

激光与光电子学进展

基于偏振信息的车窗透反混叠图像解耦研究

周俊焯^{1,2}, 陈明麟², 封入琦^{1,2}, 纵园^{1,2}, 郝佳^{1,2}, 虞益挺^{1,2*}¹西北工业大学宁波研究院, 深圳研究院, 机电学院, 陕西 西安 710072;²西北工业大学空天微纳系统教育部重点实验室, 陕西省微纳机电系统重点实验室, 陕西 西安 710072

摘要 随着智慧城市、智慧交通和天网工程的不断发展,复杂城市环境下的车窗透反混叠图像解耦技术成为当前研究的热点,在卡口登记、安全驾驶、逃犯追踪和军事反恐等领域需求迫切。为克服传统成像技术依赖光强信息、易受环境干扰等劣势,基于偏振成像技术建立玻璃透反光传输模型,提出车窗透射信息光和反射干扰光的解耦分离方法,面向室内模拟场景和户外真实场景开展实验研究。结果表明:室内场景下车模型和客车模型消反图像的信息熵较原始强度图像分别提升 14.3% 和 9.8%;室外场景真实车辆消反图像因消除包含大量环境信息的反射光成分而使信息熵较原始强度图像下降 2.7%;这几类场景消反图像的区域对比度相较原始强度图像分别提升 40.1%、117.5%、237.8%。此外,研究图像消反质量与模型几何因素的相关关系,所得结论能对相机摆放高度和车辆停止线划线位置起到指导作用。

关键词 偏振成像; 智慧交通; 反光干扰; 混叠解耦; 机器视觉

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222643

Decoupling of Transmission and Reflection of Overlapping Images of Car Windows Based on Polarization Information

Zhou Junzhuo^{1,2}, Chen Minglin², Feng Ruqi^{1,2}, Zong Yuan^{1,2}, Hao Jia^{1,2}, Yu Yiting^{1,2*}

¹Ningbo Institute of Northwestern Polytechnical University, Research & Development Institute of Northwestern Polytechnical University in Shenzhen, School of Mechatronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

²Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace (Ministry of Education), Key Laboratory of Micro- and Nano-Electro-Mechanical Systems of Shaanxi Province, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China

Abstract Owing to the development of smart cities, intelligent transportation, and the Skynet project, increased attention is being paid to the decoupling technology used in the transmission and reflection of the overlapping images of car windows, which is essential for checkpoint registration, driver monitoring, fugitive trailing, and military counter-terrorism. In this study, a light transmission and reflection model based on polarization imaging technology is established and a decoupling method for transmitting and reflecting light from car windows is proposed to overcome the drawbacks of traditional imaging technology such as the reliance on intensity information and susceptibility to disturbance. The results conducted under the simulated indoor and realistic outdoor scenes show that the image information entropies of the de-reflected images of a saloon car and passenger car model are 14.3% and 9.8% higher than those of the original intensity images, respectively. Moreover, the image information entropy of the de-reflected image of a real vehicle is 2.7% lower than that of the original intensity image because the reflection contains a large quantity of environmental information. Additionally, the region contrast of these de-reflected images is improved by 40.1%, 117.5%, and 237.8%, respectively, compared with those of the original intensity images. Therefore, the relationship between the decoupling quality of the overlapping image and geometric factors of the model is studied, and a conclusion aimed at providing a reference for the installment height of the camera and position of the vehicle stop line is provided.

Key words polarization imaging; intelligent transportation; reflection disturbance; decoupling of overlapping images; machine vision

收稿日期: 2022-09-27; 修回日期: 2022-10-20; 录用日期: 2022-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(51975483)、陕西省重点研发计划(2020ZDLGY01-03)、深圳市虚大自由探索项目(2021Sz-vup112)、深圳市虚拟实验室建设项目(YFJGJS1.0)、宁波市自然科学基金(202003N4033)

通信作者: *yyt@nwpu.edu.cn

1 引言

智慧交通系统利用传感技术、电子信息技术、数据传输技术等新兴技术,实现对交通运输领域的便捷化、自动化、智能化管理。随着机动车保有量的激增和交通治安问题的日益严重,实现对道路车辆的精准监控成为智慧交通系统的必要环节。然而,当前道路监控系统通常采用光强成像技术,难以解决车辆前风窗玻璃对环境光镜面反射导致的车内目标遮掩问题,致使成像目标关键信息缺失,对智慧交通系统信息化管理造成严重阻碍,因此复杂城市环境下的车窗透反混叠图像解耦技术成为智慧交通领域研究的热点^[1]。

近年来,透反混叠图像解耦根据输入图像的数量可以分为单图像方法和多图像方法^[2]。单图像方法需要依赖于一些前提假设^[3],例如反射图像处于离焦状态^[4-5],或其存在鬼影现象^[6],但这些前提假设的合理性仍有待验证,且单图像有限的信息量使图像最终的解耦效果不尽如人意。多图像方法则通常改变相机采集位置^[7-8]、使用闪光和非闪光图像组^[9-11]、使用聚焦和离焦图像组^[12]进行图像消反,这些方法相较于单图像方法能取得更好的解耦效果,但在实际交通场景中的可操作性不强。基于偏振信息的透反混叠图像解耦技术需要采集不同偏振方向的场景图像,实质上属于多图像方法,但其因无需变换相机位置、无需添加外部光源、无需调整系统焦距,受到广大研究者的青睐^[13-17]。

