

文章编号 1004-924X(2017)10-2725-11

用于机械系统瞬时目标的双视角高速视觉检测系统

王耀东, 朱力强*, 余祖俊, 郭保青

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要: 基于高速相机研发了双视角高速视觉检测系统。该系统可从不同角度对周期机械运动进行长时间、无接触的同时实时检测, 并可自动判断和存储异常动作的瞬时高帧率视频图像。基于机械系统运动特性提取理论, 提出了多视角高帧率视频图像的离线处理算法, 利用两个高速相机准确建立了样本图像数据库及它们的对应关系。提出了多视角同步实时检测算法, 完成了对目标的实时视觉检测, 并实现了瞬时保存关键图像的功能。为验证算法的有效性和系统的稳定性, 搭建了双视角高速视觉检测系统, 对真实的机械系统进行了实验。结果显示, 提出的系统实现了 500fps 的双目高速相机同步检测, 以及 0.1 s 内运动目标的自动判断, 同时完成了对关键图像的瞬时保存。文中的研究为机械系统的非接触检测提供了一种高速可视化的检测方法。

关键词: 计算机视觉; 高速视觉; 图像处理; 目标检测; 机械系统

中图分类号: TP391.4; TP242.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172510.2725

Two-view high speed vision system for instant object detection in mechanical system

WANG Yao-dong, ZHU Li-qiang*, YU Zu-jun, GUO Bao-qing

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

* Corresponding author, E-mail: lqzhu@bjtu.edu.cn

Abstract: A two-view high-speed synchronous vision system was developed based on high-speed cameras. It was used to monitor synchronously periodic mechanical motion in non-contact and long term modes from different views. It could automatically judge the abnormal motion and could record high-speed vision images at a moment. On the basis of extraction of motion characteristics of a mechanical system, an offline processing algorithm of multi-view high frame rate video image was proposed. Two high-speed cameras were used to accurately establish the sample image database and their relation. Then, a multi-angle synchronous real-time detection algorithm was proposed to quickly complete the real-time visual detection of the targets, meanwhile recording key images instantaneously. To confirm the validity and stability of algorithms, the two-angle-view high-speed vision monitor system was built in laboratory, and real mechanical parts were detected in experiments. The experimental results show that the vision monitor system achieves a high-speed synchronous detection of 500fps, the validity judgment of abnormal motion happened in 0.1 s, and the recording instantaneously for key images.

收稿日期: 2017-04-09; 修订日期: 2017-05-10.

基金项目: 科技部国家重点研发计划资助项目 (No. 2016YFB1200100); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. M16JB00240)

The research working provide a higher speed visual detection method for the noncontact detection of mechanical systems.

Key words: computer vision; high-speed vision; image processing; object detection; mechanical system

1 引言

基于机器视觉的实时检测技术在行人识别、车辆检测、铁路线路异常监测、人脸识别和工业检测等不同领域均有广泛应用^[1-4]。对于一般的视觉检测与识别技术,普通帧率的相机即可满足要求,而且应用广泛,但应用于工业领域的相机对图像采集速度、分辨率和曝光时间等性能却有着较高要求,需要更高性能的工业相机与算法进行视觉检测和监控^[5-6]。

在工业生产以及轨道交通、无人机导航领域,待检测目标运行速度较快,普通的视觉系统,难以实现高速智能的实时视觉检测,尤其在实时特征提取、轨迹判断方面,对高速视觉技术的需求不断增加^[7-8]。

目前,国内外学者对于高速视觉成像设备和检测技术已有相关研究。Namiki 等利用 1 000 frame/s 高速相机检测机械手的灵巧操作,并利用高速视觉反馈,实现实时精准控制;杨少华等针对机器视觉系统的高速摄影需求,基于 CCD 高速成像技术以及掩模成像方式,实现了 2.0×10^6 frame/s 的高帧率摄影,获取了 14 幅 79 pixel \times 79 pixel 的图像,但其不具有实时检测的能力^[10]。机载高速视觉的图像采集与降噪技术,基于改进的多小波变换可以较好地去除噪声影响,提高信噪比和图像质量,但是在高速实时处理的执行效率上,并没有体现^[11]。Jiang 等利用地面高速相机,对检测区域的周期运动特征进行提取和定位,可以实时跟踪低空飞行的多旋翼小型无人机,但高空大场景的监测性能有待提升^[12];Yang 等利用高速相机,近距离分析小型钢棒的多方向振动用于缺陷检测,但对于大尺寸目标的检测精度有待提高^[13];Watanabe 利用一个高速相机以 100~1 000 frame/s 的帧率,基于图像深度信息实现了目标物体的表面三维重建^[14]。在机械系统检测方面,本课题组利用高速相机以 1 000 frame/s 的高帧率实时提取机械操作的运动频率,实现了运

动特性视觉计算^[15];另外,Zhang 等人基于并行处理的高速目标检测技术,利用多层并行图像处理实现了 HOG 和 LBP 算法,并在视觉芯片实现了 AdaBoost 的图像分类,对 128 pixel \times 128 pixel 图像的检测速度在 0.1 ms 以内,但此技术主要用于目标分类,不具有机械运动的实时监测功能^[16]。

综上,在高速视觉的实时检测领域,对瞬时图像的计算时间要求较高,所以一般都采用简单算法,或者利用较明显的特征标记用于加快目标的检测与提取速度,以满足毫秒级的实时运算。在工业检测领域,一般利用样本模板对高速流水线的产品进行缺陷检测,例如高速印刷和批量小瓶检测。对于机械系统的高速检测,尚处于起步阶段,检测的稳定性与精度都有待提高。单相机对目标的检测视野不够,存在较多的误检和漏检,故已有学者考虑利用多个视角用于检测效率和精度的提高。

本研究针对机械设备的高速视觉检测,设计了高速图像处理算法,对机械运动进行了无接触的实时检测,以及正常和异常状态的自动判断,并且能够自动存储关键视频。针对机械设备运行复杂且速度快,本文所研究的高速视觉技术,可以从不同视角对目标进行同步检测,实时计算异常物体的运行状态,为故障分析提供了更准确的数据。

