

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.05.016

# 一种基于高光谱激光雷达技术的涂改车牌识别方法

邵慧<sup>1,2\*</sup>, 马万里<sup>1</sup>, 曹铮<sup>1</sup>, 李伟<sup>3</sup>, 杨丽娟<sup>1</sup>, 肖晓<sup>1,4</sup>, 陈杰<sup>1,4</sup>

(1 安徽建筑大学电子与信息工程学院, 安徽 合肥 230601;  
2 南京邮电大学江苏省图像处理与图像通信重点实验室, 江苏 南京 210003;  
3 北京航空航天大学无人机学院, 北京 100191;  
4 安徽省古建筑智能感知与高维建模国际联合研究中心, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 利用高光谱激光雷达系统采集涂改车牌空间-光谱域信息, 根据车牌逆反射特性, 设计基于光谱特征的两次阈值法实现涂改车牌识别。首先计算光谱特征波长, 利用一次阈值法分离车牌部分和涂改部分; 其次, 计算特征波段内车牌部分各点的光谱反射率曲线的梯度值, 利用二次阈值法判别涂改类型(背景转字符涂改和字符转背景涂改); 最后, 根据涂改类型重建正确车牌字符, 将重建信息与二维平面数据融合得到正确的二维车牌图像, 送给车牌识别系统进行识别。实验结果表明该方法可实现多种涂改材料以及多种涂改类型的涂改车牌识别。

**关键词:** 遥感; 高光谱激光雷达; 反射率; 涂改车牌

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2023)05-00770-10

## A recognition method for altered license plate based on hyperspectral lidar technology

SHAO Hui<sup>1,2\*</sup>, MA Wanli<sup>1</sup>, CAO Zheng<sup>1</sup>, LI Wei<sup>3</sup>, YANG Lijuan<sup>1</sup>, XIAO Xiao<sup>1,4</sup>, CHEN Jie<sup>1,4</sup>

(1 School of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;  
2 Jiangsu Province Key Laboratory of Image Processing and Image Communication, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;  
3 Institute of Unmanned System, Beihang University, Beijing 100191, China;  
4 Anhui International Joint Research Center for Ancient Architecture Intellisencing and Multi-Dimensional Modeling, Hefei 230601, China)

**Abstract:** Using the spatial-spectral information of the altered license plates collected by hyperspectral lidar system, a twice-threshold method based on spectral feature is designed to recognize the altered license plates according to their retroreflection characteristics. Firstly, the characteristic wavelength of the spectra is selected, then the plate part and the altered material part are separated using the first threshold method according to the reflectance at the wavelength. Secondly, calculate the gradient value of the

**基金项目:** 安徽省自然科学基金面上项目 (2008085MF182), 江苏省图像处理与图像通信重点实验室开放课题 (2019-157), 安徽省高校省级自然科学基金研究项目 (KJ2021JD16)

**作者简介:** 邵慧 (1979 -), 女, 安徽长丰人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: shaohui@ahjzu.edu.cn。

**收稿日期:** 2021-12-01; **修改日期:** 2022-02-28

\*通信作者。

spectral reflectance curve at each point of the license plate part in the characteristic band, and the second threshold method is used to distinguish the alteration types, such as background to character alteration and character to background alteration. Finally, the correct license plate characters are reconstructed based on the type of the alteration, and the correct license plate image is reconstructed with the fusion of two-dimensional data and the corrected license plate characters, which is sent to the license plate recognition system. Experimental results show that this method can recognize altered license plates correctly regardless of different altered materials or different altered types.

**Key words:** remote sensing; hyperspectral lidar; reflectance; altered license plate

## 0 引言

车牌识别技术是获取和记录车辆信息的关键,也是智能交通系统的核心。常规的车牌识别是在良好光照条件下无异常的车牌图像识别,而光照不均、昼夜变化、车牌自身污损、油漆脱落等情况都会影响到车牌识别的准确性。若在蓄意涂改和遮挡等情况下,采集到的车牌图像是虚假数据源,识别会受到严重误导,无法正确获得车辆信息。因此,设计不受光照条件限制的、能自动辨别涂改车牌和消除涂改影响的车牌识别系统是必要的。