作为一种新型光电探测技术,偏振成像具有“强光弱化”特性^[18],能很好抑制镜面反射光^[19],在透明物体的反射光分离应用领域展现出巨大潜力。2018年,英伟达的 Wieschollek 等^[20]提出利用光偏振信息和残余表征的深度学习解决方案,以分离反射图像和透射图像,其设计的图像数据生成器能准确复现实场景中的非理想模型,包括曲面和非规则表面、非静态和高动态范围场景等。2020年,香港科技大学的 Lei 等^[21]解决由于玻璃折射引起的真实图像和实验图像失配问题,并基于偏振信息提出反射图像估计网络和透射图像估计网络级联的深度学习模型,创新性地感知归一化互相关(PNCC)作为损失函数,从而提升图像的消反质量;该团队分别在不使用偏振信息、无级联网络和不采用 PNCC 作为损失函数的条件下进行实验,结果表明:不使用偏振信息对消反图像质量影响最大。2021年,国防科技大学张景华等^[22]针对光滑透明物体表面,根据相机成像原理求解各像素点处的入射光线信息,结合表面法向量计算观测天顶角,通过互相关值最小化法推导出反射光偏振度和透射光偏振度的空域变化规律,从而实现反射图像和透射图像的解耦分离。2022年,中国科学院自动化研究所 Pang 等^[23]设计基于逐步偏振的反射分离神经网络架构,该架构由估计背景图像的粗略预测模块和恢复实际图像的精细重构模块组成,其峰值信噪比指标在“Real20”“SIR²”“Nature”

数据集上较其他算法具有更优异的表现。

尽管目前已有透明物体反射光分离的相关研究,然而很少有研究注意到智慧交通领域对车窗消反的重大应用需求;互信息最小化方法^[16,22]对透明物体反射图像和透射图像的解耦分离需要搜索参数空间,不适用于实时性要求较高的道路车辆监控领域,而深度学习方法^[20-21,23]由于难以获取大量真实场景图像训练模型,其通常在人工合成图像上性能表现良好,而对真实反光干扰图像分离效果不佳;此外,先前工作尚未对图像解耦质量的观测几何因素开展研究,因此也就无法从几何布置的角度提高图像解耦质量。针对上述研究的不足,本文基于偏振信息提出车窗透射信息光和反射干扰光的解耦分离模型,创新性地根据实际交通场景对目标表面观测天顶角作出估计;面向室内模拟场景和户外真实场景开展成像实验,从而验证所提方法的有效性;研究车窗消反质量和相机与车辆相对高度、水平距离的相关关系,并对相机摆放高度和车辆停止线划线位置提出量化要求,助力我国智慧城市、智能交通和天网工程的发展。

2 透反混叠图像解耦模型

2.1 相机探测光信号的组成及分解

传统道路监控相机对车窗前挡风玻璃进行成像时,捕捉到的图像除了包含目标信息的实像,还混叠由玻璃表面反射引起的虚像,导致关键目标信息被模糊掩盖。如图 1 所示,相机探测到的光信号包含目标穿过车窗玻璃形成的透射信息光 I_T ,以及车窗表面镜反射环境光造成的反射干扰光 I_R ,其中 P_T 为透射光源, P_R 为反射光源。透射信息光和反射干扰光实际上为两个相互独立的光强分量,单独从强度维度上难以对两种光成分进行解耦分离;而玻璃表面反射光成分和透射光成分的偏振态存在较大差异,利用偏振相机捕获的场景偏振信息则可作为光成分解耦的另一个维度。

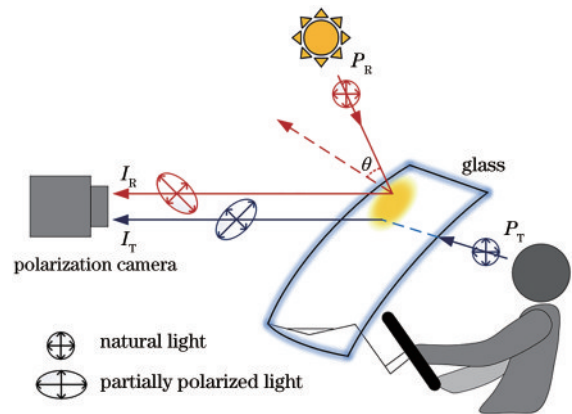


图 1 相机探测光信号的组成

Fig. 1 Components of optical signal accepted by a polarization camera

基于偏振正交分解定理,可得透明物体表面 I_T 和 I_R 的表示成分,具体推导过程可参考文献^[22]:

$$I_T(i, j) = \frac{[1 + \rho_R(i, j)] \cdot I^{\parallel}(i, j) - [1 - \rho_R(i, j)] \cdot I^{\perp}(i, j)}{\rho_R(i, j) + \rho_T(i, j)},$$

$$I_R(i, j) = \frac{[1 + \rho_T(i, j)] \cdot I^{\perp}(i, j) - [1 - \rho_T(i, j)] \cdot I^{\parallel}(i, j)}{\rho_R(i, j) + \rho_T(i, j)},$$

(1)

式中： ρ_R 为反射光偏振度； ρ_T 为透射光偏振度； I^{\parallel} 为平行方向光强分量； I^{\perp} 为垂直方向光强分量； (i, j) 为像素点的坐标位置，此处垂直方向和平行方向是指相对于入射面的方向。

2.2 垂直方向和水平方向光强分量的求解

根据偏振光的表达形式，偏振光在不同起偏角下的光强^[16]为

$$I_k(i, j) = \frac{I^{\perp}(i, j) + I^{\parallel}(i, j)}{2} + \frac{I^{\perp}(i, j) - I^{\parallel}(i, j)}{2} \cos 2[\phi_k(i, j) - \phi_{\perp}(i, j)],$$

(2)

