

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211622

基于机器视觉的装载机装卸动作时间测量系统*

胡旺明^{1,2} 李柏乐³ 梁蔓安^{1,2} 李冰^{1,2}

(1. 广西科技大学机械与汽车工程学院 柳州 545006; 2. 广西土方机械协同创新中心 柳州 545006;
3. 广西柳工机械股份有限公司 柳州 545007)

摘要: 针对目前测量装载机装卸动作时间过程中存在的测量效率低、误差大的问题,设计了一种基于机器视觉的装载机装卸动作时间测量系统。首先对采集到的装载机装卸运动视频序列图像进行图像预处理,再利用形状模板匹配结合运动预测在图像中找寻铲斗并获取其质心像素点坐标,建立装载机铲斗运动轨迹,然后定位装卸动作的4个运动阶段的轨迹分界点确定每个阶段各自的起止帧及其帧数,最后利用帧率将帧数换算成时间进行计算,实现装载机装卸动作时间的自动测量。实验结果表明,该系统对装载机装卸动作时间测量偏差小于0.5 s,测量结果稳定有效;并且通过运动预测对铲斗位置进行估计的方法,使形状模板匹配的匹配耗时缩短了16.45%。

关键词: 机器视觉;装载机装卸动作时间;形状模板匹配;运动预测

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.6040

Loading and unloading action time measurement system of loader based on machine vision

Hu Wangming^{1,2} Li Bole³ Liang Manan^{1,2} Li Bing^{1,2}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China;
2. Guangxi Earthmoving Machinery Collaborative Innovation Center, Liuzhou 545006, China;
3. Guangxi Liugong Machinery Co., Ltd., Liuzhou 545007, China)

Abstract: Aiming at the problems of low measuring efficiency and large error in the current process of measuring loader loading and unloading action time, a measuring system of loader loading and unloading action time based on machine vision is designed. Firstly, the video image sequence of loader loading and unloading motion is preprocessed, and then the shape template matching and motion prediction are used to find the position of the bucket in the image and obtain the center of mass pixel coordinates of the bucket. The motion track of loader bucket is established by using the pixel coordinates of the bucket's center of mass. Then, the trajectory dividing points of the four loading and unloading motion stages are located, and the starting and ending frames and their frame numbers of the four motion stages are determined by using the trajectory dividing points. Finally, the frame number of the start frame and the end frame is converted into time by frame rate for calculation, so as to realize the automatic measurement of the loading and unloading action time of the loader. The experimental results show that the measured deviations of the measuring system for the loading and unloading action time of the loader is less than 0.5 s, the measuring results is stable and effective. On the other hand, because motion prediction is used to estimate the bucket position, the time consumption for shape template matching is reduced by 16.45%.

Keywords: machine vision; loading and unloading action time of loader; shape template matching; motion prediction

0 引言

装载机的装卸动作时间是指装载机完成一套完整的装

卸动作,即动臂举升、铲斗前翻、铲斗后翻、动臂下降4个阶段所用时间的总和,是出厂必检的一项评价整机技术性能的指标。目前国内外关于测量装载机装卸动作时间的研究

收稿日期:2022-10-08

* 基金项目:广西重点研发计划(桂科 AB22035066)、广西科技重大专项(桂科 AA22068064)、柳州市科技计划项目(2021CBA0103)、广西科技计划项目(桂科 AD22080042)资助

资料较少,已知只有 Liao 等^[1]通过在机身安装接触式传感器采集工作油缸的液压压力变化数据,实现了装载机动臂举升时间的测量;但由于装载机铲装过程中的震动和碰撞,易导致精密的接触式传感器损坏,因此并未形成商用。现阶段国内装载机生产企业对装载机的装卸动作时间测量主要还是依靠工人观察装载机铲斗的运动,借此判断装卸运动的起止点随后掐表进行计时测量,其测量效率低、测量结果误差大。