针对光照不均匀或照明光线不足的情况,人们主要采用三类方法消除影响,提升车牌识别的准确性。第一,利用图像空间域特征<sup>[1,2]</sup>及其变换域特征<sup>[3,4]</sup>;第二,利用机器学习方法设计鲁棒性强的车牌识别方法和系统<sup>[5-8]</sup>;第三,通过外界光源补偿的方式,增加可见光<sup>[9,10]</sup>或非可见光补偿<sup>[11-13]</sup>的方式获得理想的车牌图像。

针对遮挡和涂改状况下的车牌识别,人们利用获取的车牌图像信息本身提升识别的准确度,包括通过模糊C均值算法<sup>[14]</sup>、建立新的模板匹配库<sup>[15]</sup>,以及卷积神经网络<sup>[16,17]</sup>等方法实现污损和遮挡车牌的识别。Zhu等<sup>[18]</sup>将RFID标签增加到常规车牌中达到污损和遮挡图像识别目的。肖晓<sup>[19]</sup>采用主动光偏振成像系统获取涂改车牌偏振图像,利用车牌逆反射特性,以准确识别涂改车牌。杨星等<sup>[20,21]</sup>根据逆反射特性,利用可见光和近红外成像差异实现涂改车牌识别。可见,利用车牌的逆反射特性是实现涂改车牌判别和识别的有效途径。

高光谱激光雷达(HSL)是一种主动光电探测方式,无需外界光源,能高效获取目标三维信息与光谱信息<sup>[22,23]</sup>。本文利用高光谱激光雷达采集目标车牌的空间与光谱信息,根据车牌逆反射特性,设计一种基于光谱特征的两次阈值分离方法实现车牌部分和涂改类型分离,根据涂改类型实现正确车牌字符的重建,将重建的正确字符信息与二维车牌平面数据融合,得到矫正后的二维车牌图像,作为车牌识别系统输入图像,实现不受外界光照环境影响的涂改车牌识别。

## 1 实验装置与数据采集

### 1.1 高光谱激光雷达

实验使用安徽省古建筑智能感知与高维建模国际联合研究中心已搭建的101通道的基于声光可调谐滤波器(AOTF)的高光谱激光雷达,其光谱范围为550~1050 nm。HSL是一种主动探测手段,利用超连续的激光光源发射激光并探测回波信号,同时获取被测目标的光谱信息和空间信息。HSL主要包括发射单元、接收单元、探测单元和扫描单元等组成部分,如图1所示。发射单元主要由超连续谱激光器和AOTF组成,完成可见光—近红外波段连续激光信号的发射,激光发射信号经光纤耦合到准直器,再经透反射镜将不同波长的激光信号发射出去;接收单元主要由大口径卡塞格伦型望远系统组成,保证激光回波信号汇聚到探测器上;

探测单元采用高速雪崩光电二极管(APD)作为激光主波和回波接收探测器,减少发射激光与回波信号的干扰,选择收发双置共轴系统方案来设计激光雷达系统,由高速采集卡实现全波形信息高速采样,保证快速获取多个光谱通道的数据。将APD探测器和望远镜系统置于方位俯仰两轴转台,通过控制水平与俯仰角度,按照Z字扫描顺序实现对目标的水平和垂直方向扫描,结合激光距离探测,获得观测目标的三维空间坐标信息。