2 双目高速视觉实时检测及工作原理

2.1 双视角高速视觉实时检测系统

高速视觉技术是对目标物体进行毫秒级的实时图像获取,通过设计特殊的图像处理算法,实现高速视觉实时检测。本文的前期研究工作曾利用一个高速相机实现了机械运动特性的计算,可以在 1 000 frame/s 内完成机械运动的周期和频率计算^[15]。本文则详细阐述了如何利用多个高速相机进行正常和异常运行状态的判断,特别详解了如何利用两个高速相机,从不同视角对机械系统的运行状态进行同步自动检测的方法。

双视角高速视觉系统,利用一台计算机同时驱动两个高速相机,同步实时获取双视角相机的图像视频流,通过图像处理和运动状态检测,实现机械系统的同步自动检测,原理如图 1 所示。

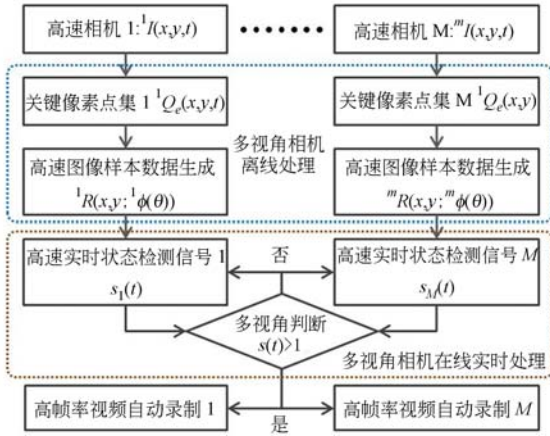


图 1 多目标高速相机实时检测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of multiple high-speed cameras in real-time detection

2.2 复杂机械运动高速视觉实时检测原理

机械系统一般呈现图像纹理复杂、背景动态变化快的特点,利用普通相机(25~30 frame/s)难以实现高清高速的图像采集,而高速视觉一般在 100 frame/s 以上。本系统欲以 500 frame/s 的帧率,实现 2 ms 的高速视觉检测,从而自动判断机械运动的正常与否,这是光学成像与视觉测量领域的一个难点。文中设计了离线与在线图像处理算法,利用离线处理过程,执行更多的算法,压缩图像数据量,并提取重要像素信息。建立了多特征图像样本库,大幅度地降低了在线实时处理的运算时间,原理如下。

第一,离线过程预存储双目高速相机多周期正常运动的高帧率图像,作为样本图像的数据源。通过背景滤波算法减少数据量,利用关键像素点提取算法,将双目相机用两组一维向量表示,简化运算。

第二,利用选取的关键像素点集,结合预存储的图像,建立双视角周期相位样本库、周期图像样本库和掩模图像样本库。通过归一化处理,形成周期相位值数据映射,为后续的高速实时机械运动状态检测,提供足够的技术支持。

第三,实时视觉处理中,基于第二步选定的关键像素点,生成当前实时图像对应的像素灰度值

一维向量,从样本库快速确定周期相位,通过数据映射,锁定匹配的周期样本图像和掩模样本图像,通过算法实现正常、异常状态的实时判断。

最后,利用双目相机实时检测信号,共同判断目标检测系统的运行状态,发送指令自动保存关键时刻的高帧率视频数据,大幅度降低无用数据的存储,为目标的双视角分析提供数据保证。

3 高速视觉实时检测算法

3.1 双视角高速图像的固定像素点集计算

在离线处理时,选定目标检测区域,保持机械系统无故障运行,利用高速相机采集正常运动的多周期高帧率图像 $O(x, y, t)$,记为原始样本图像。此时,待测目标及其外部环境保持不变,否则需要重新采集样本图像。本算法在理论上可利用多视角高速相机进行检测,对于多个相机数据记为 ${}^mO(x, y, t)$,然而目前的计算机性能若搭载多个相机,会影响高速检测的实时性,所以本论文利用双视角系统来验证算法。由于检测目标为重复性周期运动,所以采集的图像 ${}^mO(x, y, t)$ 满足周期性公式, m 表示高速相机的个数:

$${}^mO(x, y, t) = {}^mO(x, y, t + T), m = 1, 2. \quad (1)$$

预存储的原始高帧率图像表示为 ${}^mO(x, y, n)$,其中 $n = 1, 2, \dots, N$ 为原始图像序列的帧数。为保证样本数据训练的有效性,原始图像包含 5 个以上正常状态的周期运动。根据文献[15]的图像背景滤波算法,通过阈值 mT_F 滤除冗余图像背景像素,得到双视角图像的初级滤波数据 ${}^mF(x, y, n)$:

$${}^mF(x, y, n) = \begin{cases} {}^mO(x, y, n) & ({}^mA(x, y) \geqslant {}^mT_F) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}, \quad (2)$$

其中 ${}^mA(x, y)$ 为计算所有像素点在 N 时间序列内的方差,后续离线处理基于此滤波数据进行。同样地,根据关键像素提取算法,将二维图像转化为一维向量^[15]。对于双视角高速图像,可以提取不同相机对应的关键像素点集,如下式:

$${}^mP(x, y) = \underset{(x, y) \in {}^mC_b(x, y, {}^mt_b(n))}{\operatorname{argmax}} ({}^mA_b(x, y)). \quad (3)$$