面对传统工程机械生产企业的转型升级趋势^[2],企业现急需一种稳定有效、安全可靠的现代化装载机装卸动作时间测量方法。目前在工程机械领域内,接触式测量正逐渐被非接触式测量所替代^[3],而机器视觉技术近些年作为一种非接触式测量技术发展迅速,通过采集待测目标的单帧图像或视频序列图像再结合图像处理技术即可实现对目标的结构参数测量和运动参数的测量,具有技术成本低、效率高、测量灵活度高等优点^[4-6]。

当前机器视觉测量主要应用于目标的表面质量测量与检测^[7-9]、结构尺寸测量^[10-12]、空间姿态测量^[13]等,在时间测量领域的应用较为少见。本文提出一种基于机器视觉的装载机装卸动作时间测量方法,利用形状模板匹配^[14]代替人工识别跟踪铲斗运动,完成对装载机装卸运动起止点的识别判断,以实现装载机装卸动作时间的准确测量。同时本文针对装载机装卸动作时间测量过程中的铲斗目标识别与定位问题展开研究,将形状模板匹配与运动预测相结合,通过估计铲斗区域位置,使用图像分割^[15]将其划分为感兴趣区域(region of interest, ROI),并将 ROI 设置为搜索区域,在此区域内进行精确匹配,减少浪费在不匹配区域上的时间,提高匹配效率,实现对装载机装卸动作时间快速准确的测量。

1 系统构成

1.1 测量系统结构与流程

装卸动作时间测量系统的结构主要由成像系统、光源控制器、图像采集卡、视觉处理系统和显示器组成,如图 1 所示。当待检装载机开至预定位置时,通过图像采集卡将成像系统采集到装载机装卸运动视频传递到视觉处理系统进行图像处理,然后通过显示器实时显示图像处理效果,待装卸动作结束后关闭相机停止采集,显示铲斗的运动轨迹并输出装载机的装卸动作时间,完成测量。

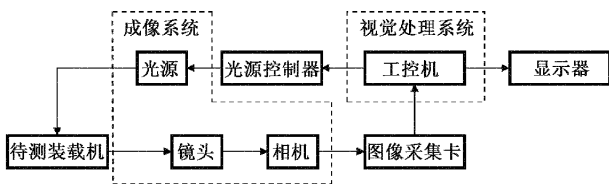


图 1 装卸动作时间测量系统结构

考虑到装载机执行装卸运动时,铲斗为上下运动的特

点,本文采用两台工业相机按一上一下位置安装在可调节视觉支架上,如图 2 所示,通过图像拼接技术,得到一个竖画幅的装载机视频图像,以增大铲斗图像信息在视频中的占比,尽可能排除无用信息的干扰。

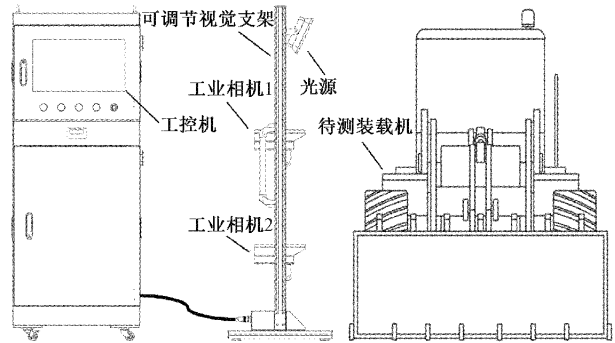


图 2 测量平台二维示意图

1.2 测量系统软件算法结构

测量系统程序界面和算法由 C 语言开发平台 LabWindows/CVI 结合 HALCON 库设计完成,装载机装卸动作时间测量系统软件算法流程如图 3 所示。通过调用相机软件开发工具包(software development kit, SDK)采集装载机装卸运动视频,对输入的每帧视频序列图像使用 reduce_domain 算子对其进行图像分割划分出 ROI(ROI 尺寸初始值为整幅图像),将其设置为搜索区域,通过 gauss_filter 算子对 ROI 进行高斯滤波^[16]去噪,完成图像预处理。