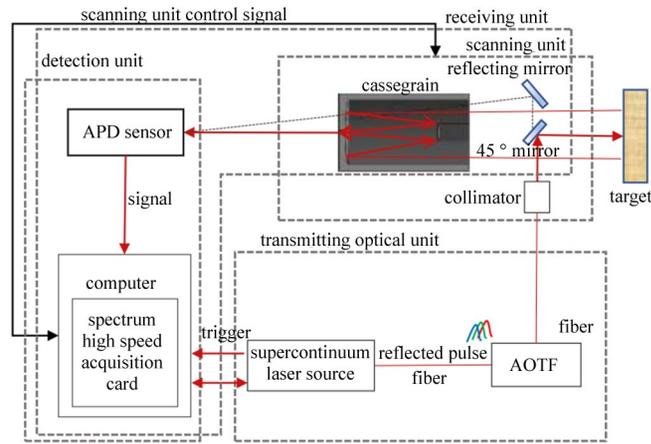


图1 高光谱激光雷达示意图

Fig. 1 Schematic setup of HSL

## 1.2 数据采集和预处理

### 1.2.1 空间-光谱信号获取

高光谱激光雷达发射激光脉冲信号,扫描探测目标信号,APD探测器采集主波和回波信号。通过APD的光电转换功能,将接收到的激光信号转换为电压信号,其幅值与入射光功率成正比,高速采集卡记录电压值信号。图2为采集卡记录的HSL主波和回波信号波形。选择720 nm作为测试波段,激光垂直照射在车牌背景上(本研究以蓝色车牌为例)。图中横坐标代表量化时间,量化间隔为0.2 ns;纵坐标为量化后的电压强度值,采用8比特量化,量化间隔为3.9 mV。通过主波和回波时间间隔可以计算HSL和目标的距离,提取回波电压峰值用于进一步计算和处理。

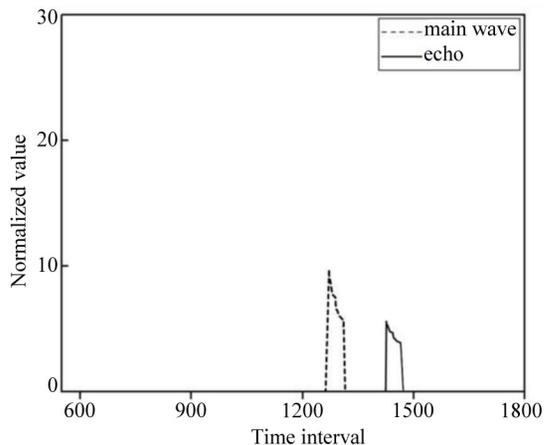


图2 HSL主波和回波信号波形关系图(波长720 nm)

Fig. 2 HSL main wave and echo waveform (wavelength 720 nm)

### 1.2.2 反射率计算

为了获得车牌光谱反射率,首先将标准漫反射参照白板(99%)和车牌置于相同位置,分别扫描并记录两者的空间和全波形信息。激光雷达回波能量与其照射的目标物反射率存在比例关系<sup>[24]</sup>,通过两者回波信号计算光谱反射率。为了简化运算,本文仅考虑HSL垂直照射目标的情况。

记录参照白板与探测目标的回波信号,提取两者回波信号峰值,计算目标物反射率

$$\rho(\lambda_i) = \frac{V_p(\lambda_i)}{V_r(\lambda_i)} \rho_r(\lambda_i), \quad (1)$$

式中: $i$ 为HSL通道的序号,取值范围为 $[1, M]$ , $V_p(\lambda_i)$ 为车牌目标回波信号电压峰值, $V_r(\lambda_i)$ 为参照白板回波信号电压峰值, $\rho_r(\lambda_i)$ 为参照白板反射率。

## 2 基于HSL涂改车牌的识别方法

### 2.1 不同材料光谱特征分析

测试样本为蓝色车牌和常见的涂改材料,如图3(a)所示:①为白色双面胶;②为蓝色卡纸;③为涂改液;④为白色卡纸;⑤为车牌字符部分;⑥为蓝色车牌背景。在实验室环境下,先将参照白板置于距离HSL五米的位置,获取并记录参照白板的回波信息。在相同位置采集蓝色车牌和涂改材料的回波信息。利用(1)式,计算不同材料的光谱反射率,为了简化运算,选取波长范围为650~850 nm。

由图3(b)可以看出,车牌底色、车牌字符为逆反射材料,但两者光谱上存在较大差异,且不同波段光谱反射率分布不同。车牌字符为白色,650~850 nm范围内反射率均大于200%;蓝色车牌底色在650~725 nm范围内反射率波动均较大,超过745 nm时反射率大于200%;蓝色卡纸反射率小于100%,随着波长增加而增加,在725~785 nm范围内呈明显的上升趋势;而涂改液、白色双面胶和白色卡纸的反射率在整个光谱范围内分布较为稳定,无明显波动。

