

基于机器视觉的在用柴油车烟度测量方法

梁荆璞, 文国军, 甘露, 吴丹, 王玉丹

(中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 武汉 430074)

摘要: 使用柴油发动机为动力的车辆, 以其优良的动力、经济耐用等优点, 在生产与运输中得到广泛的应用; 然而柴油车带来的环境污染问题一直被社会各界诟病, 特别是一些排放黑烟却仍然上路的柴油车, 对环境的污染十分严重; 传统的在用柴油车烟度测量采用测量人员现场目测的方法, 不仅测量结果会受检测人员自身的状态影响而不准确, 而且测量人员身心健康也会受到严重的损害; 一种基于机器视觉的在用柴油车烟度测量方法, 包括硬件测量平台的搭建, 使用 OpenCV 作为图像处理算法基础, 进行 VC++ 应用程序的开发, 经过实验的验证, 短时间即可测量出在用柴油车的烟度级别, 具有操作便捷、测量快速、结果准确等特点。

关键词: 机器视觉; 图像处理; 在用柴油车; 黑烟; 烟度测量; 林格曼黑度

Measuring Method for Smoke Emission of In-use Diesel Vehicles Based on Machine Vision

Liang Jingpu, Wen Guojun, Gan Lu, Wu Dan, Wang Yudan

(College of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Vehicles powered by diesel engine are widely used in production and transportation because of the excellent power, economy and durability. The environmental pollution caused by diesel cars has been criticized by all sectors of society. The traditional measurement of smoke emission in in-use diesel vehicles by the on-site visual measurement of surveyors is not only affected by surveyors' own state, which leads to inaccurate, but seriously bad for surveyors' physical and mental health. A method of measuring the degree of smoke emission in diesel cars based on machine vision will be proposed. By building hardware measurement platform, using OpenCV as image processing algorithms, and developing VC++ application, the smoke level of diesel cars can be measured in a short time after the experimental verification. It has the characteristics of convenient operation, fast measurement and accurate results.

Keywords: machine vision; picture processing; in-use diesel vehicles; black smoke; smoke emission measuring; Ringelmann blackness

0 引言

使用柴油发动机为动力的车辆, 以其优良的动力、经济耐用等优点, 在生产与运输中得到广泛的应用。然而, 柴油车带来的环境污染问题也一直受到社会各界的诟病, 特别是一些排放黑烟的柴油车, 对环境的污染极为严重, 相关部门也特别针对使用柴油发动机作为动力的车辆制定了标准^[1]。在用柴油车即注册登记有牌照的柴油车。检测部门通过设立检测站进行排查的形式, 以现场的烟度测量结果为依据, 采取禁止黑烟严重超标却仍然上路的在用柴油车进入城区等限制措施。

在用柴油车排放的尾气中可视的黑烟含量使用烟度来表示。传统的烟度测量方法是由接受过专业培训并取得认定资格的测量人员直接在现场进行目测, 测量的结果很容易受到测量人员自身状态的影响。虽然是专业的人工测量, 但仍然具有一定的主观性、随意性, 导致测量结果的不准确^[2]。另外, 测量人员若长期处于烟度测量的恶劣环境之下, 身心健康也会受到严重的损害。为解决这些问题, 一些使用机器代替人工测量的方法相继被提出。例如, 一种基于光的吸收与散射的物理原理的方法, 设计了一种能够检测光的衰减率的光学烟度计, 借助光学测量的方法来实现烟度的测量^[3]。由于黑烟是由细小的黑色固体颗粒组成的, 因此使用光学烟度计时难免会有部分黑烟附着到装置上, 为保证测量的准确性, 需要时常进行清理, 影响检测的效率。又如, 一种使用烟气收集测量的方法, 通过专门设计的装置将排放的烟气收集起来, 令烟气通过滤纸, 再对被污染的滤纸进行分析, 根据滤纸被污染的情况确定烟度大小, 从而实现烟度的测量^[4-5]。然而, 被烟气所污染的滤纸无法重复使用, 每次检测过后必须进行更换, 测量繁琐, 维护成本高。英国的 G. A. Rhys-Tyler 等人于 2011 年的一项实验中将遥感检测技术应用到了对伦敦的五万辆车

收稿日期: 2018-09-18; 修回日期: 2018-10-29。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672155); 湖北省技术创新专项重大项目(2018AAA035); 湖北省自然科学基金杰出青年基金(2018CFA092)。