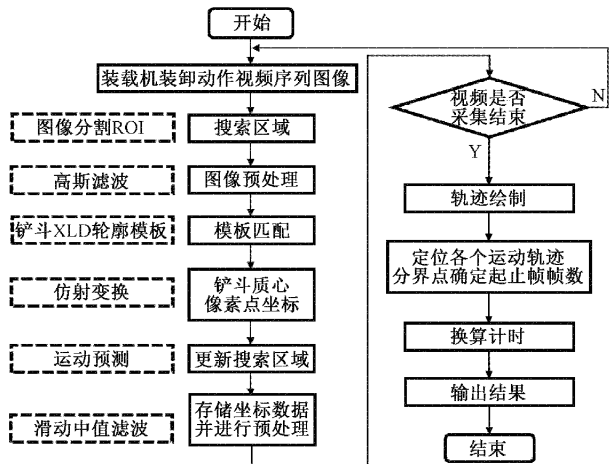


图 3 软件算法流程

随后在 ROI 内利用创建的铲斗亚像素(eXtended line descriptions, XLD)轮廓模板搜寻出铲斗,使用仿射变换确定铲斗区域质心像素点坐标,利用获得的坐标数据对铲斗进行运动预测,估计下一帧铲斗区域质心像素点的坐标,将以此坐标为中心、当前帧铲斗范围 1.5 倍的区域作为 ROI 对匹配搜索区域位置进行重置。随后将铲斗像素点纵坐标和其帧数信息进行存储,并用滑动中值滤波对其存储的铲斗像素点纵坐标逐一进行数据预处理^[17],循环上述操作,

直至相机停止视频采集。

待到装卸运动结束后,调用相机 SDK 停止视频采集,随后通过 C 语言开发平台中的控件绘制铲斗在 Y 轴方向上的位移随帧数变化的运动轨迹。轨迹点的纵坐标是经滤波处理后的铲斗质心像素点纵坐标数据,横坐标为其所对应的视频序列图像的帧数。

接着对铲斗轨迹点数据进行回归分析,确定 4 个装卸运动阶段的轨迹分界点,以分界点定位装载机动臂举升、铲斗前翻、铲斗后翻和动臂下降 4 个运动阶段各自的运动起止帧并获得其帧数。将起止帧的帧数乘以相机帧率进行换算,获得 4 个装卸运动阶段的起止时间和终止时间,以此完成装载机装卸动作时间的测量。

2 关键技术

2.1 模板匹配定位

本文通过 Canny 算子^[18]对图 4(a)铲斗原图进行处理,提取出铲斗的亚像素轮廓边缘信息后利用 create_shape_model_xld 算子创建出铲斗 XLD 轮廓模板,如图 4(b)所示。

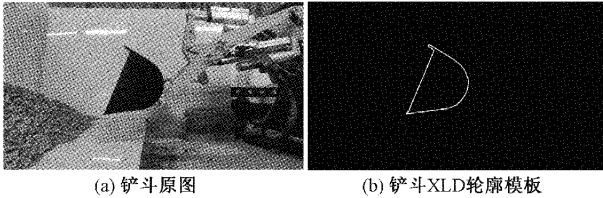


图 4 创建匹配模板

铲斗 XLD 轮廓模板是由一系列的点构成,设模板点数为 n ,模板点集为 $p = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $p_i \in p$, 点 p_i 在 X 轴和 Y 轴梯度方向向量为 $d_i = (t_i, u_i)^T$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。待匹配视频序列图像也通过 Canny 算子处理,使之转换成由点 $q = (c, r)^T$ 和其在 X 轴与 Y 轴梯度方向向量 $e_{c,r} = (v_{c,r}, w_{c,r})^T$ 表示。

