模型计算式为

$$\begin{cases} X(k|k) = X(k|k-1) + K(k)(Z(k) - HX(k|k-1)) \\ K(k) = HP(k-1|k-1)H^T(HP(k|k-1)H^T + R)^{-1} \\ P(k|k) = (I - K(k)H)P(k|k-1) \end{cases} \quad (7)$$

式中 $K(k)$ ——第 k 帧卡尔曼增益

$Z(k)$ ——测量值

H ——观测矩阵

$P(k|k)$ ——平滑滤波后协方差

I ——单位矩阵

田间抖动视频运动估计参数进行平滑过程中, R 和 Q 取值既要考虑滤除抖动分量也要保留主动运动分量, 经试验可取 $Q = 0.01$ 和 $R = 1$ 对运动参数进行滤波, 能够达到较好滤波效果。

当田间路面起伏较大时, 运动估计变化会很剧烈, 如果全局均设置单一 Q 和 R 进行滤波操作, 输出结果将会跟原曲线存在较大偏差, 造成输出的视频图像存在大范围未定义区域, 增加运动补偿的难度且降低图像质量。为了解决全局单一滤波参数问题, 本文研究了自适应调整滤波参数的卡尔曼滤波算法。

由于 Q 取值较小, 难以根据运动量进行准确调节, 故本文通过自适应调节参数 R , 提高整体算法跟踪及平滑效果。当视频序列中存在大幅度主动运动时, 应减小 R , 提高系统跟随性能。

先设一个长度为 L 的队列, 将得到的运动估计参数 $(dx, dy, d\theta)$ 存入队列; 当队列已满时, 计算当前帧运动估计量及整个队列运动估计量总和 $D(dx, dy, d\theta)$, 之后删除队首元素, 当前帧运动估计量入队, 根据总和 D 自适应修正 R 值。具体计算方式为

$$D(dx, dy, d\theta) = \sum_{i=1}^L (dx, dy, d\theta) \quad (8)$$

$$R(dx, dy, d\theta) = \left(\frac{R_0}{3|D_x|}, \frac{R_0}{3|D_y|}, \frac{R_0}{3|D_\theta|} \right) \quad (9)$$

式中 R_0 ——初始值参数

D_x, D_y, D_θ —— x, y, θ 每个方向估计量单独总和

当存在主动运动时, D 中各方向累积量将会增加, 此时 R 将会减小, 卡尔曼滤波器增益 K 增加, 整体跟随性能提高, 保留了主动运动; 反之, 累积量较小, 则相机主动运动量较小, 滤波器平滑性能提升, 有效去除随机抖动。

经过卡尔曼滤波后得到抖动运动估计量, 对前后帧图像进行仿射变换, 利用双线性插值^[28]对变换后图像中未定义区域进行校正, 最终输出稳像后图像。

2 试验

2.1 试验设计

本文基于中国科学院合肥物质科学研究院智能机械研究所研制的履带式农业机器人平台进行试验。如图 1 所示, 机器人运动速度 $1.8 \sim 5.4 \text{ km/h}$,

采用的相机传感器为森云智能公司 SG2-IMX390C 型低噪声卷帘快门摄像机,帧频率为 30 f/s,快门时间约 5 ms,水平视场角为 90°,垂直视场角为 47°,有效焦距为 4 mm,曝光时间充足,不易出现单帧图像晃动、斜坡图形和部分曝光,可以近乎实时地捕获和处理高分辨率图像。摄像机水平安装于农业机器人平台正前方。



图 1 试验平台及场景

Fig. 1 Experiment platform and scene

1. 信号接收器 2. 农业机器人平台 3. 摄像头

为检验改进后 Harris 角点检测稳像算法对田间起伏路面适用性和稳像效果,本文选取长丰县岗集镇皖信家庭农庄葡萄树、火龙果和橘树种植试验场景。通过农业机器人平台以分辨率 1 920 像素 × 1 080 像素、帧率 30 f/s 采集机器人田间运动期间起伏路况视频图像。