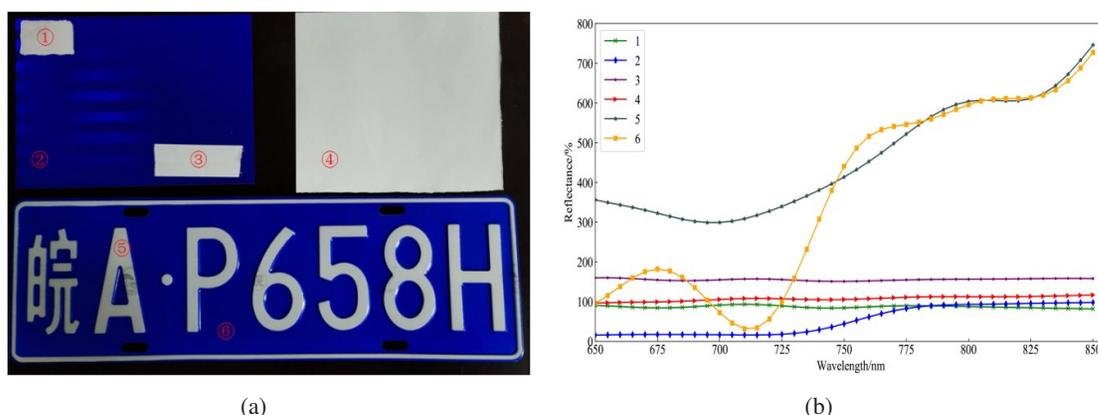


图3 车牌和涂改材料及其光谱反射率。(a) 车牌和涂改材料;(b) 光谱反射率分布

Fig. 3 License plate and altered materials and their reflectance. (a) License plate and altered materials;

(b) The distribution of reflectance

### 2.2 基于HSL两次阈值涂改车牌的识别方法

在上述分析基础上,以蓝色车牌为例,利用其光谱特征,设计了基于HSL的两次阈值涂改车牌识别方法,框图如图4所示。

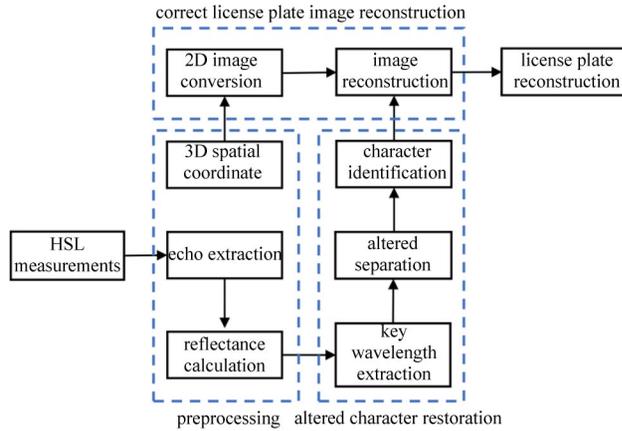


图4 基于HSL的两次阈值涂改车牌识别方法框图

Fig.4 Schematic diagram of the altered license plate recognition method based on hyperspectral LiDAR technology

2.2.1 预处理

在相同的实验条件下采集车牌和参照白板的三维坐标数据和连续激光波长下的回波信号,利用解算软件完成空间坐标的计算;提取车牌和参照板的回波峰值信号,并利用(1)式完成光谱反射率计算,得到包含三维空间坐标和连续光谱反射率信息的车牌点云数据。

2.2.2 涂改车牌复原

涂改车牌复原中最重要的步骤是完成车牌和涂改材料部分的分离和判别。车牌组成部分(车牌字符和背景)为逆反射材料,光谱反射率远远大于常规的涂改材料。选取41个通道中所有光谱反射率,计算车牌字符和背景反射率的第一个交点,交点波长作为特征波长 $\lambda_k$ 。设计两次阈值分离方法实现车牌不同部分的分离和涂改类型判别,实现具体流程如图5所示。