匹配时通过铲斗 XLD 轮廓模板在视频序列图像上逐点滑动,计算模板所有点的方向向量与视频序列图像中和模板重合区域相应点的方向向量的点积之和^[19],来评价检测部分与模板的相似程度。为了提高匹配正确率,需要对模板的点和梯度向量进行变换,变换后为 $p'_i = R(\theta)p_i$, $d'_i = R(\theta)d_i$, 其相似度量计算公式如下:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{d_i'^T e_{q+p'}}{\|d'_i\| \cdot \|e_{q+p'}\|} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t'_i v_{c',r'} + u'_i w_{c',r'}}{\sqrt{t_i'^2 + u_i'^2} \sqrt{v_{c'+r'}^2 + w_{c'+r'}^2}} \quad (1)$$

由于装载机运动时,铲斗在视频序列图像中的姿态位置一直在改变,因此需要通过仿射变换^[20-21]对模板图像上的点的位置进行平移、旋转和缩放,使模板图形和视频序列图像中的铲斗变换到一起。以铲斗模板质心像素点坐标

(\bar{x}, \bar{y}) 为例,其仿射变换的齐次坐标表达式如下:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: (x, y) 为铲斗模板质心经仿射变换后的像素点坐标, \mathbf{A} 为仿射变换的变换矩阵,表示如下:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} s_x \cos\theta & -s_x \sin\theta & \Delta x \\ s_y \sin\theta & s_y \cos\theta & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: s_x, s_y 分别为 X 轴和 Y 轴方向上的缩放比例因子; $\Delta x, \Delta y$ 为 X 轴和 Y 轴方向上的平移变化量, θ 为旋转角。图 5(a)为进行仿射变换前的效果图,仿射变换完成后的效果图如图 5(b)所示,图中所显示的坐标为铲斗质心像素点坐标。

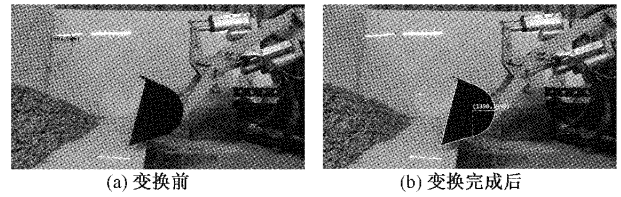


图 5 仿射变换效果

2.2 运动预测

利用仿射变换获得铲斗质心在视频序列图像中的像素点坐标后,通过运动预测估计下一帧铲斗区域位置并设置搜索区域,以此缩小搜索范围,减少匹配耗时。其运动预测模型表示为:

$$f(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_j x^j \quad (4)$$

设前 k 帧铲斗质心像素点坐标为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k)$ 。式(4)中 j 值的范围为 $0 \leq j < k-1$, 使铲斗质心像素点坐标满足:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_1^2 + \dots + a_j x_1^j = y_1 \\ a_0 + a_1 x_2 + a_2 x_2^2 + \dots + a_j x_2^j = y_2 \\ \vdots \\ a_0 + a_1 x_k + a_2 x_k^2 + \dots + a_j x_k^j = y_k \end{cases} \quad (5)$$

式(5)用矩阵表示为 $\mathbf{X}\mathbf{C} = \mathbf{Y}$, 其中:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1^j & \dots & x_1 & 1 \\ x_2^j & \dots & x_2 & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_k^j & \dots & x_k & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} a_j \\ a_{j-1} \\ \vdots \\ a_0 \end{bmatrix}, \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix} \quad (6)$$

令 \mathbf{X}^T 为 \mathbf{X} 的转置矩阵,即得:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{C} = \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (7)$$

令 $\mathbf{X}^T \mathbf{X} = \mathbf{Q}$, 且 $|\mathbf{Q}| \neq 0$, 对式(7)两边同乘以 \mathbf{Q} 的逆矩阵 \mathbf{Q}^{-1} , 令其为 $\mathbf{Q}^{-1} \mathbf{Q} \mathbf{C} = \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}$, 可解得系数矩阵 \mathbf{C} :

$$\mathbf{C} = \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (8)$$

由于下一时刻的值只与当前值和过去 k 个历史值有

关,更远的过去值对其影响可以忽略,为了防止随着时间推移,累计的 k 值过大,导致计算量过大,本文对 k 值做了限定,在预测时可以通过不断对这 k 个数据进行更新,以保证预测精度的同时兼顾预测速度。