二维图像传感器的每一个像素点可视为一个独立的光电传感器,随着时间的变化,表达所对应

目标的图像灰度值变化。其中 ${}^m A_b(x, y)$ 表示对相机 m 当前时间子序列 $t_b(n)$ 内 (x, y) 坐标位置的像素灰度变化方差值, ${}^m C_b(x, y, {}^m t_b(n))$ 为划分时间子序列内的图像数据, 详见文献[15]。通过时间序列的细分和对应子序列的最大差分值计算, 可以从滤波数据 ${}^m F(x, y, n)$ 中得到每个高速相机对应的所有选定像素点集, 其选定的像素点个数为 $k=1, 2, \dots, K$:

$${}^m P_k(x, y) = \{(x_k, y_k) | (x_k, y_k) \in {}^m F(x, y)\}. \quad (4)$$

将双视角相机的像素点集 ${}^m P_k(x, y)$ 在原始图像周期序列 $n=1, 2, \dots, N$ 中展开, 得到每个像素点在时间序列的一维向量。利用相似度分析算法, 得到最敏感像素点 ${}^m Q_e(x, y)$ [15]:

$${}^m Q_e(x, y) = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_E, y_E)\}. \quad (5)$$

利用像素点集提取算法, 可以将高速相机的图像数据简化为 $e=1, 2, \dots, E$ 个最终像素点集。后续利用这些一维向量数据, 可快速计算机械系统瞬时动作对应的特征值, 实现多视角高速相机的实时检测。

3.2 双视角周期特征样本库建立算法

利用预存储的原始图像数据和简化的关键像素点集, 可以实现机械运动周期相位特征的实时计算, 但是无法实现机械运动的正常、异常状态检测。由于视频图像的采样为离散数字信号, 所以预存储的正常运动图像纹理与实时检测时采集的瞬时图像纹理仍存在小范围的差异, 这种差异导致在高速实时状态中, 差分图像产生较多的噪声干扰, 从而无法对机械运动进行准确的判断。

为解决此问题, 本算法基于提取的关键像素点集 ${}^m Q_e(x, y)$, 结合预存储的图像数据 ${}^m O(x, y, n)$, 建立双视角周期相位样本库、周期图像样本库、掩模图像样本库, 并重新计算对应关系。其中, 周期相位样本库主要利用关键像素点建立的一维向量, 快速确定机械运动周期动作对应的特征值; 周期图像样本库用于计算实时图像与样本图像的差异, 确定机械动作的正常与否; 掩模图像样本库用于大范围消除离散采样造成的噪声干扰, 最终实现运动状态的正确判断。

(1) 周期相位样本库的建立。

选定的像素点 ${}^m Q_e(x, y)$, 将二维图像数据转化为一维向量 ${}^m \alpha(n)$, 如公式(6)所示, 其中每个

元素代表像素点在当前帧的灰度值。

$${}^m \alpha(n) = ({}^m F({}^m Q_1(x, y), n), \dots, {}^m F({}^m Q_E(x, y), n)), \quad (6)$$

其中, $n=1, 2, \dots, N$ 表示预存储图像从第一帧到最后一帧图像都可根据选定的像素点, 转换为一维向量。以第一帧图像为周期样本图像库的起点, 利用向量相似度公式(7)、公式(8)寻找最接近的图像定义为第二帧图像, 同理可以将预存储的多周期图像排序为密度更大的单周期样本图像。

$$n_l = \arg \max_{(n=2, 3, \dots, N; n \notin n_l)} \left\{ \frac{{}^m H({}^m \phi(l-1)) \cdot {}^m \alpha(n)}{\| {}^m H({}^m \phi(l-1)) \| \| {}^m \alpha(n) \|} \right\}, \quad (7)$$

$${}^m H({}^m \phi(l)) = {}^m \alpha(n_l) \quad (l=1, 2, \dots, N). \quad (8)$$

通过建立的周期相位样本库 ${}^m H({}^m \phi(l))$, 仅利用图像简化后的一维向量计算相位值, 可实现机械运动周期相位的实时提取。对于理想状态的高速周期运动, 通过此方法可以建立正确的相位与图像对应关系。然而, 在实际检测中, 直接利用向量相似度分析建立的周期图像样本库, 存在较多的噪声干扰, 导致实时图像与样本库匹配的图像存在不一致现象, 这主要由以下因素造成: 第一, 机械运动高速复杂, 基于选定像素点, 不能代表图像的全局信息, 造成一定的误差。第二, 机械系统在某个方向存在高频振动, 利用多个相机检测时, 不同视角对振动的反应不同, 导致检测误差。第三, 在高速采集中, 存在个别时刻的光照差异, 导致选定像素点灰度值的误差。这些小的误差, 在机械运行特性提取中对结果影响不大, 但在实时状态分析时, 由于误差的不断累积, 通过匹配图像的差分值计算, 对检测结果产生误判断情况。

(2) 周期图像样本库的建立。

在周期样本库建立过程中, 利用候选匹配图像的差异对周期相位样本和周期图像样本的正确关系进行修正。

首先, 对预存储图像数据进行重新排序。定义第一帧预存储图像为周期图像样本库中的第一帧图像, 并映射 $n=1$ 为周期相位值 $\phi(1) = n$, 为使公式一般化推广, 这里用变量 n 表示选定的预存储图像, 用 $\phi(l)$ 表示对应的周期样本图像的相位值:

$${}^m R(x, y; {}^m \phi(l)) = {}^m O(x, y, n). \quad (9)$$

利用公式(7)从预存储图像 ${}^m O(x, y, n)$ 中搜索 ${}^m H({}^m \phi(l))$ 的前 W 个最相似向量记为 n_w , 根据

实验本算法取 $W=5$ 来进行周期图像样本的修正。其次,对当前确定的周期样本图像 ${}^mR(x, y; {}^m\phi(l))$,利用候选的 $W=5$ 个相似图像进行图像差分计算:

$${}^mD_H(x, y, n_w) = |{}^mR(x, y; {}^m\phi(l)) - {}^mO(x, y, n_w)|. \quad (10)$$

差分图像非零值对应的像素点个数越少,则表明候选图像与当前图像越接近,即可定义为下一个确定的周期样本图像,故对差分图像进行二值化:

$${}^mB_H(x, y; n_w) = \begin{cases} 1, & {}^mD_H(x, y; n_w) \geq {}^mT_B \\ 0, & (\text{otherwise}) \end{cases}, \quad (11)$$