式中： ϕ_k 为起偏角($k=0, 45, 90$)； ϕ_{\perp} 为垂直入射面方向对应的起偏角。

分别将 (I_0, ϕ_0) 、 (I_{45}, ϕ_{45}) 和 (I_{90}, ϕ_{90}) 代入式(2)，其中 $\phi_{45} = \phi_0 + 45^\circ$ 、 $\phi_{90} = \phi_0 + 90^\circ$ ，则可求得垂直方向和水平方向光强分量：

$$\phi_0 - \phi_{\perp}(i, j) = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{I_0(i, j) + I_{90}(i, j) - 2I_{45}(i, j)}{I_0(i, j) - I_{90}(i, j)} \right],$$

$$I^{\perp}(i, j) = \frac{I_0(i, j) + I_{90}(i, j)}{2} + \frac{I_0(i, j) - I_{90}(i, j)}{2 \cos 2[\phi_0 - \phi_{\perp}(i, j)]},$$

$$I^{\parallel}(i, j) = \frac{I_0(i, j) + I_{90}(i, j)}{2} - \frac{I_0(i, j) - I_{90}(i, j)}{2 \cos 2[\phi_0 - \phi_{\perp}(i, j)]}.$$

(3)

2.3 反射光偏振度和透射光偏振度的求解

菲涅耳反射定律表明，反射光偏振度和透射光偏振度的大小随观测天顶角变化。反射光偏振度 ρ_R 和透射光偏振度 ρ_T ^[24]为

$$\rho_R = \left| \frac{r_p^2(\theta) - r_s^2(\theta)}{r_p^2(\theta) + r_s^2(\theta)} \right| = \frac{2 \sin \theta \tan \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 - \sin^2 \theta + \sin^2 \theta \tan^2 \theta},$$

$$\rho_T = \left| \frac{t_p^2(\theta) - t_s^2(\theta)}{t_p^2(\theta) + t_s^2(\theta)} \right| = \frac{\left(n - \frac{1}{n} \right)^2 \sin^2 \theta}{2 + 2n^2 - \left(n + \frac{1}{n} \right)^2 \sin^2 \theta + 4 \cos \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}$$

(4)

式中： r_p 、 r_s 分别为平行方向和垂直方向上的菲涅耳振幅反射系数； t_p 、 t_s 分别为平行方向和垂直方向上的菲涅耳振幅透射系数； θ 为观测天顶角； n 为折射率。

根据国家现行标准 GB9656-2003，路面行驶汽车车窗材质可以分为钢化玻璃、夹层玻璃、中空安全玻

璃、塑料复合玻璃。这些玻璃的折射率为 1.3~2.1，不妨取折射率为 1.5，此时反射光偏振度和透射光偏振度随观测天顶角的变化规律如图 2 所示。若求得观测天顶角，则可实现对反射光偏振度和透射光偏振度的估计。

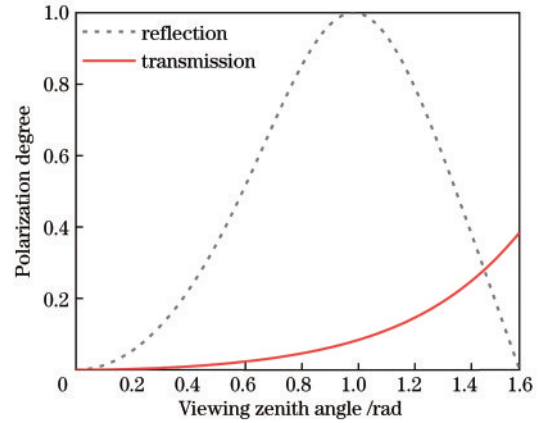


图 2 反射光偏振度和透射光偏振度随观测天顶角的变化曲线
Fig. 2 Variation curves of polarization degree of reflection light and transmission light with viewing zenith angle

2.4 观测天顶角的几何估计模型

在道路交通场景中，同型车辆前风窗玻璃倾角相近，并且监控相机摆放位置固定，因此可以采用估算的方式计算观测天顶角。若已知观测天顶角，则可采用查表法得到反射光偏振度和透射光偏振度。以小型轿车为例，监控相机拍摄行驶汽车的几何关系如图 3 所示。

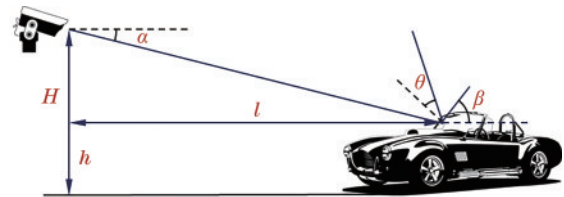


图 3 监控相机拍摄行驶汽车几何示意图
Fig. 3 Geometric illustration of surveillance camera shooting a running car

由光学基本定律和平面几何关系可得：

$$\alpha + \beta + \theta = \frac{\pi}{2},$$

$$\alpha = \arctan \frac{H - h}{l},$$

(5)

式中： α 为入射监控相机的光线与水平面间的夹角； β 为汽车前风窗玻璃与水平面间的倾角，出于改善车辆空气动力学特性的考量， β 的取值范围通常为 $38^\circ \sim 42^\circ$ ； θ 为观测天顶角； H 为监控相机距离地面的高度； h 为车窗前挡风玻璃与地面的垂直距离； l 为监控相机与车窗前挡风的相对水平距离。

在几何估计 α 和 β 的基础上，由 2.4 节式(5)可求得观测天顶角 θ ，进而根据 2.3 节图 2 曲线确定出反射

光偏振度 ρ_R 和透射光偏振度 ρ_T ; 通过采集 0° 、 45° 、 90° 的场景偏振图像, 可由 2.2 节式 (3) 求得平行方向光强分量 I^{\parallel} 和垂直方向光强分量 I^{\perp} ; 将 ρ_R 、 ρ_T 、 I^{\parallel} 、 I^{\perp} 代入 2.1 节式 (1) 即得透射光强 I_T 和反射光强 I_R , 实现透反混叠图像解耦。

3 室内及户外透玻消反实验

3.1 室内模拟实验

交通路口是城市车辆事故高频发生地带, 为验证上述方法, 搭建了比例为 1:24 的交通路口模型, 使用同比例小型轿车和大型客车模型作为研究对象进行透玻消反成像实验, 采用带有漫反射板的环形光源进行照明, 分焦平面偏振相机 (型号: FLIR BFS-PGE-51S5P-C) 进行成像。