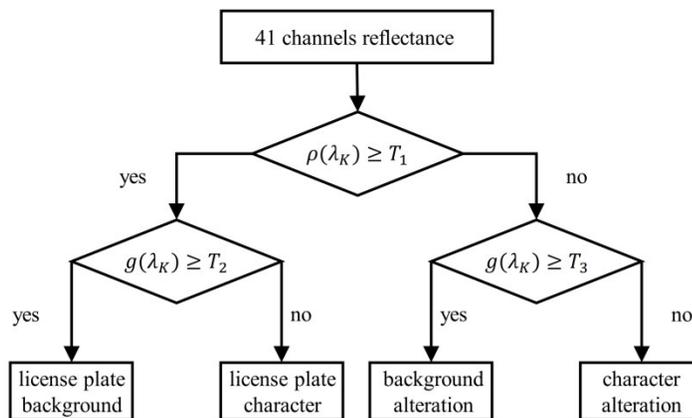


图5 两次阈值法流程图

Fig. 5 The flow chart of twice threshold method

计算特征波长 $\lambda_k$ 处的不同扫描点光谱反射率,与给定阈值 $T_1$ 比较,如果 $\lambda_k$ 处的反射率值 $\rho(\lambda_k)$ 大于等于 $T_1$ ,则判断该点属于车牌部分,否则,该点属于涂改部分。

根据特征波长 $\lambda_k$ ,确定特征波段 $(\lambda_k-40, \lambda_k)$ ,特征波段内车牌部分各点的光谱反射率曲线的梯度值为

$$g(\lambda_k) = \frac{\rho(\lambda_k) - \rho(\lambda_k - 40)}{40} \quad (2)$$

若已判断某点为车牌部分, 比较  $g(\lambda_k)$  和经验阈值  $T_2$  的大小, 如果  $g(\lambda_k)$  大于等于  $T_2$ , 判断该点属于车牌蓝色背景部分; 否则为白色字符。若已判断某点为涂改部分, 比较  $g(\lambda_k)$  和经验阈值  $T_3$  的大小, 如果  $g(\lambda_k)$  大于等于  $T_3$ , 判断该点属于车牌字符转背景涂改; 否则为背景转字符涂改。根据涂改类型判别结果, 完成车牌部分和涂改部分的扫描点分离。

在车牌涂改类型判断的基础上, 进行正确车牌信息复原。如果为背景转字符涂改, 重建车牌字符时去除此部分信息; 如果为车牌字符转背景涂改, 重建车牌字符时将此涂改补偿到字符上。

### 2.2.3 图像重建与车牌识别

根据 HSL 采集的三维空间坐标信息, 暂不考虑距离信息, 仅保留二维成像平面信息, 将正确补偿字符融合到二维平面上, 重建正确车牌图像, 将重建图像送给车牌识别系统, 完成车牌识别。

## 3 实验结果与分析

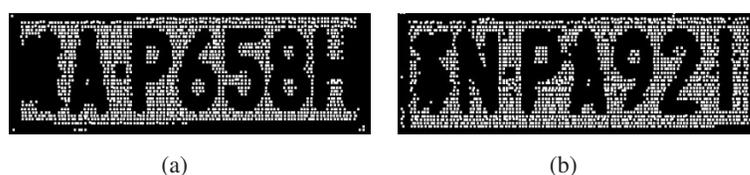
为了测试提出的方法对涂改车牌的识别效果, 采用白色卡纸、蓝色卡纸、双面胶和修正液作为涂改材料涂改原始车牌字符, 形成普通车牌识别系统无法识别的车牌, 即涂改车牌。图 6(a) 为原始蓝色车牌, 车牌字符为“皖 AP658H”的汽车牌照, 图 6(b) 为“苏 NRA921”的原始蓝色车牌; 图 6(c) 为图 6(a) 中的字母 P 用白色卡纸添加一部分变成 R, 得到涂改车牌“皖 AR658H”。图 6(d) 为图 6(b) 中的字母 R 用蓝色卡纸遮挡一部分, 变成字母 P, 得到涂改车牌“苏 NPA921”。



图 6 原始和涂改后车牌。(a) 原始车牌 1; (b) 原始车牌 2; (c) 涂改车牌 1; (d) 涂改车牌 2

Fig. 6 Original and altered license plate. (a) Original license plate1; (b) Original license plate2; (c) Altered license plate1; (d) Altered license plate2