其中 mT_B 为双视角图像的各自二值化参数,则二值化差分图像中非零像素点最小的候选图像,可以利用公式(12)计算当前 ${}^m\phi(l)$ 的最相似图像序列:

$${}^mb({}^m\phi(l)) = \arg \min_{w \in [1, w]} \left(\sum_x \sum_y {}^mB_H(x, y; n_w) \right). \quad (12)$$

所以,当 $\phi(1) = n=1$ 时,已确定周期样本图像 ${}^mR(x, y; {}^m\phi(1))$ 的下一个周期相位 $\phi(2)$ 所对应的修正样本图像为 ${}^mR(x, y; {}^m\phi(2)) = {}^mO(x, y; {}^mb({}^m\phi(1)))$ 。同理可将公式一般化推广,定义已经确定的样本图像为 ${}^mR(x, y; {}^m\phi(l))$,在原数据搜索下,一个周期相位 $\phi(l+1)$ 对应的周期图像可利用公式(13)计算:

$${}^mR(x, y; {}^m\phi(l+1)) = {}^mO(x, y; {}^mb({}^m\phi(l))). \quad (13)$$

最后,通过以上算法可以建立周期相位样本库,并基于候选图像匹配方法,得到修正的双视角相机周期图像样本库 ${}^mR(x, y; {}^m\phi(l))$ 。其中 ${}^m\phi(l)$,为每个相机利用预存储图像序列 ${}^mO(x, y, n)$ 重新定义的整周期相位值,即 $l=1, 2, \dots, L(L=N)$ 。

(3) 周期掩模图像样本库的建立。

在高速实时视觉检测中,对每一帧采集的瞬时图像,都可从样本库 ${}^mR(x, y; {}^m\phi(l))$ 中匹配到动作最一致的图像,从而进行正常与异常状态的检测。然而,预存储的正常运动图像,尽管包括 1000 帧以上的图像来描述机械运动的一个周期,但是图像采样的离散性,导致实时图像和样本图像永远存在差异。这种特性会在图像差分中产生虚假边缘现象,影响系统监测的准确性。所以,本

文建立周期掩模图像样本图像来消除这种虚假边缘现象,以保证异常动作的正确识别。

周期图像样本库 ${}^mR(x, y; {}^m\phi(l))$, $l=1, 2, \dots, L$,对任意一个 ${}^m\phi(l)$ 对应的机械动作,包括 ${}^m\phi(l-1)$ 和 ${}^m\phi(l+1)$ 两个可能的机械运动方向,通过这两个方向最邻接图像的差分计算掩模图像,消除实时检测时的误差:

$${}^mC(x, y) = |{}^mR(x, y; {}^m\phi(l+1)) - {}^mR(x, y; {}^m\phi(l-1))|, \quad (14)$$

其中 $l=2, 3, \dots, L-1$,当 $l=1$ 或 $l=L$ 时,掩模图像按照最近相位取值。对差分图像进行二值化处理,计算掩盖虚假边缘所需要的像素范围:

$${}^mY(x, y; {}^m\phi(l)) = \begin{cases} 0, & {}^mC(xy) \geq {}^mT_Y \\ 1, & (\text{otherwise}) \end{cases}, \quad (15)$$

其中 mT_Y 为双视角掩模图像的阈值。由此可知,周期掩模图像是二值化图像序列,其在每张图像中以小范围离散点的形式存在,用于滤除实时检测时对应的虚假边缘噪点干扰。对建立的周期图像样本库周期相位值在圆周数值 $2 \cdot \pi$ 内进行归一化计算:

$${}^m\phi(\theta) = 2\pi \cdot {}^m\phi(l) / N. \quad (16)$$

最后,根据周期相位值 ${}^m\phi(\theta)$,重新建立周期双视角相机的图像样本库 ${}^mR(x, y; {}^m\phi(\theta))$ 、周期掩模图像样本库 ${}^mY(x, y; {}^m\phi(\theta))$,和周期相位样本库 ${}^mH({}^m\phi(\theta))$,其中 $\theta \in [0, 2\pi]$ 体现周期变化特性。以上为离线图像处理的算法,此过程不需要毫秒级的实时处理速度,所以可将更多的图像处理过程在离线处理中完成,简化在线处理的图像算法,从而保证双视角高速视觉的同步实时处理。

3.3 双视角高速相机实时检测算法

双视角高速视觉检测技术,需要在毫秒时间内完成高速图像处理,在线实时检测算法的本质即简化图像处理运算量,短时间内完成双视角同步检测。直接利用二维图像进行匹配搜索,难以达到高速处理,所以简化为:将实时二维图像转化为一维向量,基于简单的一维向量,搜索样本库中最相似周期相位值;利用映射关系提取样本图像和掩模图像,通过差分和滤波运算,得到最终的检测图像。同步计算双视角相机的实时信号,最终完成状态检测。

首先,利用固定像素点 ${}^mQ_c(x, y)$ 将瞬间高速图像 ${}^mI(x, y, t)$ 转换为 E 个元素的一维矩阵 $\beta(t)$:

$${}^m\boldsymbol{\beta}(t) = ({}^mI({}^mQ_1(x, y), t), \dots, {}^mI({}^mQ_E(x, y), t)). \quad (17)$$

其次,在周期相位样本库 ${}^mH({}^m\phi(\theta))$ 中,对当前帧图像的一维向量进行周期运动相位的样本库快速搜索,确定匹配的周期特性估计值 $\hat{\phi}_m(t)$:

$$\hat{\phi}_m(t) = \arg \max_{{}^m\phi(\theta), \theta \in [0, 2\pi]} \left\{ \frac{{}^m\beta(t) \cdot {}^mH({}^m\phi(\theta))}{\|{}^m\beta(t)\| \|{}^mH({}^m\phi(\theta))\|} \right\}. \quad (18)$$

再次,通过映射关系,对双视角相机的实时图像的相位值,提取对应的图像样本 ${}^mR(x, y; \hat{\phi}_m(t))$ 和掩模图像样本 ${}^mY(x, y; \hat{\phi}_m(t))$ 。利用图像差分计算实时图像与样本图像的差异:

$${}^mD_R(x, y, t) = |{}^mR(x, y; \hat{\phi}_m(t)) - {}^mI(x, y, t)|. \quad (19)$$