2.2 特征点提取试验

图 2a 为农业机器人平台在橘树田间路况场景,图 2b 为传统 Harris 角点检测算法提取的角点示意

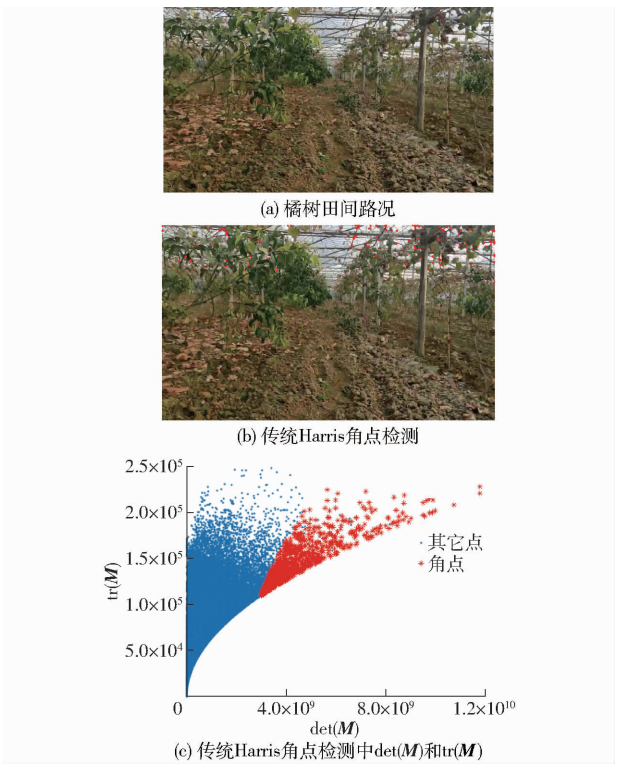


图 2 传统 Harris 角点检测算法

Fig. 2 Traditional Harris corner detection algorithm

图。角点检测过程中,计算出角点响应函数中 $\det(M)$ 与 $\text{tr}(M)$ 值关系如图 2c 所示。在设置初始阈值时,通常设为角点响应函数 re 最大值的 k 倍, k 一般取 0.005 ~ 0.015,为了提取足够多角点,本文 k 取 0.005。

通过图 2b 可知,传统 Harris 角点检测算法提取到的角点全部集中在图像上半部分,分布非常不均匀,且提取的角点数目较少。由图 2c 可见,传统 Harris 角点检测算法提取的角点呈现聚簇现象,导致提取结果不均匀。

由图 3a 可见,与传统 Harris 角点检测算法相比,改进后提取的角点分布更加均匀。由图 3b 可见,由于采用子区域自适应阈值设定,角点呈现均匀分布。通过图 3c 和图 3d 对比可见,改进前后设置的特征角点尺寸相同,改进前角点间易发生聚簇现象,导致同一块区域的特征角点连在一起难以区分,角点误匹配率高,不利于后续光流跟踪;改进后同一区域的角点间隙明显,避免了局部角点过于聚集问题。