作者简介: 梁荆璞(1994-), 男, 湖北潜江人, 硕士研究生, 主要从事机器视觉、模式识别、过程控制、机械设备故障诊断与智能维护方向的研究。

文国军(1978-), 男, 四川广安人, 博士, 教授, 主要从事机器视觉、CAD/CAM、计算机仿真、虚拟现实、智能装备方向的研究。

辆进行了包含黑烟浓度指标的排放测试中^[6],近年国内也提出在公路上使用遥感技术测量的方法,要求在公路的上坡路段露天检测,该方法虽然不影响车辆正常的行进,但受到天气、场地、车速等的严重制约,检测不能随时进行,不适用于检测站内检测^[7]。有鉴于此,需要有一种适用于检测站的快速、高效、准确的在用柴油车烟度测量方法。

基于机器视觉的在用柴油车烟度测量方法,借助计算机进行高速的图像处理运算,使用 OpenCV 作为图像处理算法基础编写的 VC++ 应用程序,再配合简单的检测环境以及背景的布置,并进行实验验证。该方法在短时间内即可测量出在用柴油车的烟度级别,具有操作便捷、测量快速、结果准确等特点。

1 烟度测量方案

烟度测量的方案包括系统组成、原理、方法三部分内容。

1.1 烟度测量系统组成

在用柴油车烟度测量整体的系统组成包括硬件系统和软件系统两大部分。如图 1 所示,硬件系统包括图像采集、图像处理、背景布置等模块,图像采集模块主要为相机,由相机采集的图片传输到作为图像处理模块的计算机中进行图像处理,而背景布置模块用于为烟度测量提供洁净、明亮的背景。软件系统为使用 VC++ 编写的 MFC 应用程序,包括基本的图像处理、标定过程、测量过程等算法,图像处理的算法以 OpenCV 为基础,标定过程与实际的测量过程的算法构成整个软件的核心算法。

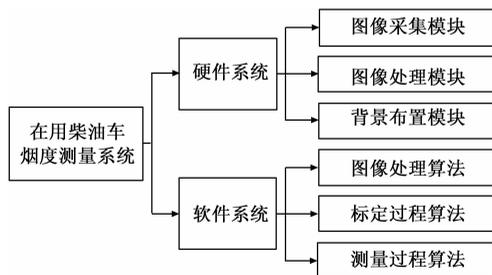


图 1 在用柴油车烟度测量系统组成

1.2 烟度测量原理

在用柴油车的烟度一般以林格曼黑度等级来表示。标准的林格曼黑度等级通过在白纸上或白板上以 140 mm × 210 mm 区域内印制的不同粗细的黑色网格线所占面积百分数来确定,如图 2 所示。按照黑色网格所占区域面积的百分数,从 0% (全白) 到 100% (全黑) 每隔 20% 设定一个等级,依次规定为林格曼黑度 0 级到 5 级^[8]。实际应用时,根据检测要求的不同,还可以进一步细化林格曼黑度等级的划分,或者直接以百分数来表示等级^[9]。但是,由于确定标准林格曼黑度等级的“全白”与“全黑”为理想的情况,因此在以图像处理为手段的实际检测中,可以采用减除背景再使用灰度的变化值进行换算的方法来得到林格曼黑度值。

1.3 烟度测量方法

首次进行烟度测量时需要执行标定操作。由于林格曼

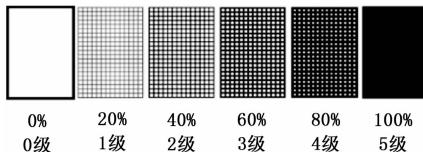


图 2 标准林格曼黑度图 (示意图)

黑度值与其实际的黑烟区域平均灰度值成正比,因此标定的目的在于得到林格曼黑度值 B 与图像识别所检测到林格曼标准图的灰度值 G 的线性关系:

$$G = a + kB \quad (1)$$

式中, a 为林格曼黑度等级 0 级在图片中的灰度, k 为林格曼黑度等级每增加 1 时灰度的变化值。标定的效果通过 G 与 B 的线性回归相关系数 r 来确定, r 的绝对值越接近 1, 说明标定的效果越好。若 r 的绝对值小于 0.95, 则需要重新进行标定。