解得系数矩阵 C 后通过式(4)即可预测 $k+1$ 帧铲斗质心像素点坐标,并以此质心为中心、当前帧铲斗范围的 1.5 倍区域为 ROI,将其设置为搜索区域,下一帧在此 ROI 内精确搜索,从而避免了需要对视频序列的每帧图像进行机械性的全图搜索。

如表 1 所示,在一段 100 帧的装载机运动视频中,利用没有运动预测的传统形状匹配算法和本文设计的结合运动预测的形状匹配算法分别在视频中进行铲斗模板匹配,与传统形状匹配算法相比,本文设计的方法在匹配耗时上缩短了 16.45%,提高了匹配效率。

表 1 匹配耗时对比表

形状匹配	视频帧数	视频图像尺寸	模板尺寸	耗时/s
无运动预测	100	2 400×1 350	290×219	7.58
运动预测	100	2 400×1 350	290×219	6.34

2.3 确定运动起止点

铲斗运动轨迹的每一部分都反映着一个装卸运动阶段,其轨迹变化趋势转变的拐点就是装载机不同装卸运动阶段的分界点在轨迹中的位置。本文利用获得的铲斗轨迹数据建立了铲斗运动轨迹,通过对轨迹点进行回归分析从而定位不同装卸运动阶段的轨迹分界点,以此确定装载机动臂举升、铲斗前翻、铲斗后翻,动臂下降 4 个运动阶段各自的运动起止点。

由于现实测量过程中外界环境的干扰,实际获得的铲斗质心像素点坐标数据中总存在着少量的噪声数据,包含有这些噪声数据的轨迹点附近的轨迹会发生阶跃跳变,使系统误以为铲斗运动轨迹变化趋势在此处发生了转变,给各个运动阶段轨迹分界点的确定带来了干扰。因此本文使用了滑动中值滤波对铲斗质心像素点纵坐标数据序列进行数据平滑预处理,随后通过 labWindows CVI 的 Graph 控件绘制铲斗运动轨迹,如图 6(a)所示。

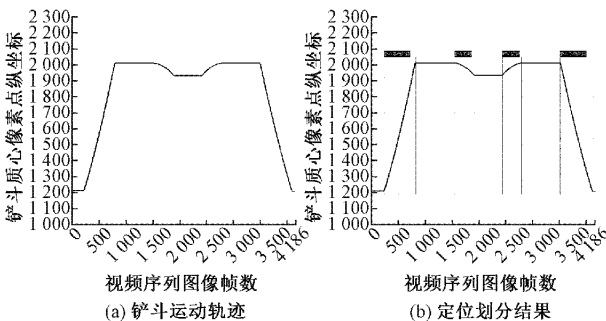


图 6 铲斗运动轨迹划分对比

记轨迹点坐标为 (\bar{c}, \bar{r}) , 其中纵坐标 \bar{r} 为平滑后的铲斗质心像素点纵坐标,横坐标 \bar{c} 为其对应的视频序列图像的帧数。从图 6(a)所示的铲斗运动轨迹可以看出铲斗的轨迹数学模型是一个分段函数。为确定装卸运动阶段分界点在轨迹中的位置,本文利用最小二乘法对铲斗轨迹点进行回归分析,获得回归方程,通过回归方程对轨迹点进行分段拟合,定位拟合线段的交叉点。这些交叉点就是轨迹变化趋势转变的拐点,即装载机不同装卸运动阶段的轨迹分界点,以此完成装卸动作的 4 个运动阶段起止点的定位和阶段划分,定位划分结果如图 6(b)所示,分段拟合的原理如图 7 所示。