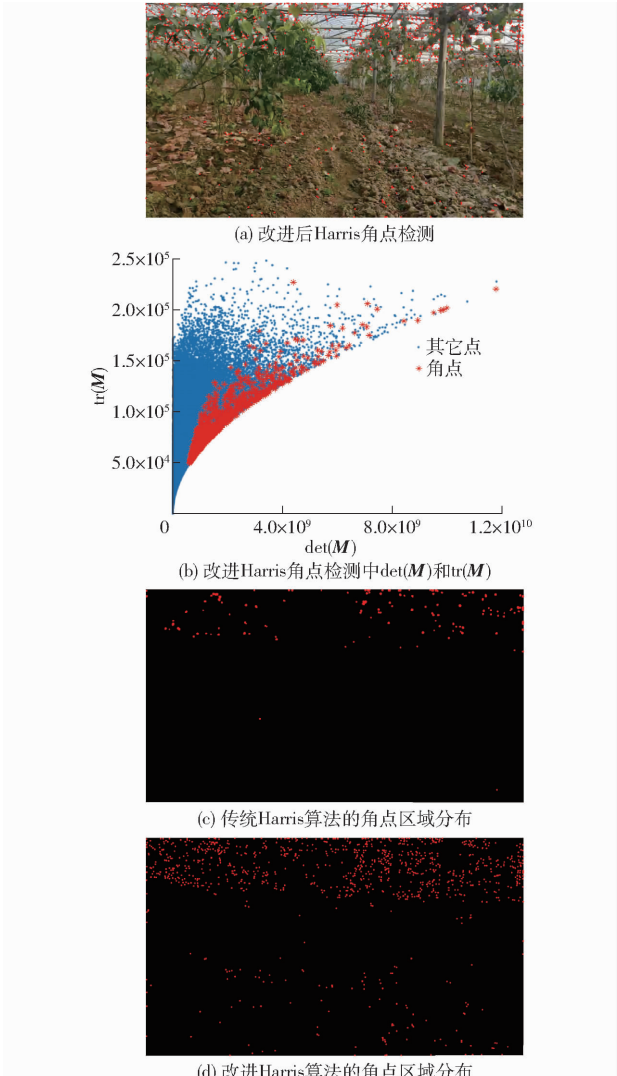


图 3 改进 Harris 角点检测算法

Fig. 3 Improved Harris corner detection algorithm

为了验证改进后 Harris 角点检测的分布情况,在 VS2013 + Inter (R) Core (TM) i5 - 8300H CPU 试验设备上分别对 300 幅图像使用改进前后的 Harris 角点检测方法,进行角点提取。将每幅图像划分成 3×3 子区域,统计每一子区域的角点数,最终计算整幅图像的子区域角点分布标准差。为确保单一变量原则,保持改进前后角点检测方法角点数提取一致,将 300 幅图像平均分成 3 份,每份角点数分别为 500、800 和 1 000,计算平均标准差。通常角点数可根据图像尺寸确定,本文起始角点数设置 500,即可较好观测角点分布情况。为了分析角点数对平均分布标准差影响,需要增加角点数,故设置了 800 和 1 000。表 1 为改进前后 Harris 角点的区域平均分布。

表 1 改进前后 Harris 角点的区域平均分布

Tab.1 Regional average distribution of Harris corner points before and after improvement

角点数	分布标准差		降低率/%
	改进前	改进后	
500	80.236	75.097	6.40
800	130.309	110.884	14.91
1 000	163.499	131.291	19.70

通过表 1 可得,改进后 Harris 角点检测方法的分布标准差均小于改进前,表明提取的角点分布比原先更加均匀。随着角点数的增加,改进后标准差的降低率将增大,分布将更加均匀。

2.3 运动平滑试验

针对不同 Q 、 R 参数在卡尔曼滤波中影响,本文研究了参数 Q 、 R 在实际运动参数平滑中的特点。图 4 为未改进前卡尔曼滤波器中不同 Q 、 R 值的滤波效果。由图 4 可知, Q 越小、 R 越大曲线越平滑。保留相机主动运动情况下,滤波后的曲线越平滑表明高频抖动分量消除效果越好。综合图 4a、4b 可知, $Q = 0.01$ 、 $R = 1$ 时,平滑效果最好。

针对卡尔曼滤波器全局单一 Q 、 R 参数问题,当相机主动运动分量较大时,恒定系数不能很好保持相机主动运动,需要设置自适应卡尔曼滤波系数进行平滑操作。由于 Q 系数较小,改进卡尔曼滤波器仅改变 R 。图 5 为改进前后卡尔曼滤波器对旋转量平滑效果,改进前后 Q 设置均为 0.01,而改进前 R 设置为 1,改进后 R 设置为自适应,其值同累积量相关。可以看出,当主动运动较小时,改进前后都能保证较好平滑效果;当主动运动较大时,改进前滤波后曲线明显不能跟踪相机运动。