按照要求布置好实验场地和成像设备后, 使用偏振相机采集分焦平面偏振图像, 并插值重构^[25]出 0° 、 45° 、 90° 、 135° 偏振图像, 根据式 (3) 计算出平行方向光强图像 I^{\parallel} 和垂直方向光强图像 I^{\perp} ; 小型轿车前风窗玻璃倾角 β 为 35° , 其与相机高度差 ΔH 为 55 cm, 相对水平距离 l 为 120 cm, 由式 (5) 计算得 α 为 24.623° 、 θ 为 30.377° , 根据图 2 可得: ρ_R 为 0.402、 ρ_T 为 0.017。小型轿车的强度图像、偏振图像和消反射图像如图 4 所示。可见强度图像中车窗透射光和反射光影像混叠, 偏振图像由于亮度过低难以对目标进行识别, 消反射图像中人物与原车窗反光处的对比度显著增加; 强度图像虚线位置对应的灰度曲线图左侧存在由车窗反射导致的灰度峰值, 如虚线圈出所示, 在消反射图像中, 该峰被很好地消除。

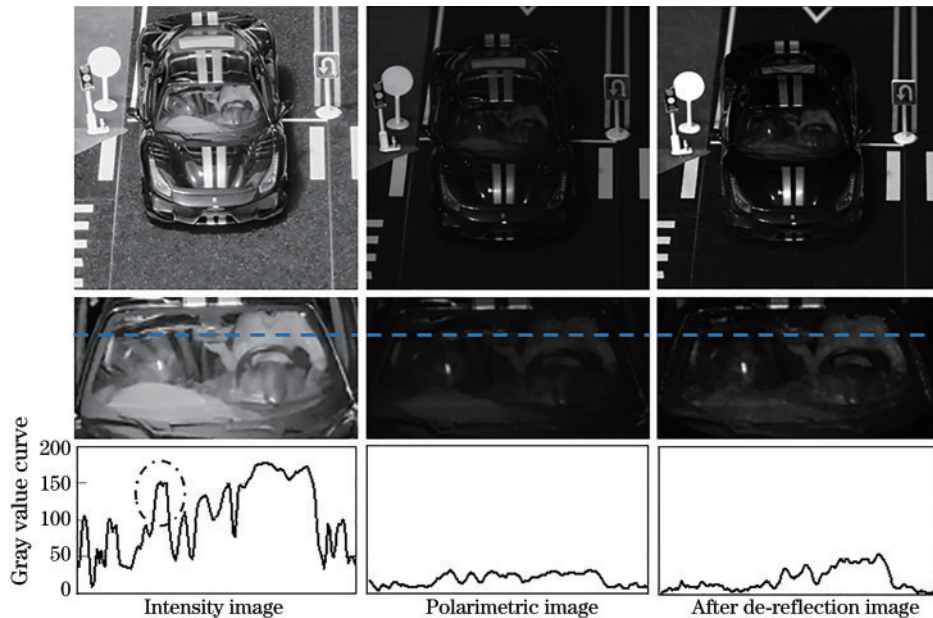


图 4 轿车模型消反室内实验

Fig. 4 Indoor experiment for eliminating reflectance of a saloon car

为验证该方法的普适性, 使用大型客车模型在同等条件下进行成像及透玻消反实验。需要注意, 为避免驾驶员视线受到干扰, 大型客车的前风窗玻璃倾角接近垂直, 几何模型会与图 3 的模型稍有不同, 计算得到的观测天顶角与原公式存在相反数的区别。大型客车前风窗玻璃倾角 β 为 90° , 计算得 $\theta = \alpha = 24.623^\circ$, 根据图 2 可得 ρ_R 为 0.261、 ρ_T 为 0.011。实验结果如图 5 所示。在监控视角下捕捉的客车强度图像存在车内目标和人行横道反射影像混叠的现象, 由图中虚线对应的灰度曲线图可知, 在偏振图像中也存在因人行横道反射影像导致的规则性起伏, 但在消反射图像中, 人行横道反射干扰影像被很好地消除。

3.2 户外场景实验

为进一步验证本方法在智慧交通领域路口监控场景应用的有效性, 对户外真实车辆进行偏振成像, 并利

用消反射算法进行图像处理, 对原始图像和消反射图像进行直观感受和量化指标对比。

天气情况为晴朗日照, 户外实验车前风窗玻璃倾角 β 为 30° , 偏振相机与其保持同一高度, 二者相对水平距离为 3 m; 由此可计算得 θ 为 60° 、 ρ_R 为 0.978、 ρ_T 为 0.097。户外汽车强度图像、偏振图像和消反射图像如图 6 所示。强度图像和偏振图像中车窗表面的树荫反光遮挡副驾驶位置的影像, 环境强光反射掩盖主驾驶位置的影像; 但在消反射图像中, 主副驾驶位置的座椅轮廓被很好地凸显出来。由虚线处对应的灰度值曲线可知, 消反射图像的灰度值曲线随座椅的形状特征表现出规律性变化。