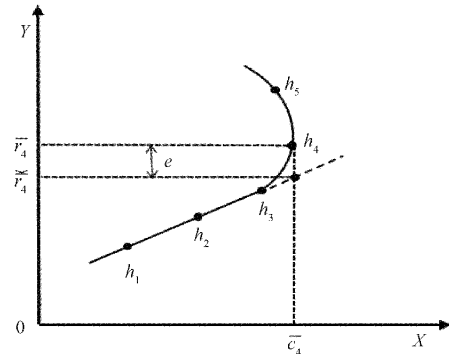


图 7 分段拟合几何解释

记有轨迹点 h_1, h_2, \dots, h_6 , 利用最小二乘法对前 3 个轨迹点 h_1, h_2 和 h_3 的坐标进行回归分析,求得回归方程并进行轨迹拟合,其获得的回归方程^[22]数学表达式为:

$$\hat{r} = \hat{f}(\bar{c}) \tag{9}$$

记轨迹点 h_4 的坐标为 (c_4, r_4) , 将点 h_4 的横坐标 c_4 代入式(9)得 \hat{r}_4 , 计算真实值 r_4 与回归方程预测值 \hat{r}_4 之间差值 e 的平方:

$$e^2 = (r_4 - \hat{r}_4)^2 \tag{10}$$

若 e^2 在预先设定的分段阈值范围内,则轨迹点 h_4 与前面点仍属于同一条拟合线段,并利用点 h_4 对其回归方程进行进一步修正,若 e^2 在设定的分段阈值范围外,则点 h_4 为两段拟合线段的交叉点并从此点开始分段,进行下一段轨迹的回归方程计算和轨迹拟合,重复上述操作,直至完成所有轨迹点的拟合。

随后通过获得拟合线段的交叉点,完成 4 个运动阶段轨迹分界点的定位和划分。各个运动阶段的轨迹分界点就是其运动的起止点,随后将这些分界点的横坐标乘以相机的帧率使其转换成时间,以获得每个运动阶段的起始时间和终止时间。最后通过终止时间减去起始时间获得每个运动阶段的耗时,4 个运动阶段耗时的总和即为装载机装卸动作时间。

3 实 验

3.1 实验设备及实验环境

为验证系统稳定性与有效性,本文搭建了装载机动臂

模拟工作台,如图8所示。用于控制模拟工作台装载机动臂和铲斗运动的直流电推杆最大推力为1 000 N,极限行程为100 mm。

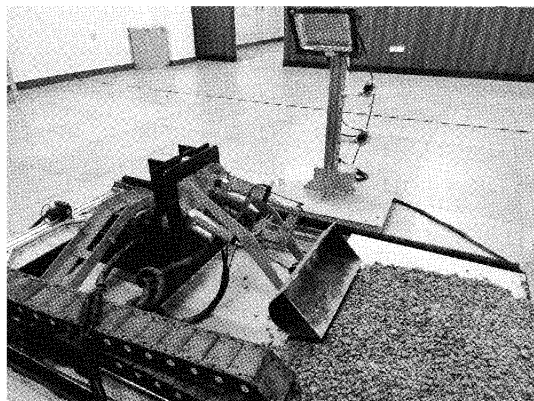


图8 测量系统验证平台

本此实验所使用的工业相机型号为海康MV-CA016-10GC,帧率为30 fps,分辨率1 440×1 080。实验照明光源为60 W条形光源;工控机主机CPU为Intel(R) Core(TM) i9-10900,系统运行界面如图9所示。同时,实验过程中在直流电推杆上布置位移传感器,通过测量直流电推杆伸长量的变化确定装卸运动4个阶段的起止点,以此测量装载机动臂模拟工作台的装卸动作时间。