图 5a 为跟踪存在单峰主动运动时改进前后卡尔曼滤波平滑结果,改进前其峰值仅为原始参数 25.4%,跟踪效果差,改进后其峰值为原始参数

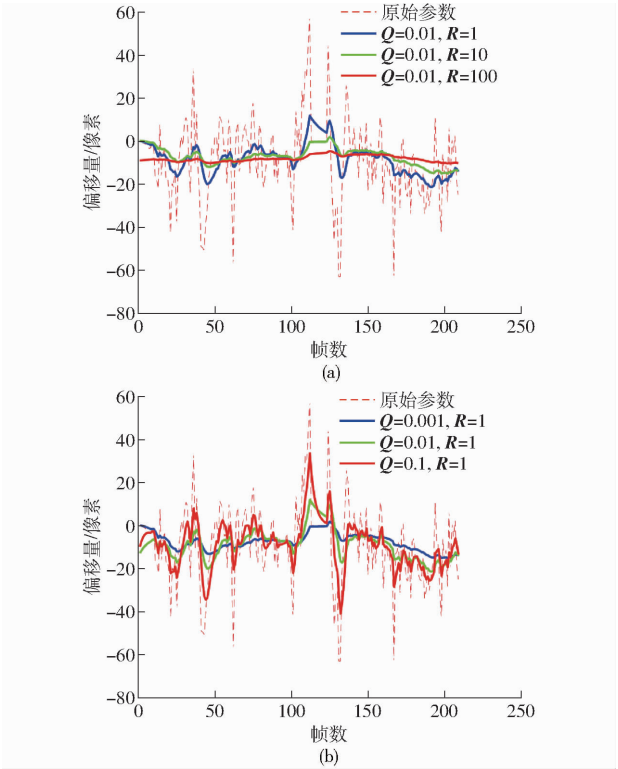


图 4 R 和 Q 取值不同时的滤波结果

Fig.4 Filter results with different values of R and Q

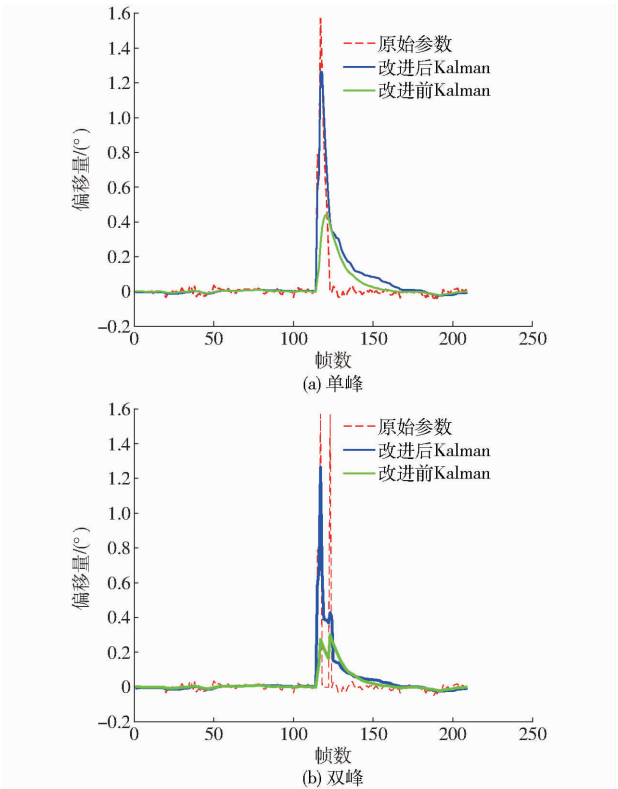


图 5 改进前后卡尔曼滤波器的平滑结果

Fig.5 Smoothing results of Kalman filter before and after improvement

80.5%,在保证随机运动平滑效果前提下,其跟踪效果提升 55.1 个百分点,极大提升了跟踪性能。

由图 5b 可见,跟踪第 1 个单峰时,改进后跟踪效

果明显优于改进前,跟踪第 2 个单峰,改进前其峰值为原始参数 18.4%,而改进后其双峰值为原始参数 24.8%,在保证随机运动平滑效果的前提下,其跟踪效果提升 6.4 个百分点。综合单双峰跟踪情况,改进后平均跟踪性能比改进前提升 30.75 个百分点。

2.4 稳像效果试验

本文以常用的峰值信噪比 (PSNR)^[29] 和单帧处理时间指标评估测试算法有效性。PSNR 越大,说明前后两帧图像重合度越高,图像稳定效果越好;单帧处理时间越短,实时性越好。