之后利用图像二值化处理,消除实时图像与样本图像之间相机传感器感光造成的背景图像噪声:

$${}^mB_R(x, y, t) = \begin{cases} 1, & {}^mD_R(x, y, t) \geq {}^mT_R \\ 0, & (\text{otherwise}) \end{cases}, \quad (20)$$

其中 mT_R 为双视角相机实时图像处理的二值化参数,在去除机械运动大范围背景后,还存在差分图像虚假边缘的噪声,此时利用掩模图像滤波:

$${}^mJ(x, y, t) = {}^mB_R(x, y, t) \cdot {}^mY(x, y; \hat{\phi}_m(t)). \quad (21)$$

最后,对于二值化的差分图像,掩模图像在滤波去除噪点,得到最终的双视角实时检测图像 ${}^mJ(x, y, t)$ 。当被测机械系统处于正常运行时,理论上实时检测图像的像素值全部为零,当出现异常状态时,实时检测图像存在集中的非零像素点。

第一,计算双视角检测图像的零阶矩,对非零值像素进行计数:

$${}^mM_0(t) = \sum_x \sum_y {}^mJ(x, y, t). \quad (22)$$

第二,将双视角相机的检测信号转换为连续脉冲信号,便于异常状态的高速计数:

$$s_m(t) = \begin{cases} 1 & {}^mM_0(t) > {}^mT_M \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}, \quad (23)$$

其中 mT_M 为双视角相机最终图像的异常像素总数的判断阈值。在实际工程中,最终图像存在随机离散的噪点,考虑高速视觉的实时计算效率,可以容忍这些噪点的存在,通过阈值 mT_M 将其弱化。

第三,机械系统处于正常运行状态时,偶尔存在分散的脉冲噪声信号;当异常状态时,脉冲信号密度增加,出现方波信号。双视角高速检测中,将两个信号值叠加,如公式(24)所示,可以更精确地判断系统异常状态:

$$S(t) = \sum_{m=1}^M s_m(t). \quad (24)$$

最后,利用双视角相机综合检测信号 $s(t)$ 实时更新状态值,定义 τ 的计数区间,规定在 τ 时间内,信号 $s(t) = M$ 时计数器累加一次。

$$s_{\text{final}}(t) = \begin{cases} 1 & \sum_{t \in [0, \tau]} s(t) > T_S \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}. \quad (25)$$

同时,开辟实时图像数据内存池,通过FIFO方式保留 X 帧的双视角高速实时图像数据。当 τ 时间内,计数器值大于阈值 T_S 时,可判断监测目标内出现异常状态。此时,系统发送触发命令,自动保存当前时间段中图像数据内存池的数据。

4 检测实验与结果

4.1 设定双目高速视觉实验环境

双视角高速视觉的机械运动检测系统利用一块IDP Express高速图像采集板卡,同时驱动两个高速摄像头,如图2(左)所示。在实验室,利用一台全自动缝纫机进行实验。为了检测高速复杂的机械运动,缝纫机的前后盖被打开,露出其中的机械结构。双视角视觉检测的区域为缝纫机下部分,包括针头和关联机械的高速往复机构,以及内部多种线圈的高速旋转机构,如图2(右)所示。两个摄像头分别从正面方向和侧面约 90° 两个不同方向实时检测机械系统。

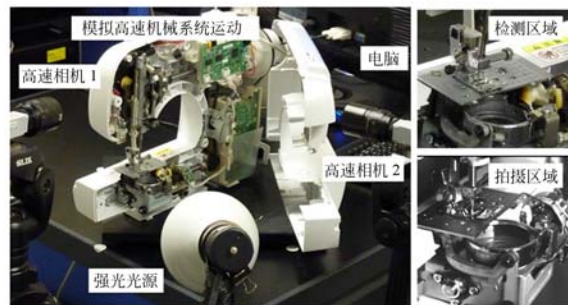


图 2 双目高速相机检测系统实验图

Fig. 2 Experiment of two-view high-speed camera detection system

4.2 双目高速相机实时检测实验

实验中缝纫机运行频率约为 13 Hz,对于此类运动,普通工业相机无法实现准确的检测。本研究所建立的双视角高速视觉系统,可以 1 000 frame/s 速度高速采集两个角度的瞬间图像,在 500 frame/s 完成算法计算,如图 3 所示。

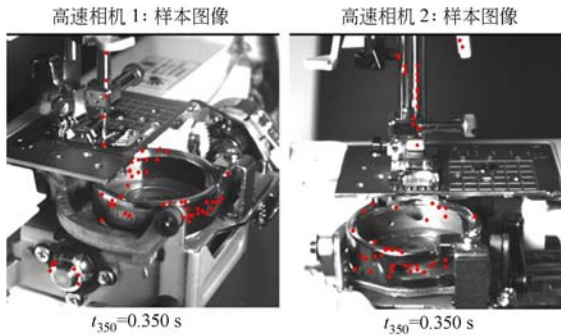


图 3 双目高速图像样本与关键点示意图

Fig. 3 Two view high-speed images and key points

离线处理开始阶段,将两个高速相机分别预存储 1024 帧正常运行下的高帧率图像,作为源数据样本建立数据库。首先,利用关键像素点提取算法,对两个视角的图像传感器进行一维向量简化。图 4 和图 5 分别表示高速相机 1 和高速相机 2 采集图像所提取的关键像素点集合,以及优化后的最终 $E=50$ 个像素点集合。由此,每帧图像利用这 50 个像素点的实时灰度值,可以简化为一维向量,减少运算量,保证 500 frame/s 的实时处理。

