

基于图像处理的城市轨道交通异物检测系统研究

浦 伦

(上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 201101, 上海//高级工程师)

摘 要 提出了一种适用于城市轨道交通的异物检测系统, 可实现 15 帧/s 的图像采集和异物检测。根据相关性原理, 对相邻多帧检测结果进行相关性计算, 提高了算法的准确率和抗干扰能力。通过 LoRa 扩频通信, 可实现远距离、高抗干扰的无线通信网络。该系统中, 各个智能摄像头通过 LoRa 发送和接收与其相关的命令的同时, 实现数据的转发, 对远程摄像头的通信提供中继转发功能。该系统在节约人力成本的前提下, 提高了城市轨道交通的安全性。

关键词 城市轨道交通; 运动物体检测; LoRa 通信; 嵌入式系统; 智能摄像头

中图分类号 U298.1*2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.11.044

Research on Urban Rail Transit Foreign Body Detection System Based on Image Processing

PU Lun

Abstract A foreign body detection system for urban rail transit is proposed, which is capable of conducting image collection and foreign body detection at fifteen frames per second. The accuracy and robustness of the algorithm is improved with correlation calculation for detection results of consecutive frames. With LoRa, a spread spectrum communication protocol, steady long distance wireless communication is realized. In the system, each smart cam receives and sends data and commands with a server via LoRa. Meanwhile, these smart cams can relay messages for other cams to stabilize whole system communication quality. The system improves the urban rail transit safety under the premise of saving labor cost.

Key words urban rail transit; moving object detection; LoRa communication; embedded system; smart cam

Author's address Telecom & Signal Branch of Shanghai Rail Transit Maintenance Support Co., Ltd., 201101, Shanghai, China

安全可靠运行是城市轨道交通的核心。目前, 新建设的 CBTC(基于通信的列车自动控制)系统普遍采用计轴器作为轨道区段检测装置, 采用无线接入点作为车地通信的传输装置。计轴器与无线通

信的结合, 大大提高了列车运行的效率, 缩短了行车间隔, 但是对区间异物侵线等无法检测。传统的轨道系统将两根钢轨作为导体, 根据列车驶入闭塞区段或轨道断裂时继电器会失磁来检测行车区间内有无金属异物侵线或钢轨是否断裂。这两种方式均无法发现人、动物以及非金属物体侵线。同时, 随着运营密度的日益提升, 计轴器和固定闭塞的技术能力无法满足当前严峻的安全运行要求。

基于图像处理的监控系统, 因部署简单、有利于证据的保存和查证而得到了广泛的关注。文献[1]提出了一种综合背景差和帧差法的运动物体检测算法, 用于检测外物入侵。文献[2]使用 OV7670 和 ADV611 对 CMOS(图像传感器)产生的图像进行视频压缩传输, 提高了视频传输的容量。文献[3]在传统视频监控的基础上, 提出了区域入侵检测、越线入侵检测方法, 对行驶中的车辆进行监控测速, 实现列车的防撞和预警。文献[4]提出了基于图像处理的道岔尖轨密贴状态检测方法。文献[5]采用图像灰度校正、锐化和图像分割, 对地铁隧道裂缝进行检测。文献[6]采用红外补光, 实现全天候图像采集, 采用三帧差分法用于运动物体的检测, 采用 Kalman 滤波提高物体的跟踪特性。

在城市轨道交通中, 通信手段的选择至关重要。文献[6]提出手机与设备间以蓝牙进行通信, 将传感器的数据传输到手机, 然后通过 4G 网络与服务器进行数据交互。

本文提出一种基于嵌入式的城市轨道交通监视系统, 该系统由作为服务器的计算机和轨道沿线的多台智能摄像头构成, 能够全天候地对城市轨道交通的运行进行监视、对轨道的异物入侵做出报警。

1 智能摄像头的设计

智能摄像头应能够对所监视的场景进行视频采集, 对满足取证的图像进行保存和传送, 通过摄像头所搭载的 ARM 处理器进行图像处理和检测异

物入侵。因此,本文设计的智能摄像头由以下几个部分构成。

1) 图像传感器。综合图像的视觉效果和 ARM 的图像处理速度,选择 200 万像素的彩色 CMOS 图像传感器 MT9D131 作为智能摄像头的图像采集器。通过 ARM 处理器的设定,MT9D131 芯片能够对全场景或部分图像进行采集,可以输出多种图像格式,采集的图像的分辨率可以在 200 万像素范围内方便地设定。此外,该传感器具有超低亮度高品质图像采集功能,特别适合在晚上或微光情况下使用。