为定量评估混叠图像解耦方法的有效性, 采用图像信息熵和区域对比度指标对图像质量进行评价, 信息熵 E 可用于衡量图像中包含信息量的大小, 其大小

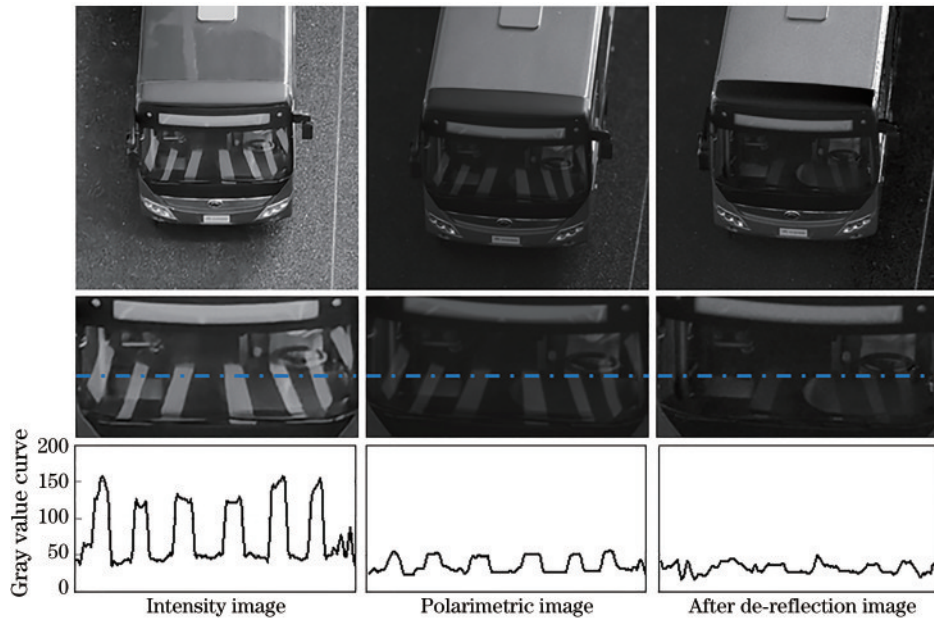


图 5 客车模型消反室内实验

Fig. 5 Indoor experiment for eliminating reflectance of a passenger car

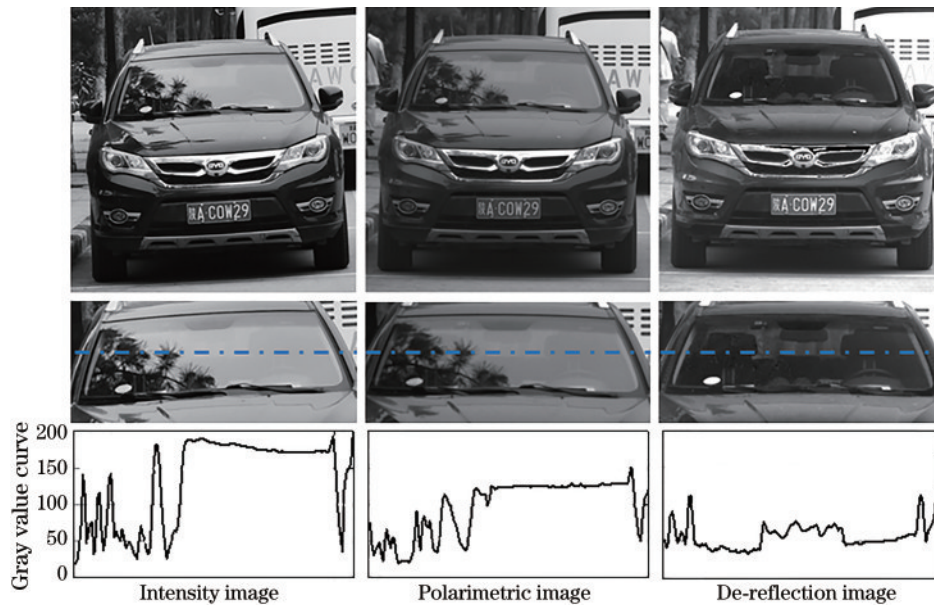


图 6 真实车辆消反射户外实验

Fig. 6 Outdoor experiment for eliminating reflection of a true vehicle

与图像质量呈正相关关系,定义为

$$E = - \sum_{i=0}^{255} P_i \lg P_i, \quad (6)$$

式中: P_i 为灰度值为*i*的像素在整幅图像中出现的统计概率。区域对比度*C*描述图像目标区域和反光区域平均像素值的对比程度,其大小与目标的显著性水平呈正相关关系,定义为

$$C = 10 \cdot \left| \lg \frac{A_T}{A_R} \right|, \quad (7)$$

式中: A_T 为目标区域的平均像素值; A_R 为反光区域的平均像素值。在室内轿车模型、客车模型和户外真实车辆场景下选取的目标区域和反光区域如图 7 所示。

室内模拟场景和户外真实场景的图像信息熵如表 1 所示,所提的消反射方法在 2 种车辆模型对应的场景下图像信息熵的提升量分别为 14.3% 和 9.8%,体现出本方法的有效性和普适性;然而户外真实场景的消反射图像信息熵略低于原始强度图像信息熵。首先,户外环境照度较实验室照度更强,且光源成分更加复杂,在图像处理过程中可能导致部分像素灰度值超过上限或低于下限,成为无效数据点;其次,户外车窗反射光实质上包含大量周围场景环境信息,如图 6 所示车窗反射的树叶信息,因此消反射处理会导致信息熵降低。室内模拟场景和户外真实场景的区域对比度

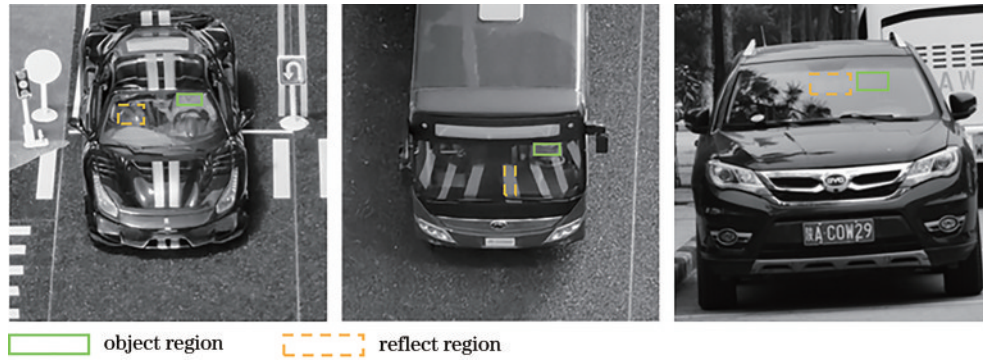


图 7 目标区域和反光区域的选取
Fig. 7 Selection of object region and reflect region

表 1 室内模拟场景和户外真实场景图像的信息熵
Table 1 Image information entropy of indoor simulation scene and outdoor real scene