计算车牌字符和背景光谱反射率第一个交点对应的波段作为特征波长 745 nm, 经过多次测试最终确定经验阈值  $T_1$  为 350%, 进行车牌和涂改材料部分分离。图 7 为车牌和涂改部分分离效果图, 图 7(a) 和 (b) 为分离后的车牌部分, 图 7(c) 和 (d) 为分离后的涂改部分。



(a)

(b)



图7 车牌和涂改部分分离。(a) 车牌部分1; (b) 车牌部分2; (c) 涂改部分1; (d) 涂改部分2

Fig. 7 License plate and altered material separation. (a) License plate part 1; (b) License plate part 2; (c) Altered part 1; (d) Altered part 2

根据车牌涂改方式判别方法, 经验阈值  $T_2$  和  $T_3$  分别选择为 8 和 0.65, 判定类型是背景转车牌字符涂改还是车牌字符转背景涂改。将结果融合到分割后的字符上, 实现正确车牌数据重建。提取点云的车牌平面二维数据, 重建正确车牌的二值图像, 结果如图 8 所示。

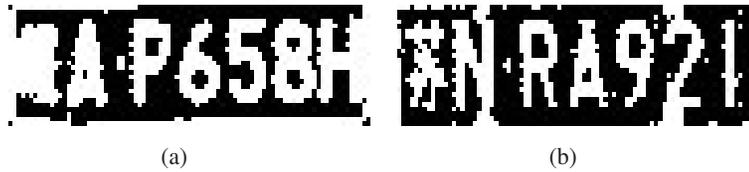


图8 重建车牌图像。(a) 图6(c)的重建图像; (b) 图6(d)的重建图像

Fig. 8 Reconstructed license plate image. (a) Reconstructed image of Fig. 6(c); (b) Reconstructed image of Fig. 6(d)

将重建图像送给车牌识别系统, 识别结果如图 9 所示。图 9(a) 为图 6(c) 车牌识别结果, 输出为"皖 AP658H", 与图 6(a) 原始车牌号码一致。图 9(b) 为图 6(d) 车牌识别结果, 输出为"苏 NRA921", 与图 6(b) 原始车牌号码一致。

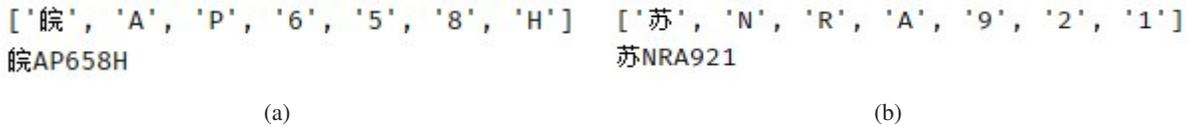


图9 车牌识别结果。(a) 图6(c)的识别结果; (b) 图6(d)的识别结果

Fig. 9 Result of license plate recognition. (a) Recognition result of Fig. 6(c); (b) Recognition result of Fig. 6(d)

为了进一步验证不同涂改材料的识别效果, 采用双面胶作为涂改材料, 涂改车牌识别过程如图 10 所示。将原始车牌"苏 N681Q5"涂改为"苏 N68TQ5"。对涂改后的车牌进行车牌部分和涂改部分分离, 判断修改类型为背景转字符, 将涂改部分去除, 得到正确车牌字符重建, 输出正确的二值车牌图像。



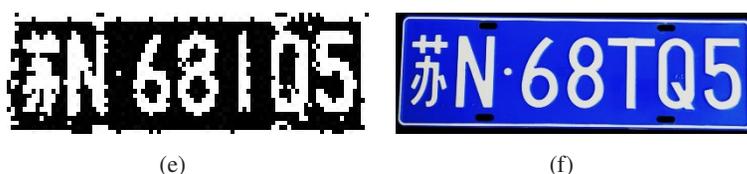


图 10 涂改车牌识别过程。(a) 原始车牌;(b) 涂改车牌;(c) 车牌部分;(d) 涂改部分;(e) 重建车牌图像;(f) 识别结果

Fig. 10 Result of license plate recognition. (a) Original license plate; (b) Altered license plate; (c) License plate part; (d) Altered part; (e) Reconstructed image; (f) Recognition result