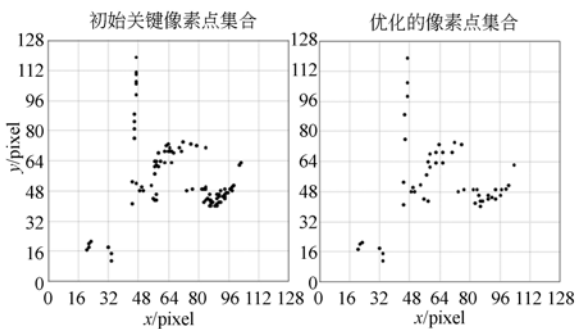


图 4 高速相机 1 提取的关键像素点集

Fig. 4 Key pixel points of high-speed camera 1

其次,利用算法提取的 $E=50$ 个关键像素点和预存储的 $N=1\ 024$ 帧高速图像,在离线阶段利用文中提出的算法建立了周期相位样本库、周期图像样本库和周期掩模图像样本库,为实时检测做好准备。

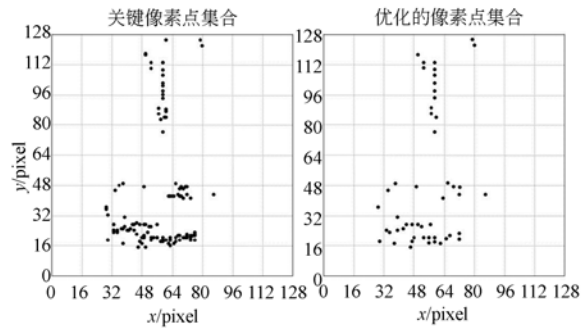


图 5 高速相机 2 提取的关键像素点集

Fig. 5 Key pixel points of high-speed camera 2

第三,在双视角实时检测过程中,两个高速相机同步采集目标机械运动的实时图像。利用优化的关键像素点,将二维图像转换为二维向量,并在周期相位样本库中搜索匹配的周期图像和掩模图像,进行同步实时的图像处理。图 6 和图 7 的第一个波形图为双视角相机分别计算的机械运动实时相位值,从结果可以看出,两个相机同步计算的相位值保持一致,并且都可以测得机械运动的频率约为 13 Hz,证明了相位提取算法的正确性。

通过双视角实时图像和匹配的周期图像样本差分计算,以及掩模图像的虚假边缘滤波,得到了最终的实时检测图像,其异常像素点计数信号值为图 6 和图 7 第二个波形图所示。由于实际机械运动中振动和光照的不稳定性,信号值在正常运动时具有离散和随机的噪声影响。特别在相机 2 的视角存在随机的异常判断时,相机 1 中判断为正常状态。所以,通过信号的阈值判断转换为脉冲信号后,消除了部分弱小噪声的影响,突出了真实的异常状态的信号值,如图 6 和图 7 的第三个波形图所示。

通过双视角的脉冲检测信号 $s_m(t)$,可以较明显地判断出:相机 1 视场的异常状态出现在 16.941 s 到 17.089 s,相机 2 视场的异常状态出现在 16.933 s 到 17.041 s。综合双视角检测结果,计算得到整体的实时信号,如图 8 所示。信号波形可以准确地检测出异常状态发生在 16.98 s。

图 9 和图 10 为双视角高速视觉实时检测系统在同步检测出机械系统的异常动作后,通过自动触发信号所拍摄的实时高速图像、样本图像和最终检测图像。内存开辟的双视角 100 帧图像预存储空间,可以实现 100 ms(0.1 s)异常动作的自动录制。

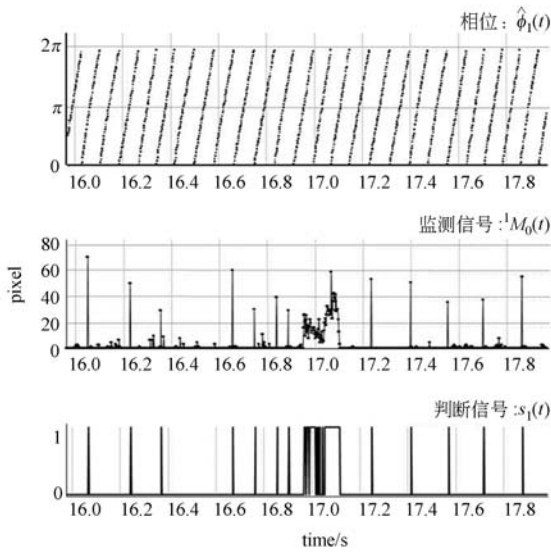


图 6 高速相机 1 的实时检测结果

Fig. 6 Real-time detection of high-speed camera 1

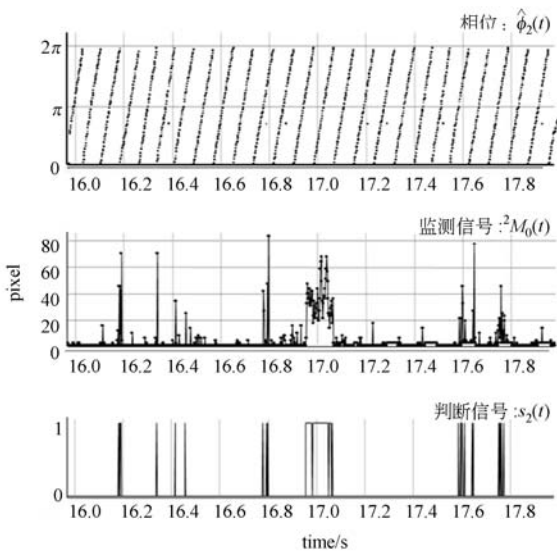


图 7 高速相机 2 的实时检测结果

Fig. 7 Real-time detection of high-speed camera 2

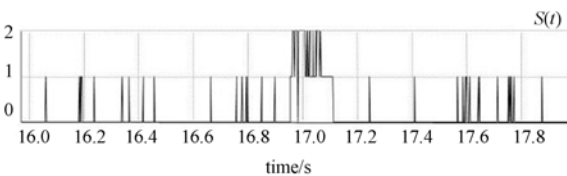
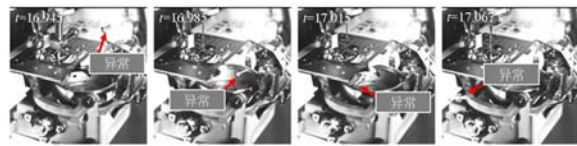