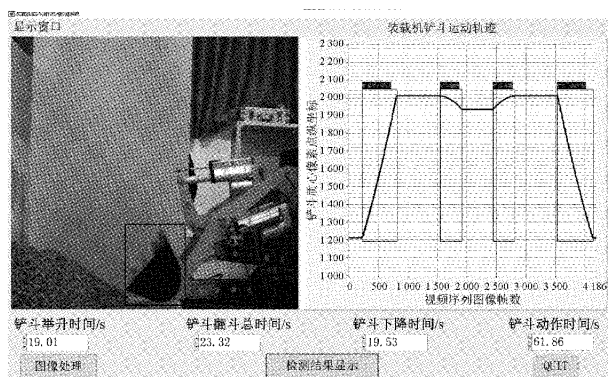


图9 测量系统运行界面

3.2 实验结果

在模拟工作台执行装卸动作过程中,用于控制装载机装卸运动的直流电推杆全程通电工作时间为62 s,用本文所设计的测量方法和基于位移传感器的测量方法同时测量0~3 kg负载情况下的装载机动臂模拟工作台的装卸动作时间,测量结果如图10所示。

由图10可以看出基于机器视觉的装载机装卸动作时间测量方法与位移传感器测量方法的结果基本一致。随后在空载状态下,用本文所设计的测量方法与基于位移传感器的测量方法对装载机动臂模拟工作台的装卸动作时间同时进行20组重复测量实验,并对两种方法的测量结果进行比较,两种方法的测量结果偏差如图11所示,基于机器视

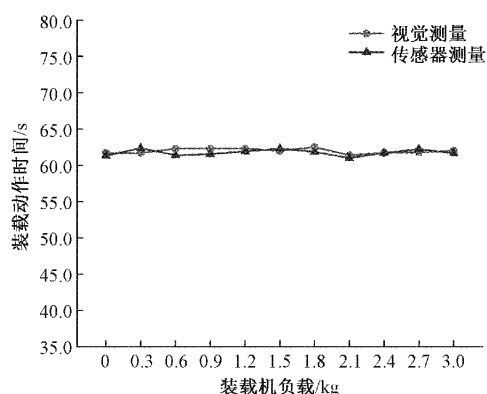


图10 装卸动作时间测量结果

觉的装载机装卸动作时间测量方法其测量结果偏差在±0.5 s以内,小于位移传感器的测量偏差。实验结果表明基于机器视觉的装载机装卸动作时间测量系统是有效的,并且相较于位移传感器测量结果更加稳定。

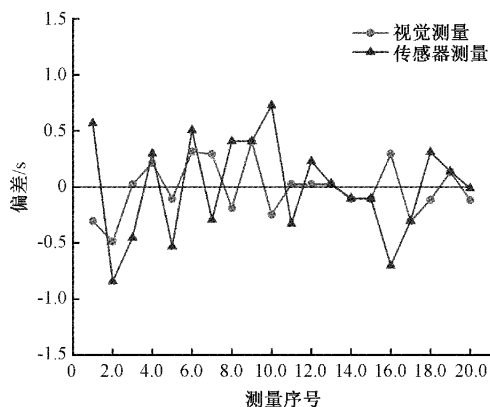


图11 测量偏差对比

4 结 论

针对目前装载机装卸动作时间测量过程中的问题,本文设计出了一种基于机器视觉的装载机装卸动作时间测量系统,通过实验验证了该系统对装载机装卸动作时间测量的有效性,与位移传感器测量方法相比较,测量结果偏差小,并且在装卸动作一结束即可完成动作时间的测量,测量效率高,无需与装载机接触即可完成测量,避免了因装载机工作过程中的震动、碰撞而导致的精密测量仪器损毁。

实验结果表明该系统完全满足企业对于装载机装卸动作时间的测量需求。同时本文将运动预测应用在了模板匹配的过程中,缩短了目标的搜索时间,该方法丰富了模板匹配的解决方案,具有一定的推广价值。但由于机器视觉测量易受背景环境变化的干扰,在今后的算法中可以进一步优化,以提高测量的精度。