实际测量过程需要利用标定过程得到的林格曼黑度等级 B 与黑烟区域平均灰度 G 的线性关系进行林格曼黑度的反算, 即:

$$B = \frac{1}{k}(G - a) \quad (2)$$

测量烟度需要在与标定过程相同的背景和光照条件下进行, 为了消除背景环境对烟度测量准确度的影响, 若背景或环境发生改变, 则应重新进行标定。在相机视野中能清楚地看到车辆排气管及其周围区域的情况下, 测量烟度首先需要取 1 张该次测量过程下车辆停在测功机上但尚未发动时无烟产生的图片作为背景, 然后命令车辆进行发动, 待车辆发动后, 以时间间隔 1 s 的频率连续采集 5 张照片并保存。

2 烟度测量系统设计

2.1 硬件设计

烟度测量硬件设计包括对图像采集、图像处理、背景布置等模块的选型与配置, 各模块的布置示例如图 3 所示。图像采集与处理模块位于车辆检测通道的一侧, 而标准林格曼黑度标定模块、背景改善装置等位于车辆检测通道的另一侧, 并令图像采集单元正对所述林格曼标准图标定与背景布置模块。图像采集模块需使用固定装置进行固定, 且图像采集模块、标准林格曼黑度标定模块、背景布置模块三者应当相对于周围的静物保持静止。布置完成之后, 需要操作人员接触的部分可通过控制室与检测现场进行物理隔离, 仅通过玻璃窗观察现场情况, 避免直接暴露在检测环境中。

图像采集模块 (相机) 与图像处理模块 (计算机) 既可集成在同一设备上, 也可分离式的两台设备。图像采集模块主要为相机, 由于烟度测量对于图像处理的精度要求并不高, 相机要求至少有 50 万以上的像素, 因此常见的以 USB 方式连接的相机或以 PCI 总线方式连接的相机即可满足检测要求, 亦可使用通过以太网连接的工业相机进行测量。由于图像处理模块使用了以 OpenCV 作为图像处理

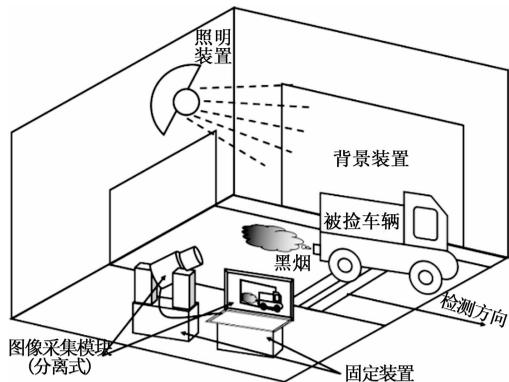


图 3 硬件系统各模块布置示例

的算法基础、在 Visual C++ 平台上开发的 MFC 应用程序，且图像采集模块上传的图片需要在程序内进行图像处理过程，因此图像处理模块所使用的计算机要求搭载能够运行使用 MFC 编写出的可执行程序的 Windows 操作系统。

背景布置模块包括人工布置的白板、标定用的印有标准林格曼黑度图的标定板、用于放置或调整设备位置与方向的固定装置、改善背景的照明装置等。由于自然光线的明暗变化对使用机器视觉方法的测量有影响，背景布置模块可以消除环境光线亮度变化对测量的影响，减少标定的次数。人工布置的白板用于现场环境污浊等不利于检测的环境下，提供洁净、明亮的白色背景。标准林格曼黑度标定模块包括印有 6 幅标准林格曼黑度等级系列图的标定板。为消除反光等不良影响，以及考虑耐用等性质，6 幅标准林格曼黑度等级系列图可使用表面较为粗糙的塑料板按林格曼黑度图的标准进行印制。固定装置包括可供稳定放置各设备的槽、架等可任意调整角度、高度、方向、位置等参数的结构，以及夹持标准的林格曼黑度等级标定板的结构。照明装置用于在环境光线昏暗时，提高所述图像采集单元采集范围内的环境亮度。

2.2 软件设计

烟度测量的软件设计主要包括图像处理过程、标定过程、实际测量过程三部分的设计，另外还有其他与烟度测量配套的辅助功能，包括车辆信息录入、测量报告输出等。所有程序在 Visual C++ 环境下编写，软件主要功能部分的流程如图 4 所示，软件界面如图 5 所示。