取试验平台在田间采集的任意 200 帧抖动视频图像计算稳像前后的 PSNR。图 6 为稳像前后图像序列的 PSNR,可见针对同一帧图像:稳像后的 PSNR 普遍大于稳像前,稳像前图像平均 PSNR 为 18.52 dB,稳像后图像平均 PSNR 为 21.47 dB,提高 2.95 dB,相对于稳像前提高 15.93%。

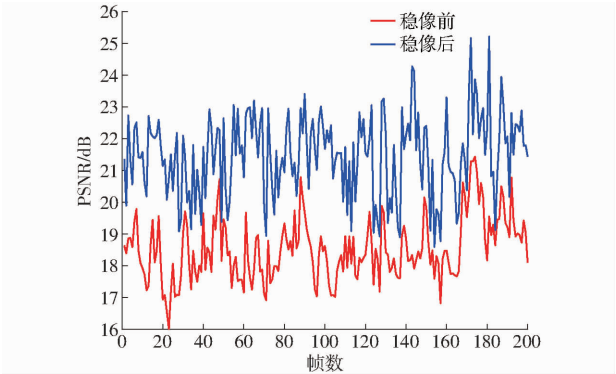


图 6 稳像前后图像 PSNR 对比结果

Fig.6 PSNR comparison results before and after image stabilization

为更加直观表明稳像前后效果,如图 7 所示,设置相邻帧图像稳像前后对照,其中红色直线为参考辅助线,便于观察基于参照物图框中线选取。通过对比稳像前后背景参照物离辅助线的距离,可直观评估稳像效果:稳像前同一水平线下,景物位置发生了明显偏移,而稳像后景物位置几乎在同一位置,稳

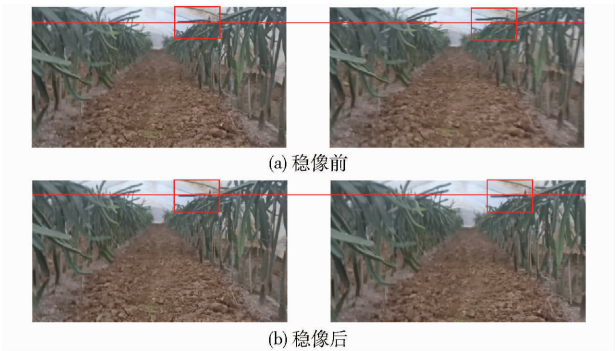


图 7 稳像前后相邻帧对比结果

Fig.7 Comparison results before and after image stabilization

像后视频抖动干扰去除明显。

为验证本文算法改进效果,选择基于 Harris 角点检测的常用稳像算法开展对比测试。测试图像数据均来源于试验平台采集的田间抖动视频。测试中设置特征点采集个数为 200,进一步提高稳像算法实时性。试验仿真环境为 ubuntu 16.04 操作系统及 ROS 架构,系统配置为 Intel (R) Core (TM) i7 - 8700CPU, 3.20 GHz。为验证改进后的 Harris 角点检测算法与自适应卡尔曼滤波算法对稳像效果影响,分别进行了测试。

通过表 2 可知,本文算法稳像后图像的 PSNR 相比于稳像前提高 15.93%,单帧处理时间为 25.66 ms;改进后 Harris 角点检测算法相对于改进前,PSNR 提高 3.51 个百分点;自适应卡尔曼滤波算法相对于改进前,PSNR 提高 1.56 个百分点;本文算法 PSNR 总体提高 6.64 个百分点。自适应卡尔曼滤波算法对实时性影响很小,本文单帧处理时间为 25.66 ms,相对于未改进前缩短 44.42%,能够满足帧速率 30 f/s 下的实时处理。

表 2 稳像效果和速度

Tab.2 Image stabilization effect and speed

方法	PSNR/ dB	PSNR 增 长率/%	单帧处理 时间/ms
原始视频	18.52		
改进前 Harris + 传统卡尔曼滤波	20.24	9.29	46.17
改进前 Harris + 自适应卡尔曼滤波	20.53	10.85	46.35
改进后 Harris + 传统卡尔曼滤波	20.89	12.80	25.41
本文算法	21.47	15.93	25.66