Image	Indoor model		Outdoor vehicle
	Saloon car	Passenger car	SUV
Intensity	5.3574	6.2616	7.4878
Polarimetric	5.1975	6.2210	7.2439
De-reflection	6.1233	6.8739	7.2883

如表 2 所示,所提的消反射方法在 2 种车辆模型场景和真实户外场景下区域对比度的提升量分别为 40.1%、117.5% 和 237.8%。

表 2 室内模拟场景和户外真实场景图像的区域对比度
Table 2 Region contrast of indoor simulation scene and outdoor real scene

Image	Indoor model		Outdoor vehicle
	Saloon car	Passenger car	SUV
Intensity	1.6927	0.9925	0.3679
Polarimetric	1.0057	0.2872	0.2616
De-reflection	2.3709	2.1587	1.2429

4 消反质量几何影响因素研究

第 2 节求出了物体表面反射光强和透射光强与其相应偏振度的关系,并通过估算观测天顶角的方式确定反射光偏振度和透射光偏振度的大小,从而实现反射光成分和透射光成分的解耦分离。图 3 的几何模型表明,观测天顶角的估计值与监控相机与车辆的相对高度、监控相机与车辆的水平距离有关,因此本节研究图像消反质量随这 2 个几何参量的变化规律,以期能在实际交通场景中相对相机位置的摆放高度和车辆停止线的划线位置提供理论指导。

实验模型车如图 8 所示,多次测量得其前风窗与水平面夹角 β 为 35° ;前风窗材料为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (ABS) 塑料,折射率为 1.542。

验证高度差 ΔH 与图像质量之间的关系,保持水平距离 l 为 120 cm,改变偏振相机与模型轿车的高度

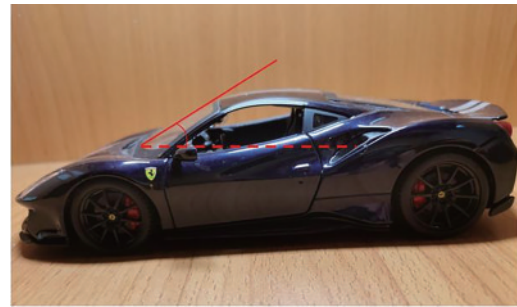


图 8 实验研究影响因素的模型车
Fig. 8 A model vehicle for experimentally investigating the influencing factors

差进行成像,实验示意图如图 9 所示。

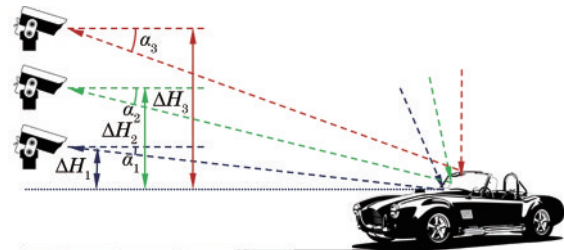


图 9 探究高度差与消反质量关系实验示意图
Fig. 9 Illustration of experimentally studying the relationship between the camera height and de-reflection effect

初始高度差 ΔH 为 55 cm,此后每隔 5 cm 采集一次图像进行记录,分别计算 α 、 θ 、 ρ_R 、 ρ_T 、 E_i 、 E_d 、 C_i 、 C_d ,所得结果如表 3 所示。其中: E_i 、 E_d 分别为强度图像和消反射图像信息熵; C_i 、 C_d 分别为强度图像和消反射图像的区域对比度。

验证水平距离 l 与图像质量之间的关系,保持高度差 ΔH 为 55 cm,改变偏振相机与模型轿车的水平距离进行成像,实验示意图如图 10 所示。初始距离 l 为 100 cm,此后每隔 10 cm 采集一次图像进行记录,分别计算 α 、 θ 、 ρ_R 、 ρ_T 、 E_i 、 E_d 、 C_i 、 C_d ,所得结果如表 4 所示。

强度图像和消反射图像信息熵和区域对比度随相对高度和水平距离的变化曲线如图 11 所示,由图 11 可知:1) 消反射图像信息熵和区域对比度普遍大于强

表 3 不同高度差对应的实验结果

Table 3 Experimental results corresponding to different camera heights

$\Delta H / \text{cm}$	$\alpha / (^\circ)$	$\theta / (^\circ)$	ρ_R	ρ_T	E_1	E_d	C_1	C_d
55	24.623	30.376	0.3908	0.0193	5.5042	5.7905	4.3960	6.4105
60	26.565	28.435	0.3411	0.0167	5.7304	5.9573	3.8696	5.7226
65	28.223	26.777	0.3012	0.0147	5.5288	5.7244	4.4729	5.8300
70	30.257	24.743	0.2556	0.0124	5.7358	5.9540	5.2538	5.8778
75	32.005	22.995	0.2196	0.0106	5.6224	5.6729	4.9570	5.6132
80	33.690	21.305	0.1874	0.0090	5.6097	5.6690	5.1722	5.9945

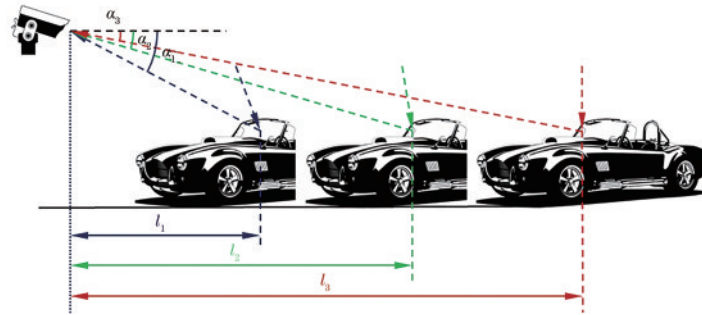


图 10 探究水平距离与消反质量关系实验示意图

Fig. 10 Illustration of experimentally studying the relationship between the horizontal distance and de-reflection effect