图 8 双视角高速相机综合检测状态信号

Fig. 8 Real-time detection of two-view high-speed cameras

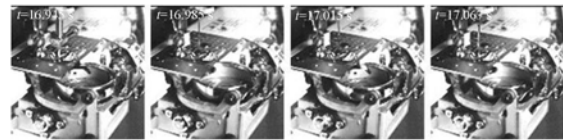
从这些图像中可以看出,异常动作为系统中飞过并发生碰撞的一颗尺寸约为 $1\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$

的螺栓,击中机械结构底部并被弹出的整个过程。通过双视角高速相机,可以自动识别和保存这些关键图像,用于后续的故障分析。其中,机械运动每步操作对应的相位值可正确计算如图 9(a),异常状态时间可以明确标出;对应的正常样本图像可以正确提取,如图 9(b);对应的历险过程生成的掩模图像样本如图 9(c)所示。最后,最终双视角检测图像亦可以正确处理得到,如图 9(d)所示。



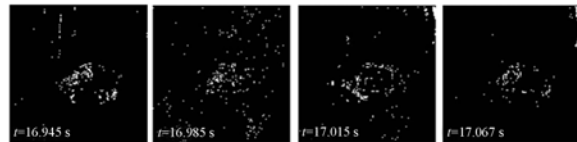
(a) 实时高速图像

(a) Real time high-speed images



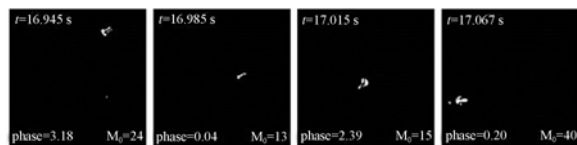
(b) 实时图像匹配的样本图像

(b) Reference images of input images



(c) 实时图像匹配的掩模图像

(c) Reference mask images of input images



(d) 最终的检测图像

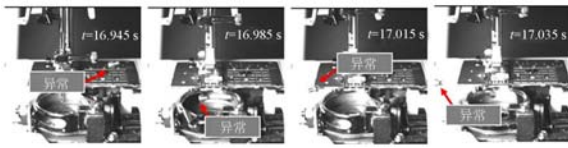
(d) Final detecting images

图 9 局部机械运动检测实验相关图像(高速相机 1)

Fig. 9 Related detecting images (high-speed camera 1)

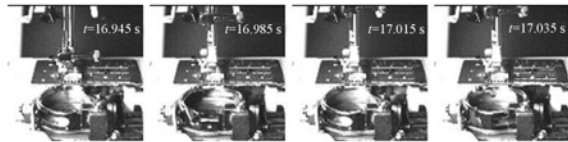
双视角高速视觉系统可实现 500 frame/s 在线检测,图 9 和图 10 为间隔选取 $16.945 \sim 17.067\text{ s}$ 的实时图像和异常动作的识别图像,并与样本数据进行了比较。可以看出高帧率图像匹配和数据提取结果对应正确,验证了本论文提出

的算法以及系统的有效性。



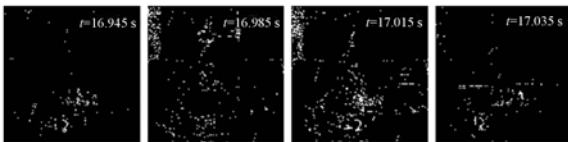
(a) 实时高速图像

(a) Real time high-speed images



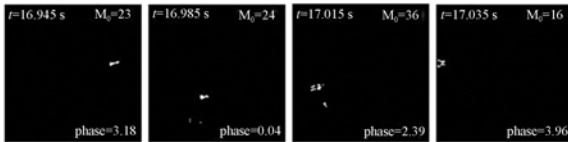
(b) 实时图像所匹配的样本图像

(b) Reference images of input images



(c) 实时图像所匹配的掩模图像

(c) Reference mask images of input images



(d) 最终的检测图像

(d) Final detecting images

图 10 局部机械运动检测实验相关图像(高速相机 2)

Fig. 10 Related detecting images (high-speed camera 2)

4.3 实验分析

本研究在实验室环境下,进行了双视角高速视觉 500 frame/s 的实时视频流检测,系统对每个相机预存储 $N=1\ 024$ 帧图像作为原始样本图像。针对运动目标与光照环境,本实验根据经验值,滤除冗余图像背景像素时,初级滤波阈值 mT_F 一般取 0.2~0.4 倍的波峰波谷差值,本实验取值为 0.3 倍,关键像素点个数为 $E=50$,保证一维向量搜索的时效性; mT_B 为双视角图像的二值化阈值,一般取值 16~32,本实验取值为 20;双视角掩模图像的阈值 mT_Y 一般取值为 64~96,本实验取值为 80。实时处理中,双视角图像处理二值化阈值 mT_R 一般取值 16~32,本实验取值为 24;双视角相机检测图像的判断阈值 mT_M 一般取值为 10

~50,本实验的异常状态尺寸较小,为了提高检测精度,取值为 20。定义计数区间 $\tau=15$,计数器值阈值 $T_s=10$,内存池预留 100 帧图像空间。

在 500 frame/s 高速实时处理过程中,对应 2 ms 完成双视角高速视觉的同步检测,其中高速图像的获取时间为 0.1 ms 内同步现场可编程门阵列(FPGA)并行采集双视角图像;一维向量转化与相位搜索时间为 0.4 ms 以内,双视角图像在 CPU 中串行耗时 0.8 ms 以内;图像差分与图像滤波时间为 0.2 ms 以内,双视角计算时间为 0.4 ms 以内;双视角图像与脉冲信号处理时间为 0.2 ms 以内;双视角信号叠加与计算最终触发信号耗时为 0.2 ms 以内。由于双视角一维向量搜索的距离不同,预留 0.2 ms 的时间,满足最长距离的搜索,故整体实时检测时间可在 1.9 ms 内完成,以达到 500 frame/s 的计算速度。