3 结论

(1) 分析了农业机器人平台采集的田间抖动视频图像序列,利用改进 Harris 角点检测算法,解决了传统 Harris 角点检测算法提取角点分布不均匀和局部角点聚簇问题;采用自适应卡尔曼滤波算法,解决了传统卡尔曼滤波算法无法很好跟踪相机主动运动问题;最后经过稳像处理抑制了相机随机抖动对视频图像影响。

(2) 试验表明,改进后 Harris 角点检测算法能有效解决角点聚簇问题,角点区域平均分布标准差随着角点数目的增加而下降;自适应卡尔曼滤波算法在保证平滑随机运动前提下,跟踪主动运动性能提升 30.75 个百分点;本文算法同传统基于 Harris 角点检测的稳像算法相比,PSNR 提高 6.64 个百分点,单帧处理时间缩短 44.42%,且稳像后图像 PSNR 相比于稳像前提高 15.93%,单帧处理时间为 25.66 ms,满足农业机器人以运动速度 1.8 ~ 5.4 km/h 运动及图像采集帧速率 30 f/s 的实时处理要求。

参考文献

- [1] 万雪芬,郑涛,崔剑,等. 中小型规模智慧农业物联网终端节点设计[J]. 农业工程学报,2020,36(13):306–314.
WAN Xuefen,ZHENG Tao,CUI Jian,et al. Design of terminal nodes for small and medium scale intelligent agriculture Internet of Things[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(13):306–314. (in Chinese)
- [2] 曹冰雪,李瑾,冯献,等. 我国智慧农业的发展现状、路径与对策建议[J]. 农业现代化研究,2021,42(5):785–794.
CAO Bingxue,LI Jin,FENG Xian,et al. Development status, path, and countermeasures of smart agriculture in China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(5):785–794. (in Chinese)
- [3] 胡祝华,赵瑶池. 农业病虫害智能视频监控系统的构建和应用[J]. 中国农机化学报,2016,37(3):186–190.
HU Zhuhua,ZHAO Yaochi. Construction and application of intelligent video monitoring system for agricultural diseases and insect pests[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(3):186–190. (in Chinese)
- [4] 余小东,杨孟辑,张海清,等. 基于迁移学习的农作物病虫害检测方法研究与应用[J]. 农业机械学报,2020,51(10):252–258.
YU Xiaodong,YANG Mengji,ZHANG Haiqing, et al. Research and application of crop diseases detection method based on transfer learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10):252–258. (in Chinese)
- [5] 王毅,何宇,王恺,等. 巡检机器人获取柑橘树上果实完整表面信息方法研究[J]. 农业机械学报,2020,51(4):232–240.
WANG Yi, HE Yu, WANG Kai, et al. Method of getting complete surface information of citrus by inspection robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4):232–240. (in Chinese)
- [6] 姜海勇,姜文光,邢雅周,等. 果园巡检机器人长臂抖动抑制方法[J]. 农业工程学报,2021,37(17):12–20.
JIANG Haiyong,JIANG Wenguang,XING Yazhou, et al. Suppression method for the long flexible arm vibration of orchard inspection robots[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(17):12–20. (in Chinese)
- [7] 刘洋洋,茹煜,陈青,等. 无人机变量施药实时监控系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(7):91–99.
LIU Yangyang, RU Yu, CHEN Qing, et al. Design and test of real-time monitoring system for UAV variable spray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7):91–99. (in Chinese)
- [8] 刘洋洋,茹煜,刘彬,等. 直升机航空施药全覆盖航线规划算法[J]. 农业工程学报,2020,36(17):73–80.
LIU Yangyang, RU Yu, LIU Bin, et al. Algorithm for planning full coverage route for helicopter aerial spray[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17):73–80. (in Chinese)
- [9] 王克奇,张维昊,罗泽,等. 击打式松果采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(8):26–33.
WANG Keqi,ZHANG Weihao, LUO Ze, et al. Design and experiment of hitting pine cone picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8):26–33. (in Chinese)
- [10] 伍德林,傅立强,曹成茂,等. 摇枝式油茶果采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(11):176–182,195.
WU Delin, FU Liqiang, CAO Chengmao, et al. Design and experiment of shaking-branch fruit picking machine for camellia fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11):176–182, 195. (in Chinese)
- [11] 涂淑琴. 基于稀疏表示的RGB-D图像特征学习研究与应用[D]. 广州:华南农业大学,2016.
TU Shuqin. Research of RGB-D image feature learning based on sparse representation[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [12] 牛润新,张向阳,王杰,等. 基于激光雷达的农业机器人果园树干检测算法[J]. 农业机械学报,2020,51(11):21–27.
NIU Runxin,ZHANG Xiangyang,WANG Jie, et al. Orchard trunk detection algorithm for agricultural robot based on laser radar[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11):21–27. (in Chinese)
- [13] 董常青,程雪岷,郝群. 电子稳像算法的速度与精度改进[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2018,30(8):1543–1553.
DONG Changqing, CHENG Xuemin, HAO Qun. Speed and precision's improvement in electronic image stabilization[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018, 30(8):1543–1553. (in Chinese)
- [14] 王施曼,许文海,董丽丽,等. 基于改进的Harris角点的机载红外图像电子稳像[J]. 红外技术,2020,42(6):573–579.
WANG Shiman, XU Wenhai, DONG Lili, et al. Electronic image stabilization of airborne infrared images based on improved Harris corner detection[J]. Infrared Technology, 2020, 42(6):573–579. (in Chinese)
- [15] FANG M, LI H, SI S. A video stabilization algorithm based on affine SIFT[C]//2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies. Sukkur, Pakistan, 2018:1–4.
- [16] 宋传鸣,闫小红,葛明博,等. 采用自适应缩放系数优化的块匹配运动估计[J]. 软件学报,2020,31(11):3603–3620.
SONG Chuanming, YAN Xiaohong, GE Mingbo, et al. Optimized block-matching motion estimation using adaptive zoom coefficient[J]. Journal of Software, 2020, 31(11):3603–3620. (in Chinese)
- [17] 宋万里,章专,连明超. 位平面匹配的电子稳像算法的改进[J]. 计算机工程与应用,2011,47(28):179–181.
SONG Wanli, ZHANG Zhuan, LIAN Mingchao. Improvement of electronic image stabilization algorithm based on bit-plane matching[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(28):179–181. (in Chinese)
- [18] 郭政. 基于多分辨率灰度投影的电子稳像算法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2016.
GUO Zheng. Research on electronic image stabilization algorithm based on multi-resolution gray-scale projection[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016. (in Chinese)
- [19] 唐佳林,郑杰锋,李熙莹,等. 基于特征匹配与运动补偿的视频稳像算法[J]. 计算机应用研究,2018,35(2):608–610,614.
TANG Jialin, ZHENG Jiefeng, LI Xiyang, et al. Video stabilization algorithm based on feature matching and motion compensation[J]. Application Research of Computers, 2018, 35(2):608–610, 614. (in Chinese)