图像预处理包括对采集到的图像进行灰度化、滤波等操作。由图像采集模块采集到的图像一般为 RGB 三通道的彩色图像，图像中的每一像素点包含 R（红）、G（绿）、B（蓝）3 种颜色分量的亮度信息，通过颜色空间转换为一张灰度图像后，图像中的每一像素仅有灰度化的亮度信息，需要处理的图像数据减少，可缩短后续的图像处理时间。图像滤波用于将图像进行平滑处理，由于相机直接采集到的图片包含噪点，因此需要通过适当滤波的操作，消除图像的噪点使得图像平滑，而需要的细节特征又得到了保留。滤波采用高斯滤波的方法，并使用二维零均值高斯函数作为滤波器：

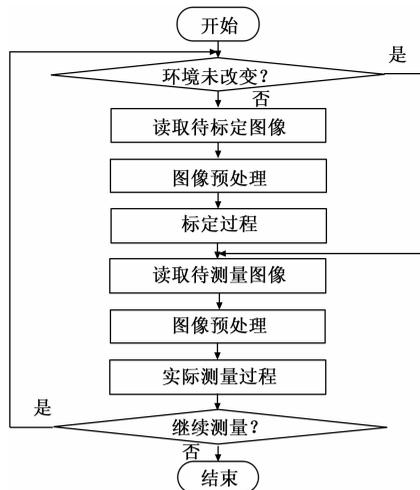


图 4 软件主要功能流程图



图 5 软件主界面

$$G_0(x, y) = A \exp \left[- \left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) \right] \quad (3)$$

滤波的单元采用 5×5 大小的正方形区域^[10]。无论是标定过程还是实际测量过程，都需要进行图像预处理，完成预处理的图片需要进行保存以供后续过程使用。

标定过程从单独的设置窗口启动，使用经过预处理的按等级递增顺序拍摄的 6 张标准林格曼黑度图，计算每一张图片上林格曼黑度图所在区域的灰度平均值。由于相机拥有曝光自动补偿功能，且采集标准林格曼图时，全白和全黑的图像最容易触发该功能，导致灰度发生变化，因此需要增加图像中背景所占的面积，消除相机曝光自动补偿功能对灰度平均值计算的影响。为保证每次标定过程中林格曼黑度图在整张图片上所占的位置一致，人为地在软件的标定界面上将标定图片以九宫格的形式均分为 9 个区域，并标出中心区域的边框，每次标定时使得林格曼标准图尽量占满边框内的区域，并保持图像采集设备与标定板的相对位置保持不变。标定操作完成后，程序将标定结果显示在列表中，并给出回归计算的相关系数用以判断标定结果是否合格，合格的条件为相关系数的绝对值大于或等于 0.95，标定结果不合格时，软件将提示用户重新执行标定操作。标定成功后回归方程以及相关系数存储在配置文件中。

实际测量过程使用经过预处理的车辆尚未发动时拍摄的背景图片以及车辆发动时相机每隔 1 s 拍摄的 5 张图片，

共 6 张图片。其中背景图片用于和后续车辆发动时的 5 张图片进行对比。由于黑烟出现的区域仅占一整张图片的一小部分, 因此需要将 6 张图片进行网格划分。网格划分需要尽可能地将黑烟集中在单个网格所在的区域中, 综合考虑实际检测的布置距离, 每一边的分割数在 5 到 9 格为宜。逐一使用背景在第 (i, j) 区域的平均灰度值 G_{0ij} 减去车辆发动时的 5 张图片在第 (i, j) 区域的平均灰度值 $G_{1ij} \sim G_{5ij}$, 得到背景与 5 张图片在第 (i, j) 区域的灰度差 $\Delta G_{1ij} \sim \Delta G_{5ij}$, 同时使用遍历算法, 按顺序逐一搜索其中的最大值作为最大灰度差 ΔG_{max} , 并确定出现该最大灰度差所在的图片对应区域的平均灰度值 G_m 。此时再读取保存在配置文件中的回归方程系数, 根据式 (2) 反算出林格曼黑度最大等级 B_{max} , 依照表 1 的判定方法得到烟度检测结果。

表 1 林格曼黑度等级判定方法

黑度最大等级 B_{max} 范围	判定为林格曼黑度 B
$B_{max} < 1$	0
$1 \leq B_{max} < 2$	1
$2 \leq B_{max} < 3$	2
$3 \leq B_{max} < 4$	3
$4 \leq B_{max} < 5$	4
$5 \leq B_{max}$	5