2) ARM 处理器。采用 STM32H743 处理器。它具有图像压缩和解压功能。在不占用 CPU 处理器资源的情况下,进行图像压缩,有利于远程图像的传输、图像解压,使得摄像头自身具有图像处理功能,可在摄像头中实现运动物体图像的取证。

3) 摄像头数据存储。对于室外长期使用的设备来说,使用 SD 存储卡容易出现接触不良,影响设备的正常运行。因此选用 64 MB 的 IS42S16320 SDRAM 存放工作数据和图像处理的结果。为了能够保存用于取证的图像文件,采用容量为 128 MB 的 FLASH 芯片 K9F1G08U0E,它具有快速写入功能,设备掉电以后,保存的数据也不会丢失。

4) 摄像头的通信。综合各种无线通信的特点,采用 LoRa 通信技术。LoRa 通信采用扩频技术,在较低耗电量的情况下,能够实现 10 km 以上的通信距离。在城市轨道交通监视系统中,各个摄像头应该实现视频范围的全覆盖,所以摄像头之间的距离远小于 10 km,因此 LoRa 通信技术能够保证通信畅通。

5) 自动组网。摄像头沿轨道安装,虽然各摄像头间的距离不远,但是也不能完全保证每个摄像头与控制室之间的距离在通信范围之内。因此,需要实现摄像头自动组网,使其能够在网络中自主实现信号的中继转发,实现远程设备通过自主网络路由与控制室计算机的数据交互。

该智能摄像头最大限度地降低了电量消耗,内置的 FLASH 能够保存不少于 1 000 幅高质量的 JPEG 图片(假设每张图片的文件大小不大于 100 kB)。

智能摄像头的 MT9D131 芯片采集彩色视频图像,图像输出格式为 RGB565,每幅图像需要 938 kB 的容量。MT9D131 芯片的输入时钟频率为 25

MHz,工作方式为 Preview 模式,输出信号 VSync(帧同步)、HSync(行同步)、PxlClk(数据同步信号)和 8 位图像数据与 ARM 的 DCMI 接口进行连接。当图像采集帧率为 15 帧/s 时,ARM 的 DCMI 接口的图像采集速率为 14 MB/s。通过 DMA(直接存储器访问)方式,图像信息直接写入 SDRAM 中。在 SDRAM 中开辟了一个 3.7 MB 的图像存储缓冲队列,该队列可以循环保存 4 帧完整图像。

2 系统软件构成

由于智能摄像头在运行时需要同时进行视频的采集、视频图像处理、LoRa 通信及 LoRa 自动组网等,因此采用操作系统进行多任务管理。该智能摄像头运行在 Cortex 架构上,为了满足多任务操作系统的要求,采用 FreeRTOS 作为摄像头的操作系统。

智能摄像头在上电初始化结束后,开启三个线程,分别是图像处理、无线 LoRa 通信、自动组网线程。三个线程各自独立运行。在图像处理和无线通信线程间创建一个 Queue,以实现线程间的信息交互。图像处理线程对视区图像进行运动物体检测,在发现运动物体时,通过 Queue 将信息传递给无线 LoRa 通信线程,再由该线程将结果传送到服务器。

2.1 图像处理

图像处理的主要任务是在视区范围内进行运动物体检测。MT9D131 输出的图像格式是 RGB565,每个像素三种颜色,共占两个字节。因为计算机是按照字节进行计算的,这种格式给图像处理计算带来了麻烦,通过软件的格式转换必将占用时间和内存资源。为了提高图像处理的计算速度,本文对最新采集的图像信号,通过硬件进行图像数据格式转换,得到 RGB888 格式的图像数据。RGB888 格式中,每个像素占 3 个字节,分别保存红、绿、蓝三种颜色信息。STM32H743 处理器提供 DMA2D 功能,它能够不需要 CPU 的介入,依靠硬件在内存中进行图像文件的复制。而且,在图像复制过程中,按照相应的设定,图像数据复制的同时实现 RGB888 格式转换。

本文的图像处理流程如图 1 所示。

在 SDRAM 中开辟一个用于保存 DMA2D 输出结果的 RGB888 格式图像队列。该队列保存最近 10 帧图像,用 $F_i(i=1, \dots, 10)$ 表示该图像队列中的

各图像。其中, F_1 为最新保存图像。ARM 将每帧需要处理的图像保存到 F_1 位置, 丢弃原来 F_{10} 的图像, 保证队列中保存的是最新 10 帧图像。