参考文献

- [1] LIAO Q, XU W, LI B, et al. An approach to wheel

- loader bucket raise time detection[J]. 3rd International Conference on Engineering Technology and Application, 2016(1):780-786.
- [2] 邓晓虹,黄满盈.我国工程机械行业转型升级的相关文献综述[J].经济问题探索,2015(11):174-180.
- [3] 倪佳敏,马伟,童欣,等.基于视觉的挖掘机机位姿测量虚拟传感器研究[J].电子测量技术,2022,45(9):44-49.
- [4] 刘翠翠,杨涛.机器视觉在智能制造中的应用与产业发展[J].机床与液压,2021,49(11):172-178.
- [5] 邓伟伦,于涛,詹洪陈,等.基于视觉技术的非接触测量精度优化研究[J].电子测量技术,2022,45(5):118-123.
- [6] 谭文,方森,段峰,等.基于机器视觉的3D激光平面度测量系统的研究与应用[J].仪器仪表学报,2020,41(1):241-249.
- [7] WANG Z, LI B, SILVA C. Use of fuzzy neural network in industrial sorting of apples [J]. Instrumentation, 2019, 6(4):37-46.
- [8] 丁伟利,任天赐,谭伟敏,等.基于视觉的零部件振动裂纹在线监测系统研究[J].电子测量与仪器学报,2022,36(2):78-88.
- [9] 刘坚,路恩会,易怀安,等.基于图像质量的磨削表面粗糙度检测[J].电子测量与仪器学报,2016,30(3):374-381.
- [10] 郭智杰,王明泉,张俊生,等.轮毂外形参数的在线测量技术研究[J].国外电子测量技术,2019,38(5):142-145.
- [11] 罗根,倪军.基于机器视觉的手机屏幕玻璃尺寸检测及崩边评价[J].电子测量与仪器学报,2018,32(2):92-96.
- [12] 汪凤林,周扬,叶绿,等.基于机器视觉的飞轮齿圈缺陷和尺寸检测方法[J].中国测试,2020,46(5):31-38.
- [13] 游江,唐力伟,邓士杰.机器视觉空间目标姿态自动测量方法研究[J].中国测试,2016,42(11):107-112.
- [14] 吴晓军,邹广华.基于边缘几何特征的高性能模板匹配算法[J].仪器仪表学报,2013,34(7):23-30.
- [15] 王庆海.基于HALCON的金刚石颗粒参数测量技术研究[J].制造业自动化,2015,37(14):56-59.
- [16] 欧仁侠,张华磊,陈洪斌.基于高斯滤波的光学元件损伤图像在线检测[J].激光杂志,2015,36(12):77-80.
- [17] 张友浩,赵鸣,徐梦瑶,等.时序数据挖掘的预处理研究综述[J].智能计算机与应用,2021,11(1):74-78.
- [18] 赵朝朝,江明,殷宗琨.改进Canny算子下的工件尺寸测量[J].电子测量与仪器学报,2022,36(8):52-59.
- [19] 谢珩,汪成龙,黄振雄,等.基于LabVIEW的五金件尺寸检测方法[J].电子测量技术,2019,42(24):152-156.
- [20] 张博.基于局部稀疏表示的多帧图像特征目标跟踪方法[J].国外电子测量技术,2022,41(6):25-30.
- [21] 杨桂华,唐卫卫,卢澎澎,等.基于机器视觉的芯片引脚测量及缺陷检测系统[J].电子测量技术,2021,44(18):136-142.
- [22] 王荣忠,高秋英,王得军.基于最小二乘法的曲线拟合及其简化算法[J].传感器世界,2021,27(10):8-10,25.

作者简介

胡旺明, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉。

E-mail: wangminghu97@163.com

李柏乐, 硕士生导师, 主要研究方向为智能制造。

E-mail: 1613358616@qq.com

梁蔓安(通信作者), 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为机电控制。

E-mail: mangman33@sina.com

李冰, 副教授, 博士, 主要研究方向为机械结构与系统动力学。

E-mail: gxgxyjxxlb@163.com