图 11 为同时存在两种涂改类型的识别过程, 分别采用修正液和蓝色卡纸两种材料, 将"苏 N681Q5"涂改为"苏 N68T05", 其中采用修正液将 1 涂改成 T, 采用蓝色卡纸将 Q 遮挡为 0; 根据两次阈值法可判别涂改类型分别为背景转字符涂改和字符转背景涂改, 根据涂改类型复原车牌为"N681Q5", 得到正确识别结果。

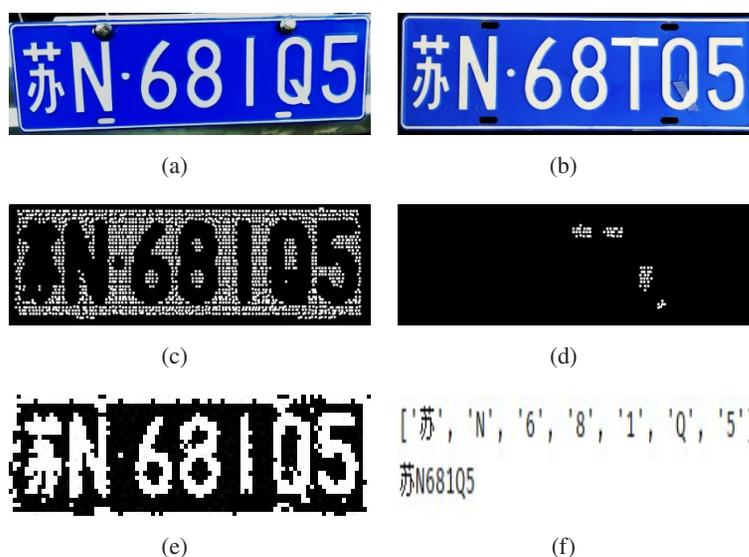


图 11 涂改车牌识别过程。(a) 原始车牌;(b) 涂改车牌;(c) 车牌部分;(d) 涂改部分;(e) 重建车牌图像;(f) 识别结果

Fig. 11 Result of license plate recognition. (a) Original license plate; (b) Altered license plate; (c) License plate part; (d) Altered part; (e) Reconstructed image; (f) Recognition result

从上面实验结果可以看出, 提出的方法能较好地完成涂改车牌识别。根据车牌背景和字符的光谱特征选择一个特征波长, 另选一个特征波长, 仅需两个波长即可实现涂改车牌和涂改材料分离, 达到准确识别目的。可见, 利用双波长激光雷达即可实现相关功能, 大大简化设备。

## 4 结 论

设计了基于光谱特征的两次阈值法实现涂改车牌识别, 实验证明该方法可以实现多种涂改类型和多种涂改材料的涂改车牌的正确识别。通过高光谱激光雷达系统获取空间-光谱数据信息, 不受外界光照的影响, 满足光照条件受限环境下车牌信息获取的需求。另外基于高光谱激光雷达原型机进行涂改车牌识别实验表明选择合适的两个波长可以完成涂改车牌的识别, 后续工作将设计紧凑的双波长激光雷达识别车牌系统, 提高系统的轻型化和实用性。