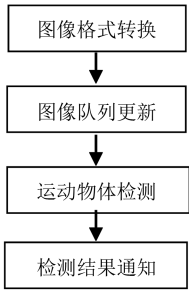


图 1 图像处理流程

运动物体检测是一个实时检测算法, 由于 MT9D131 输出图像的速率为 15 帧/s, 运动物体检测必须在 60 ms 内完成全部计算工作。但是, 与 PC (个人计算机) 相比, ARM 平台的处理速度较低, 因此计算量大的算法不适合本文讨论的摄像头。本文中采用耗时较少的帧间差进行运动物体检测。算法流程如下:

- 1) 从 RGB888 格式图像队列中取两幅图像作为前景图和背景图, 前景图 $C=F_1$, 背景图 $B=F_{10}$ 。
- 2) 对两幅图进行图像下采样处理, 把原来像素为 800×600 的图像转换成 200×150 的 RGB888 图像输出。
- 3) 两幅图像的对应像素数值 (像素的 RGB 数值直接相加结果) 相减, 求取绝对值误差 d 。
- 4) 将 d 与噪声阈值 n_{th} 相比, 将 $d>n_{th}$ 的像素标注为运动物体疑似点。对于疑似点附近的像素进行疑似点检查。
- 5) 对图像中的疑似点计算结果进行灌水操作, 得到疑似点连通域。剔除无法构成连通域的疑似点, 得到图像中运动物体的面积和位置。
- 6) 对应存在疑似点的图像, 启动硬件 JPEG 压缩算法, 压缩结果保存至 FLASH 芯片 K9F1G08U0E 中。

上述算法流程中, 噪声阈值 n_{th} 的估算十分关键。 n_{th} 偏高会产生漏检, 偏低则会输出大量的噪声, 使得后续灌水算法的效率降低。从噪声统计特性可知, 噪声输出的最大值一般不会超过平均值的 6 倍。因此, 计算整幅图像的绝对值误差 d 的平均值 d_{avg} , 考虑裕量取阈值计算系数, 取 $k=10$, 得到 $n_{th}=kd_{avg}$ 。

通过上述帧间差法可以得到图像中运动物体

的位置信息。但是, 在实际应用中偶尔会出现干扰, 本文利用噪声特征进一步消除干扰。基于噪声产生的干扰具有一定的不确定性, 无法准确预测噪声产生的时间和位置。这意味着相邻两次计算结果中, 噪声输出不具备相关性。所以, 本文对帧间差法得到的连通域进行相关性检查, 规定在连续多帧计算结果中出现相近位置的运动物体的情况下, 才能判定图像中存在运动物体。图像处理线程通过 QueueSend 向无线 LoRa 通信线程发送运动物体的位置及大小信息, 无线 LoRa 通信线程将这个信息通过异物警告命令向服务器报告。

2.2 无线 LoRa 通信

智能摄像头通过 LoRa 与服务器进行无线通信。LoRa 采用扩频通信, 传输距离远、抗干扰强。为了提高通信效率和减少通信影响, 在设计通信协议时, 需要尽可能地缩短通信协议的长度。异物警告命令格式如下:

F D14—D0 SysTick Y9—Y0 X9—X0 Size ID CRC

异物警告命令总长度为 10 字节, 其内容规定如下:

- 1) 异物警告命令中, 第一个字节的最高位 F 确定异物警告命令传输方向。其数值为 0, 表示命令从服务器发向智能摄像头的回答; 其数值为 1, 表示该命令是由摄像头发出, 命令传输目的地为服务器。
- 2) 命令的第一个字节的剩余 7 位和第二字节的 8 位合起来成为一个 15 位的数据, 表示数据范围为 0~32 767。系统中, 服务器地址固定为 0。所以, 摄像头的地址取值范围为 1~32 767。系统中, 摄像头数量不能超过 32 767 个。
- 3) 服务器和摄像头需要统一时间, 命令中 SysTick 为 2 字节的当前时间值。时间分辨率为 ms, 表示的时间长度为 60 s。
- 4) 图像像素为 800×600 , 可以各用 10 位数据表示图像中 x 和 y 的坐标值, 命令中用 Y9—Y0 和 X9—X0 表示运动物体在图像中的位置。
- 5) Size 为 2 字节的运动物体面积值。
- 6) ID 为四位的命令。ID 取值范围为 1~3, 用于区分相同设备发出的不同命令。摄像头每发出一个新命令, ID 数值加 1, 当 ID 数值大于 3 时, 令 ID=1。

为了能够检查数据包的完整性, 对数据包进行 CRC16 校验后把校验结果随命令体一起发送。由

于命令中 CRC 项只有 1 个字节保存空间,因此对 CRC16 的双字节输出计算其异或得到 1 字节的 CRC 结果。

为了保证异物警告命令的正常接收,智能摄像头向服务器发送的命令必须要得到应答信号。服务器接收到智能摄像头的命令,首先将命令复制到发送缓冲,将命令中 F 单元清零,重新计算 CRC 后发出命令回复信号。