表 4 不同水平距离对应的实验结果

Table 4 Experimental results corresponding to different horizontal distances

l / cm	$\alpha / (^\circ)$	$\theta / (^\circ)$	ρ_R	ρ_T	E_1	E_d	C_1	C_d
100	28.811	26.189	0.2876	0.0140	6.2248	5.9679	4.7856	6.3057
110	26.565	28.437	0.3411	0.0167	6.3575	6.3658	4.5252	5.5971
120	24.623	30.377	0.3908	0.0193	6.4132	6.5208	4.3960	6.4105
130	22.932	32.068	0.4365	0.0218	6.5860	6.7346	4.5194	6.8154
140	21.448	33.552	0.4782	0.0242	6.6591	6.8713	4.3493	6.9001
150	20.136	34.864	0.5162	0.0264	6.7812	6.9810	4.8111	7.4051

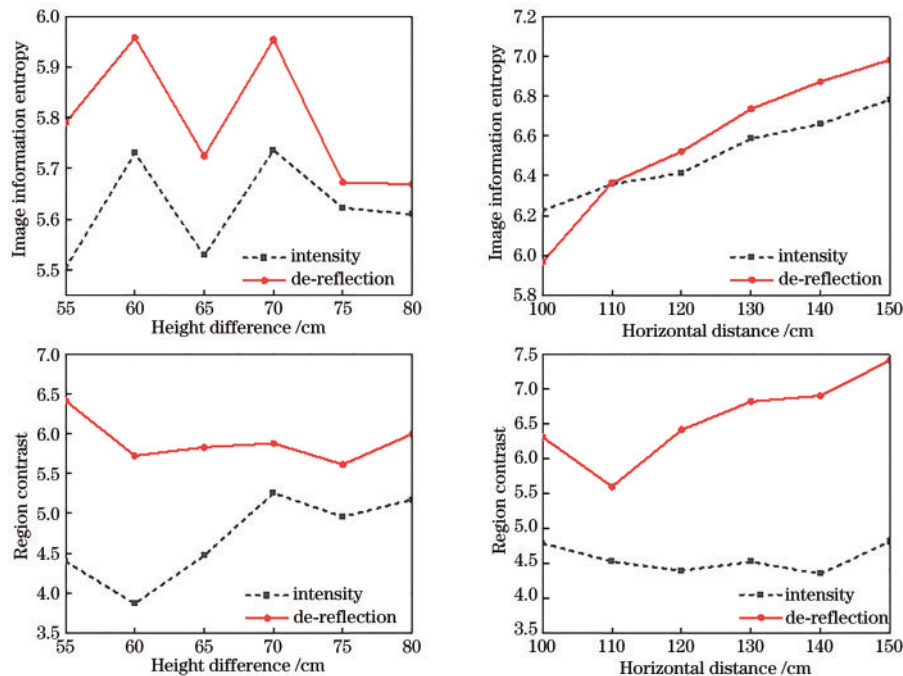


图 11 强度图像和消反射图像信息熵和区域对比度随相对高度和水平距离的变化曲线

Fig. 11 Varying curves of information entropy and region contrast of intensity image and de-reflection image with different camera heights and horizontal distances

度图像,所提的消反射方法有效;2)当高度差小于 75 cm 时,图像的提升效果较为明显,但当高度差大于 75 cm 时,图像质量只有极少提升,原因是当高度差进一步增大时透射光偏振度趋近于零,实验测试、图像处理过程中造成的误差会对最终结果造成较大影响;3)当水平距离小于 110 cm 时,消反射方法不能有效提升图像质量,但当水平距离大于 110 cm 时,图像质量提升效果明显,原因是水平距离过小时透射光偏振度趋近于零,实验测试、图像处理过程中造成的误差会对最终结果造成较大影响。

此外,实验场景与真实场景为 1:24,实验结果可以较好地指导真实场景中监控相机的摆放高度和车辆停止线的划线距离,从而保证消反射方法切实有效。

5 结 论

为解决智慧交通场景下传统道路监控方式因受反射光干扰而丢失目标关键信息的缺陷,根据透射光和反射光的偏振传输特性建立透反混叠解耦模型,并创新性地针对交通路口场景建立观测天顶角估计几何模型,从而合理估计透射光和反射光的偏振度,实现透射信息光和反射干扰光的有效解耦分离,并进行室内模拟车辆和室外真实车辆的透玻消反实验,验证所提方法的有效性。此外,还探究了消反质量与几何因素的相关关系,得到的结论能切实指导交通路口场景监控相机的摆放高度和车辆停止线的划线位置,助力我国智慧交通、天网工程和智慧城市的发展。

所提的透反混叠图像解耦方法针对绝大多数场景均有较佳效果,然而由于观测天顶角估计模型假设车窗表面光滑平整,即车窗各位置处微面元法线方向相对一致,这与实际情况稍有出入,可能导致图像的过分分离或欠分离误差。近些年关于偏振双向反射分布函数(pBRDF)的研究^[26-27]为上述问题提供了新的思路和方向,其采用微面元模型对粗糙表面进行建模,从而提高观测天顶角的估计精度。在未来,为适应环境复杂时变、处理信息庞大的智慧交通场景,还需研究精准度更高、适应性更强的透反混叠图像解耦方法。