[10] 洪茹燕,郭斌,于永海. 组织间信任:收益机制、情境限制及调节策略[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2020, 26(6): 94 – 106.
HONG Ruyan, GUO Bin, YU Yonghai. Benefiting mechanisms, situational constraints and managing tactics of interorganizational trust[J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2020, 26(6): 94 – 106. (in Chinese)

[11] 王丽媛,窦兴斌. 信任关系对零售企业供应链灵活性的影响分析:基于信息共享的中介效应[J]. 商业经济研究, 2021 (9): 38 – 41.
WANG Liyuan, DOU Xingbin. Analysis of the impact of trust relationship on the flexibility of retail enterprises' supply chain: the intermediary effect based on information sharing[J]. Business Economics Research, 2021(9): 38 – 41. (in Chinese)

[12] 周沛,马静,徐晓林. 企业移动电子税务采纳影响因素的实证研究[J]. 现代图书情报技术, 2012(3): 59 – 66.
ZHOU Pei, MA Jing, XU Xiaolin. An empirical study on the factors affecting the adoption of mobile electronic taxation by enterprises[J]. Modern Library and Information Technology, 2012(3): 59 – 66. (in Chinese)

[13] VENKATESH V, DAVIS F D. A theoretical extension of the technology acceptance model: four longitudinal field studies[J]. Management Science, 2000(46): 186 – 204.