命令中, SysTick 需要系统统一定时,使得所有智能摄像头采用统一时间。为了实现系统定时,服务器在 60 s 时间间隔内发出心跳信息。心跳信息格式如下:

F	D14—D0	SysTick	SysTime	Rpt	CRC
---	--------	---------	---------	-----	-----

心跳命令总长度为 10 字节,F 域为 0,表示命令由服务器发向智能摄像头;D14—D0 全为零,表示这是心跳信息;SysTick 占 2 字节,为服务器在一分钟内的以毫秒为单位的时标;SysTime 占 4 字节,表示以秒为单位的时间值,表示的时间长度为 100 年;Rpt 是心跳信号的转发数,从服务器发出时,Rpt 值为 0。

当有异物入侵时,就需要摄像头提供当时的图像,由于图像文件大小一般为数十 kB,因此,需要通过一种称为 BULK 的数据通信,每个数据包可传输 256 字节数据。服务器请求摄像头发送图像信号的命令如下:

F	D14—D0	TID	PID	CRC
---	--------	-----	-----	-----

BULK 请求命令为 6 字节。F 域为 0, D14—D0 为摄像头的地址。TID 为 1 字节,表示请求的图像序号。PID 为 2 字节,表示请求的数据包序号,对应请求的每个数据包,摄像头发送 256 字节的图像信息。

摄像头接收到 BULK 请求后,启动 BULK 命令发送。把图像文件按照 256 字节分成若干 BULK,按照服务器请求,从请求的 BULK 号开始,将没有发送过的 BULK 依次组成 BULK 命令并发送。BULK 命令格式如下:

F	D14—D0	TID	PID	Payload(256 B)	CRC
---	--------	-----	-----	----------------	-----

BULK 命令中,F 为 1,D14—D0 为摄像头的地址。TID 为 1 字节,表示发送的图像序号;PID 为 2 字节,表示 BULK 数据包序号;Payload 是 256 字节的图像数据。

2.3 自动组网

由于城市轨道交通的传输距离远,因此不能保

证各个智能摄像头能够与服务器直接进行命令的收发。这时就需要参与 LoRa 通信的智能摄像头实现网络通信中的信号转发功能,通过信号转发使得 LoRa 通信范围得到扩展。

自动组网的主要功能为心跳信息的传输。在 1 min 内,服务器随机发出心跳信息,各个智能摄像头接收到心跳信息后更新自身的时钟。在随后的 1 min 内随机发出心跳信息。在发出的心跳信息中,Rpt 的值增 1(Rpt 最大值为 255)。这是为了帮助远程的智能摄像头能够及时更新其本地的时钟值。

当智能摄像头检测到运动物体后,发出异物警告命令。对于摄像头,要求发出异物警告命令的 1 s 内接收到服务器的回答,否则认为通信超时,触发命令再发送。当命令重发超过 10 次而接收不到服务器的应答信息时,该命令传输失败。

在异物警告命令出现时,该摄像头附近的摄像头也能接收到该异物警告命令。它们进入命令监控模式,若发现该命令在 2 ms 内接收不到服务器的应答,摄像头就在 1 ms 内随机转发该异物警告命令。所以,远程的智能摄像头的异物警告命令通过数次转发,可以传输到服务器。

服务器得到异物警告命令后,发出应答信息,凡是参与该异物警告命令转发的智能摄像头,转发应答信息。最终,发出异物警告命令的摄像头接收到应答信息。

3 系统实现

由 STM32H743 和 MT9D131 构成的智能摄像头供电电压为 12 V,全速工作的总电源电流为 160 mA。LoRa 在数据收发时候,对 12 V 供电电源增加 50 mA 的工作电流。所以,单个摄像头耗电量为 2.5 W。

鉴于城市轨道交通的特殊情况,沿线安装的智能摄像头基本是固定安装,不会经常发生安装位置的变化,因此这些智能摄像头的自动组网需要进行改进。一般来说,摄像头上电以后,不知道附近存在的其他摄像头和服务器的位置。对于系统中的无线通信,摄像头都积极参与信号的转发,因而系统中的数据包会被大量转发。所以,在自动组网线程中,增加智能摄像头学习功能,对于可以转发的命令包,先检查附近其他摄像头的转发情况,判断其转发是否属于冗余转发,从而判定在转发竞争中