论文提出的算法和高速视觉检测系统,适用条件如下:高速机械系统需要保证重复性一致的周期性运动,检测环境和外界光线保持恒定不变;被检测的机械系统是短周期的高速机械运动;离线样本数据量的建立需要保证整体算法 2 ms 的实时计算,过多的数据量会增加在线搜索的时间。

5 结 论

本研究针对周期性机械运动的探测,提出了利用双视角高速视觉系统实现无损无接触的实时视觉检测技术。提出了基于关键像素点的提取技术,在离线过程中建立了周期相位样本库,研究了优化算法建立了准确的周期图像样本库和周期掩模图像样本库。实时检测时,结合双视角相机的同步实时信号,最终确定异常目标的发生。此系统可以从两个不同角度实时检测高速运动的机械操作,对于目标区域发生的异常操作,可以在 0.002 s 内完成实时判断,并控制视觉系统保存此刻的关键视频图像。

在系统验证实验中,利用真实的、高速运转的自动缝纫机机械机构为检测目标。通过本文提出的算法,基于提取的关键像素点,建立了正确的双视角图像样本库,准确地从两个不同视角同步、实时地计算周期相位值,实现了 500 frame/s 的机械系统运动状态检测,以及 0.1 s 内的快速运动目标检测。实验结果表明:本算法对于复杂的、连

续的机械运动,有良好的实时检测性能。未来本研究将针对长周期的机械系统进行检测研究,并

提高算法的稳定性和执行效率,为机械设备的非接触检测,提供一种高速可视化的检测方法。

参考文献:

- [1] 张宇洋,刘满华,韩韬. 基于 MeanShift 图像分割结合 SVM 判决的候梯人数视觉检测系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 1079-1085.
ZHANG Y Y, LIU M H, HAN T. Elevator-waiting people counting system based on meanshift segmentation and svm classification[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 1079-1085. (in Chinese)
- [2] 毕昕,丁汉. TFT-LCD Mura 缺陷机器视觉检测方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 13-19.
BI X, DING H. Machine vision inspection method of Mura defect for TFT-LCD[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(12): 13-19. (in Chinese)
- [3] 闵卫东,石杰,韩清,等. 一种分布式人脸识别方法及性能优化[J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 779-785.
MIN W D, SHI J, HAN Q, *et al.*. A distributed face recognition method and performance optimization[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3): 779-785. (in Chinese)
- [4] 袁小翠,吴禄慎,陈华伟. 基于 Otsu 方法的钢轨图像分割[J]. 光学精密工程, 2016, 24(7): 1772-1781.
YUAN X C, WU L SH, CHEN H W. Rail image segmentation based on Otsu threshold method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7): 1772-1781. (in Chinese)
- [5] HIRAI S, ZAKOJI M, MASUBUCHI A, *et al.*. Realtime FPGA-based vision system[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2005, 17(4): 401-409.
- [6] LEO G D, LIGUORI C, PIETROSANTO A, *et al.*. A vision system for the online quality monitoring of industrial manufacturing[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 89, 162-168.
- [7] ISHII I, TATEBE T, GU Q Y, *et al.*. 2000 Fps real-time vision system with high-frame-rate video recording[C]. *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE*, 2010: 1536-1541.
- [8] GARCIA A, MATTISON E, GHOSE K. High-speed vision-based autonomous indoor navigation of a quadcopter[C]. *Proceedings of 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, IEEE, 2015: 338-347.
- [9] NAMIKI A, SUGANO R, MIZUSAWA S, *et al.*. High speed dexterous manipulation with high speed vision[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2009, 42(16): 395-400.
- [10] 杨少华,李斌康,郭明安,等. 利用普通 CCD 实现百万帧/秒超高速成像的时序驱动技术[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1854-1860.
YANG S H, LI B K, GUO M A, *et al.*. Ultra high speed driver timing method for million frame per second based on normal CCD image sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8): 1854-1860. (in Chinese)
- [11] 张芬. 机载高速视觉图像目标识别优化仿真研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(1): 430-433.
ZHANG F. Optimization and simulation of target recognition of onboard high-speed visual image[J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(1): 430-433. (in Chinese)
- [12] JIANG M J, AOYAMA T, TAKAKI K, *et al.*. Pixel-Level and robust vibration source sensing in high-frame-rate video analysis[J]. *Sensors*, 2016, 16(11): 1842.
- [13] YANG H, TAKAKI T, ISHII I. Real-Time multidirectional modal parameter estimation of beam-shaped objects using high-speed stereo vision[C]. *Proceedings of IEEE Sensors, IEEE*, 2012.
- [14] WATANABE Y. High-speed optical 3D sensing

and its applications[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2016, 5(5-6): 367-376.

- [15] 王耀东,朱力强,史红梅,等. 高速机械系统运动特性的实时视觉检测技术研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(2): 82-90.

WANG Y D, ZHU L Q, SHI H M, *et al.*. Research on real-time vision detection technology for motion feature of high-speed mechanical system

[J]. *Journal Of Mechanical Engineering*, 2016, 52(2): 82-90. (in Chinese)

- [16] ZHANG Z X, YANG J, LI H L, *et al.*. High-speed object detection based on a hierarchical parallel vision chip[C]. *Proceedings of the 11th International Conference on ASIC (ASICON)*, IEEE, 2015, 1-4.

作者简介:



王耀东(1982—),男,河北石家庄人,讲师,2008年于北京科技大学获得硕士学位,2011年于日本广岛大学获得博士学位,现为北京交通大学机电学院讲师,主要从事机器视觉及光学测控方面的研究。E-mail: ydwang@bjtu.edu.cn

通讯作者:



朱力强(1972—),男,辽宁大连人,副教授,1998年于北京交通大学获得硕士学位,2004年于美国亚利桑那州立大学获得博士学位,现为北京交通大学机电学院副教授,主要从事轨道交通检测技术研究。E-mail: lqzhu@bjtu.edu.cn