[14] HIGGINS C. The partial least squares (PLS) approach to causal modeling: personal computer adoption and use an illustration [J]. Technology Studies, 1995(2): 284 – 324.

[15] DAWN I. Structural equation model: fit indices, sample size and advanced topics[J]. Journal of Consumer Psychology, 2010 (20): 90 – 98.

[16] HOOPER D, COUGHLAN J, MULLEN M. Structural equation modelling: guidelines for determining model fit[J]. Electronic Journal of Business Research Methods, 2008, 6(1): 53 – 60.

[17] FORNELL C, LARCKER D F. Structural equation models with unobservable variables and measurement error: algebra and statistics[J]. Journal of Marketing Research, 1982, 18(1): 39 – 50.

[18] HAIR J F, BLACK W C, BABIN B J, et al. Multivariate data analysis[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2009.

[19] HAIR J R, HULT G T M, RINGLE C M, et al. A primer on partial least squares structural equation modelling[M]. Thousand Oaks: Sage Publications, 1978.

[20] 翟长远,杨硕,王秀,等. 农机装备智能测控技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 1 – 20.
ZHAI Changyuan, YANG Shuo, WANG Xiu, et al. Status and prospect of intelligent measurement and control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 1 – 20. (in Chinese)

(上接第 36 页)

[20] 李成美,白宏阳,郭宏伟,等. 一种改进光流法的运动目标检测及跟踪算法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(5): 249 – 256.
LI Chengmei, BAI Hongyang, GUO Hongwei, et al. Moving object detection and tracking based on improved optical flow method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(5): 249 – 256. (in Chinese)

[21] 熊炜,王传胜,管来福,等. 基于特征跟踪和网格路径运动的视频稳像算法[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(5): 843 – 850.
XIONG Wei, WANG Chuansheng, GUAN Laifu, et al. A video stabilization algorithm based on feature tracking and mesh path motion[J]. Computer Engineering & Science, 2020, 42(5): 843 – 850. (in Chinese)

[22] PINTO B, ANURENJAN P R. Video stabilization using speeded up robust features [C] // International Conference on Communications & Signal Processing. IEEE, 2011: 527 – 531.

[23] 吴国楠,周超超,尹文波. 基于 Harris 角点与改进 Hu 矩的电子稳像算法[J]. 计算机工程, 2013, 39(3): 300 – 305, 310.
WU Guonan, ZHOU Chaochao, YIN Wenbo. Electronic image stabilization algorithm based on Harris corner and modified Hu-moments[J]. Computer Engineering, 2013, 39(3): 300 – 305, 310. (in Chinese)

[24] HARRIS C G, STEPHENS M J. A combined corner and edge detector[C] // Alvey Vision Conference, 1988.

[25] AHN B, HAN Y, KWEON I S. Real-time facial landmarks tracking using active shape model and LK optical flow [C] // International Conference on Ubiquitous Robots & Ambient Intelligence. IEEE, 2012.

[26] STANKOVIC L, BRAJOVIC M, STANKOVIC I, et al. RANSAC-based signal denoising using compressive sensing[J]. Circuits Systems and Signal Processing, 2020, 40(8): 3907 – 3928.

[27] 谢亚晋,徐之海,冯华君,等. 基于最小生成树与改进卡尔曼滤波器的实时电子稳像方法[J]. 光子学报, 2018, 47(1): 65 – 74.
XIE Yajin, XU Zhihai, FENG Huajun, et al. Real-time video stabilization based on minimal spanning tree and modified Kalman filter[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(1): 65 – 74. (in Chinese)

[28] 孙辉. Bayer 彩色序列图像的电子稳像[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 481 – 488.
SUN Hui. Electronic image stabilization for Bayer color video sequence image[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(2): 481 – 488. (in Chinese)

[29] 尹丽华,李范鸣,刘士建. 基于区域分割与融合的全景稳像算法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(9): 391 – 400.
YIN Lihua, LI Fanming, LIU Shijian. Panoramic image stabilization algorithm based on region segmentation and fusion[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(9): 391 – 400. (in Chinese)