是否胜出;当其他摄像头竞争胜出时,就降低自身的转发参与热度;当胜出的转发摄像头不再转发命令时,原来竞争失利的摄像头再次竞争,直到产生新的胜出设备。

4 结语

本文提出了一种面向城市轨道交通的异物检测系统,当有异物入侵时,该系统会主动发出警示并提供图像备案。通过多帧检测的相关计算,提高了帧间差算法的抗干扰性。LoRa 技术的应用,使得低功耗、远距离通信成为可能。LoRa 无线通信使得系统的部署和维护变得容易。

本系统在城市轨道交通中还可以有更多方面的应用,如计算列车行进速度,实时监控列车间隔、列车位置,监测道岔、信号机等轨旁设备,及时发现区间冒烟、火灾等事故。本系统的全面投用,可以大幅度减少城市轨道交通区间内设备安装的数量与类型,降低维护成本,缩短检修时间。今后还可以将现有网络系统与既有信号系统统一组网,统一监控界面,将报警信息直接发送给信号监控系统,使得维护更加智能化。

本系统在实际应用过程中,尚有值得继续研究的问题:首先,摄像头作为固定位置安装的设备,其角度的选择、布置的数量必须经过严格、科学的分析;其次,区间内存在大量支架、设备、电缆,安装空间有限,需多专业共同协调,确认合适的安装点。另外,系统算法可以继续优化,以提高检测的速度与准确性。

参考文献

- [1] 陈兴杰,许劲松,刘志钢. 轨道交通入侵智能监控系统[J]. 中国铁路,2009(5): 62.
- [2] 麻天骄. 城市轨道交通客流监控技术的改进[D]. 西安:西安电子科技大学,2015.
- [3] 陈雁,赵瑜,管才路. 智能视频分析技术在轨道交通视频监控系统中的应用[J]. 科技视界,2017(14): 19,29.
- [4] 郑霄,王俊峰. 基于图像处理技术的转辙机实时在线监测研究[J]. 铁道通信信号,2009(6): 22.
- [5] 胡哲. 基于图像处理的地铁隧道裂缝检测技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [6] 罗海凤,詹显军,陈博. 轨道交通监测信息化管理系统研发与运用[J]. 铁路计算机应用,2018(3): 58.

(收稿日期:2020-07-20)

超级工程闪耀“十三五”:复兴号引领中国速度

中国高铁是一张闪亮的“中国名片”,其中,复兴号无疑是我国铁路装备制造技术发展的集大成者,它拥有全部的核心技术,完全实现自主知识产权。2017 年 6 月 26 日,首对复兴号中国标准动车组在京沪高铁正式双向首发。复兴号的成功研制和运营,标志着我国已全面掌握高铁关键核心技术,并处于世界先进水平,建立了基于自主知识产权的高速动车组技术平台和技术标准体系。中国铁道科学研究院集团有限公司首席研究员赵红卫说,在中国标准动车组的列车上面,牵引系统、制动系统,包括神经网络系统、车体转向架,这些核心关键的系统,都是完全自主的。在复兴号的研制过程中,大量采用了中国国家标准、铁道行业标准及专门为新型标准化动车组制定的一批技术标准。254 项重要标准中,中国标准占 84%;而且,标准统一也就意味着所有标准动车平台列车都能连挂运营、互联互通。给世界高铁列车制造提出了新的标准体系。中国中车集团有限公司总经理孙永才说,为什么复兴号叫中国标准动车组?这个标准就是走向市场最核心也是最关键的一个因素。2017 年 9 月,复兴号动车组在京沪高铁实现时速 350 km 商业运营;2019 年 12 月,复兴号智能动车组在京张高铁成功上线运用,并在世界上首次实现时速 350 km 自动驾驶功能,高铁技术正在与互联网、人工智能深度融合,更具智慧。国铁集团工电部部长莫志松说,自动驾驶是利用智能化的控制算法和控制策略,自动控制列车按照曲线来运行,解放司机,让司机更集中精力去瞭望线路,去观察设备的状态。目前,我国投入运用的复兴号动车组超过 800 标准组,覆盖全国 27 个省区市和香港特别行政区。如今,复兴号朝着系列化发展,以适应不同的运行环境、地质条件、速度等级的要求;同时还会向智能和绿色方向发展,进一步提高我国铁路建设数字化、智能化水平。赵红卫说:正在研制的新一代复兴号动车组会更安全、更节能、更环保;也会把复兴号的品牌进一步向不同的速度级延伸,现在也研制了时速 250 km 的动车组;复兴号的服务品质和开行范围还会进一步扩大,让广大乘客都能够体验到复兴号给人们生活所带来的便捷。

(摘自 2020 年 10 月 21 日央广网“新闻和报纸摘要”,记者 杨森报道)