参 考 文 献

- [1] Wang C, Shi B X, Duan L Y. Learning to remove reflections from windshield images[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2019, 78: 94-102.
- [2] Chang Y K, Jung C, Sun J. Joint reflection removal and depth estimation from a single image[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 51(12): 5836-5849.
- [3] Dong Z, Xu K, Yang Y, et al. Location-aware single image reflection removal[C]//2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), October 10-17, 2021, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2021: 4997-5006.
- [4] Fan Q N, Yang J L, Hua G, et al. A generic deep architecture for single image reflection removal and image smoothing[C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision, October 22-29, 2017, Venice, Italy. New York: IEEE Press, 2017: 3258-3267.
- [5] Arvanitopoulos N, Achanta R, Süsstrunk S. Single image reflection suppression[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2017: 1752-1760.
- [6] Shih Y, Krishnan D, Durand F, et al. Reflection removal using ghosting cues[C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 7-12, 2015, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 3193-3201.
- [7] Guo X J, Cao X C, Ma Y. Robust separation of reflection from multiple images[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2014, Columbus, OH, USA. New York: IEEE Press, 2014: 2195-2202.
- [8] Sun C, Liu S C, Yang T T, et al. Automatic reflection removal using gradient intensity and motion cues[C]//MM '16: Proceedings of the 24th ACM international conference on Multimedia, October 15-19, 2016, Amsterdam, The Netherlands. New York: ACM Press, 2016: 466-470.
- [9] Agrawal A, Raskar R, Nayar S K, et al. Removing photography artifacts using gradient projection and flash-exposure sampling[J]. *ACM Transactions on Graphic*, 2005, 24(3): 828-835.
- [10] Chang Y K, Jung C, Sun J, et al. Siamese dense network for reflection removal with flash and no-flash image pairs[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2020, 128(6): 1673-1698.
- [11] Lei C Y, Chen Q F. Robust reflection removal with reflection-free flash-only cues[C]//2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 20-25, 2021, Nashville, TN, USA. New York: IEEE Press, 2021: 14806-14815.
- [12] Schechner Y Y, Kiryati N, Basri R. Separation of transparent layers using focus[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2000, 39(1): 25-39.
- [13] Wolff L B. Using polarization to separate reflection components[C]//Proceedings CVPR '89: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 4-8, 1989, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 1989: 363-369.
- [14] Ohnishi N, Kumaki K, Yamamura T, et al. Separating real and virtual objects from their overlapping images [M]//Buxton B, Cipolla R. *Computer vision-ECCV '96. Lecture notes in computer science*. Heidelberg: Springer, 1996, 1065: 636-646.
- [15] Schechner Y Y, Shamir J, Kiryati N. Polarization-based decorrelation of transparent layers: the inclination angle of an invisible surface[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, September 20-27, 1999, Kerkyra, Greece. New York:

- IEEE Press, 1999: 814-819.
- [16] Kong N, Tai Y W, Shin J S. A physically-based approach to reflection separation: from physical modeling to constrained optimization[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2014, 36(2): 209-221.
- [17] Lü Y, Cui Z, Li S, et al. Reflection separation using a pair of unpolarized and polarized images[C]//*Advances in Neural Information Processing Systems 32: Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2019, December 8-14, 2019, Vancouver, BC, Canada*. Copenhagen: MLR Press, 2019: 14559-14569.
- [18] 杨锦发, 晏磊, 赵红颖, 等. 融合粗糙深度信息的低纹理物体偏振三维重建[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(6): 819-827.
Yang J F, Yan L, Zhao H Y, et al. Shape from polarization of low-texture objects with rough depth information[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(6): 819-827.
- [19] 史浩东, 王稼禹, 李英超, 等. 复杂海况下海洋生态环境多维度光学监测方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(6): 0600004.
Shi H D, Wang J Y, Li Y C, et al. Multi-dimensional optical monitoring method of marine ecological environment under complex sea conditions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0600004.
- [20] Wieschollek P, Gallo O, Gu J W, et al. Separating reflection and transmission images in the wild[M]//*Ferrari V, Hebert M, Sminchisescu C, et al. Computer vision-ECCV 2018. Lecture notes in computer science*. Cham: Springer, 2018, 11217: 90-105.
- [21] Lei C Y, Huang X H, Zhang M D, et al. Polarized reflection removal with perfect alignment in the wild[C]//*2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, June 13-19, 2020, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 1747-1755.
- [22] 张景华, 张焱, 石志广, 等. 基于法向量估计的透明物体表面反射光分离[J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1526001.
Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G, et al. Reflected light separation on transparent object surface based on normal vector estimation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1526001.
- [23] Pang Y X, Yuan M K, Fu Q, et al. Progressive polarization based reflection removal via realistic training data generation[J]. *Pattern Recognition*, 2022, 124: 108497.
- [24] 李轩, 刘飞, 邵晓鹏. 偏振三维成像技术的原理和研究进展[J]. *红外与毫米波学报*, 2021, 40(2): 248-262.
Li X, Liu F, Shao X P. Research progress on polarization 3D imaging technology[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, 40(2): 248-262.
- [25] 郝佳, 王燕, 周奎, 等. 基于改进模型的新型对角微偏振阵列设计[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(10): 2363-2374.
Hao J, Wang Y, Zhou K, et al. Optimized design model of novel diagonal micropolarizer arrays[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(10): 2363-2374.
- [26] 汪方斌, 伊龙, 王峰, 等. 基于漫反射优化的金属表面偏振双向反射分布函数[J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1129002.
Wang F B, Yi L, Wang F, et al. Polarization bidirectional reflection distribution function of metal surfaces based on diffuse reflection optimization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1129002.
- [27] 杨志勇, 陆高翔, 张志伟, 等. 热辐射环境下目标红外偏振特性分析[J]. *光学学报*, 2022, 42(2): 0220001.
Yang Z Y, Lu G X, Zhang Z W, et al. Analysis of infrared polarization characteristics of target in thermal radiation environment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 0220001.