## 参考文献:

- [1] Wo Y, Zhang B. License plate binarization method based on fuzzy classification [C]. *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. Tianjin, China. *IEEE*, 2013: 194-198.
- [2] Asif M R, Qi C, Wang T X, *et al.* License plate detection for multi-national vehicles: An illumination invariant approach in multi-lane environment [J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2019, 78: 132-147.
- [3] Yu S Y, Li B P, Zhang Q, *et al.* A novel license plate location method based on wavelet transform and EMD analysis [J]. *Pattern Recognition*, 2015, 48(1): 114-125.
- [4] Mokayed H, Shivakumara P, Woon H H, *et al.* A new DCT-PCM method for license plate number detection in drone images [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2021, 148(9): 45-53.
- [5] Zou Y J, Zhang Y J, Yan J, *et al.* A robust license plate recognition model based on Bi-LSTM [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 211630-211641.
- [6] Wang J L, Huang H, Qian X S, *et al.* Sequence recognition of Chinese license plates [J]. *Neurocomputing*, 2018, 317: 149-158.
- [7] Wang D, Tian Y M, Geng W H, *et al.* LPR-Net: Recognizing Chinese license plate in complex environments [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2020, 130: 148-156.
- [8] Selmi Z, Halima M B, Pal U, *et al.* DELP-DAR system for license plate detection and recognition [J]. *Pattern Recognition Letters*. 2020, 129: 213-223.
- [9] Tatewaki Y, Takahashi T, Tanaka Y, *et al.* *Illumination device for license plate* [P]. US: 7163322B2, 2007-01-16.
- [10] Frisch R T, Prollius S, Reimann S R, *et al.* *License plate for back illumination and method for making same* [P]. US: 20070031641A1, 2007-02-08.
- [11] Chen Y T, Chuang J H, Teng W C, *et al.* Robust license plate detection in nighttime scenes using multiple intensity IR-illuminator [C]. *International Symposium on Industrial Electronics*. Hangzhou, China. *IEEE* 2012: 893-898.
- [12] Makarov A, Lukić V, Choubey B. Real-time vehicle speed estimation based on license plate tracking in monocular video sequences [J]. *Sensors & Transducers*, 2016, 197(2): 78-86.
- [13] Wada T, Shikiji Y, Watari K, *et al.* Novel vehicle information acquisition method using 2D reflector code for automotive infrared laser radar [J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences*, 2015, E98A: (1): 294-303.
- [14] Pu Y W, Liu W J, Jiang W T. Identification of vehicle with block license plate based on PSO-IFCM [J]. *Computer Engineering*, 2012, 38(14): 157-160, 164.  
浦雅雯, 刘万军, 姜文涛. 基于 PSO-IFCM 的遮挡车牌车辆识别 [J]. *计算机工程*, 2012, 38(14): 157-160, 164.
- [15] Xiao X, Chen J, Shao H, *et al.* A license plate fragmentary character recognition based on secondary template library [J]. *Journal of Anhui Jianzhu University*, 2017, 25(4): 33-37.  
肖晓, 陈杰, 邵慧, 等. 基于二次模板库的车牌残缺字符识别 [J]. *安徽建筑大学学报*, 2017, 25(4): 33-37.
- [16] Li L, Zhao K Y, Zhao X Y, *et al.* Contaminated and shielded number plate recognition based on convolutional neural network [J]. *Computer Science*, 2020, 47(Suppl. 6A): 213-219.  
李林, 赵凯月, 赵晓永, 等. 基于卷积神经网络的污损遮挡号牌分类 [J]. *计算机科学*, 2020, 47(增刊6A): 213-219.
- [17] Liu J Y, Liu D E, Yang P, *et al.* License plate recognition with partial occlusion based on CNN [J]. *Measurement & Control Technology*, 2021, 40(2): 53-57, 63.  
刘靖钰, 刘德儿, 杨鹏, 等. 基于 CNN 网络的带遮挡车牌识别 [J]. *测控技术*, 2021, 40(2): 53-57, 63.
- [18] Zhu Z, Yu X L, Zhang X Z, *et al.* Restoration of defective license plate information based on vehicle electronic identification information [C]. *5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference*. Chongqing, China. *IEEE*, 2020: 141-144.
- [19] Xiao X. *Study on Altered License Plate Recognition Method* [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2018.  
肖晓. 涂改车牌识别方法研究 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2018.

- [20] Yang X, Tong W Q, Wang Q D. Recognition algorithm for falsified license plate based on near infrared image matching-segmentation [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(9): 945-947.  
杨 星, 同武勤, 王其东. 基于近红外图像匹配分割的涂改车牌识别算法 [J]. *激光与红外*, 2008, 38(09): 945-947.
- [21] Yang X, Ling Y S, Hao X L, et al. Anti-alteration technology for license plate recognition system [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 211-212: 156-160.
- [22] Shao H, Chen Y W, Yang Z R, et al. A 91-channel hyperspectral liDAR for coal/rock classification [J]. *IEEE Geoscience and remote Sensing Letters*, 2020, 76(6): 1052-1056.
- [23] Shao H, Chen Y W, Yang Z R, et al. Feasibility study on Hyperspectral liDAR for ancient Huizhou-style architecture preservation [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 88.
- [24] Wagner W, Ullrich A, Ducic V, et al. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 60(2): 100-112.