3 实验结果与分析

3.1 标定过程实验

为了验证 2.2 中提出的相机自动曝光补偿影响的问题, 在光线明亮、稳定环境下进行一次标定操作, 使用相机按等级递增的顺序依次采集 6 张标准的林格曼黑度图, 并使得图幅占满相机拍摄的视野, 此时平均灰度与中心区域灰度等效。在上述条件下得到的实验结果如表 2 所示。

表 2 未考虑相机自动曝光影响的标定实验结果

林格曼等级 B	0	1	2	3	4	5
平均灰度 G	141	133	130	130	128	159
回归方程	$G = 131.476B + 2.14286$ $r = 0.3401$					

根据表 1 的结果可以看出, 林格曼黑度等级与其对应的图像平均灰度线性关系十分不理想, 从 0~4 级的平均灰度呈现下降的趋势, 但纯黑的 5 级黑度所对应的图像平均灰度却比全白的 0 级还要高, 导致斜率为正, 且相关系数 r 仅有 0.34, 不具备线性关系。

经过观察, 造成这一现象的主要原因是相机的曝光补偿作用使得拍摄实际为深色的图片时, 相机的自动曝光补偿功能导致图片整体的亮度增大, 从而灰度值增大。虽然标准的林格曼黑度图使用了黑白相间的网格而不是灰度图片, 但对于林格曼黑度级别较高的图片, 相机仍然会对其进行曝光补偿。

按照 2.2 中所提出的九宫格形式区域划分方法进行标

定, 同样在光线明亮、稳定的环境下进行标定过程实验, 如图 6 所示, 按等级递增的顺序依次采集六张标准的林格曼黑度图进行标定。在该环境下, 标定的结果如表 3 及图 7 所示, 线性回归的相关系数 r 显示在列表中用于判断标定是否成功, 线性回归方程的系数存储在配置文件中供后续测量时调用。

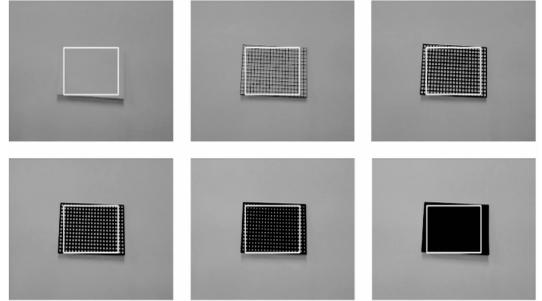


图 6 林格曼标准图的采集

表 3 按九宫格区域划分方法进行标定实验的结果

林格曼等级 B	0	1	2	3	4	5
平均灰度 G_{avg}	149	149	144	146	148	145
中心灰度 G	159	133	102	82	58	28
回归方程	$G = 157.952B - 25.7143$ $r = -0.9985$					

通过配置文件查看的回归方程表达式为:

$$G = 157.952 - 25.7143B \quad (4)$$

从表 3 以及图 7 中可以看到, 中心区域的灰度值呈线性递减的趋势, 相关系数绝对值 $|r|$ 为 0.9985, 线性关系良好, 符合标定要求。

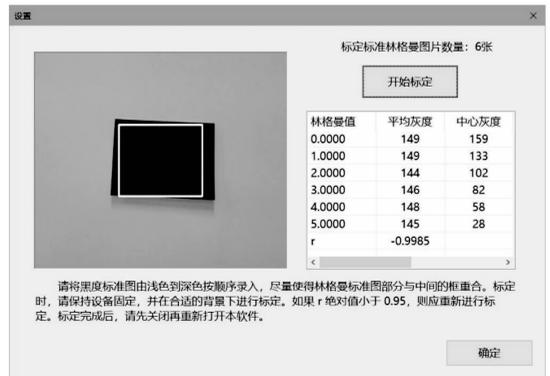


图 7 标定结果

3.2 实际测量过程实验

实际测量过程在与标定过程相同的环境条件下进行。验证林格曼黑度计算结果的方式为分别计算图片中背景区域的平均灰度值以及黑烟区域的平均灰度值, 将灰度差计算的结果代入回归方程表达式, 与测量到的结果进行比对。以如图 8 (a) 所示的图片为例, 根据 2.2 部分所设计的软件检测到的林格曼黑度等级为 3 级。