

doi:10.3788/gzxb20144308.0810004

# 基于典型目标反射率的近红外场景仿真

江乐<sup>1</sup>, 白廷柱<sup>1</sup>, 丁艳<sup>2</sup>, 周强<sup>1</sup>

(1 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

(2 北京理工大学 宇航学院 飞行器动力学与控制教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘 要:** 利用积分球对近红外增强相机进行了可见、近红外波段的辐射定标, 并采用该相机采集了典型目标的可见、近红外图像. 利用便携式地物光谱仪采集了相同目标可见、近红外波段的光谱反射率曲线, 并分析了目标在可见、近红外波段的光谱反射特性. 通过寻找同一天气条件、同一时间段所拍摄的典型目标近红外图像灰度值与可见光图像灰度值及典型目标可见、近红外波段反射率之间的关系, 提出一种基于可见光图像及目标反射率反演近红外图像的算法. 在近红外图像反演过程中考虑了大气透过率的影响, 反演结果表明, 本文算法可以较好地体现典型目标近红外图像的全局特征, 为后续不同天气条件下近红外场景仿真的实现提供参考.

**关键词:** 物理光学; 近红外场景仿真; 辐射定标; 辐亮度; 图像灰度; 反射率; 大气透过率

**中图分类号:** O432; TP391.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2014)08-0810004-6

## Near Infrared Scene Simulation Based on Reflectance of Typical Target

JIANG Le<sup>1</sup>, BAI Ting-zhu<sup>1</sup>, DING Yan<sup>2</sup>, ZHOU Qiang<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory for Photoelectric Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 Key Laboratory of Dynamics and Control of Flight Vehicle, Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** An algorithm to inverse near infrared images based on visible light images and reflectance of typical target was proposed, according to the relationship between digital number of near infrared images and digital number of visible light images and reflectance of typical targets. In order to gain its relationship, two experiments were carried out. Firstly, radiometric calibration of camera in visible and near infrared waveband (0.38~1.1 μm) was conducted by using integrating sphere; secondly, visible light images and near infrared images of some typical targets were obtained by the camera; at the same time, the spectral reflectance which ranges from 0.38 μm to 1.1 μm for those typical targets was obtained by spectrometer under the same weather conditions. The atmospheric transmittance was also considered. The inversion result shows that the proposed algorithm can better reflect the characteristics of typical target in near infrared waveband, and this work lays a solid foundation to achieve the near infrared scene simulation.

**Key words:** Physical optics; Near infrared scene simulation; Radiometric calibration; Radiance; Digital number; Reflectance; Atmospheric transmittance

**OCIS Codes:** 120.5700; 110.3080; 300.6170; 350.5610

**基金项目:** 国家部委预研项目(No. 110010202)资助

**第一作者:** 江乐(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感影像数据处理及近红外场景仿真等. Email: jiangle1208@163.com

**导师(通讯作者):** 白廷柱(1955-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为微光\夜视光电子技术、图像处理、红外仿真、紫外通信等. Email: tzhbai@bit.edu.cn

**收稿日期:** 2013-11-05; **录用日期:** 2014-01-27

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

在成像制导武器的研制中,需要提供大量不同场景的图像作为输入进行测试,然而现场实拍得到的只是当时气象条件下的图像,并不能表达其他气象条件下的场景,若全部实拍需要耗费大量时间及人力物力.成像仿真技术可以为这类问题提供一种极为有效、经济的途径<sup>[1]</sup>.目前,国内外主要使用可见光<sup>[2-4]</sup>、红外<sup>[5-9]</sup>、微波<sup>[10-13]</sup>进行场景仿真.其中,可见光仿真对于颜色分辨力有限,易受人为遮挡或大气环境的影响;红外仿真易受大气温度或人为干扰的影响,而近红外波段紧邻可见光及红外区域,既具有可见光的反射和散射特性,又具有红外光谱的不可见特性,且对环境温度不敏感,不易受到环境辐射的干扰.因此,近红外场景仿真在一定程度上可以克服可见光仿真和红外仿真研究过程中遇到的种种困难.

鉴于近红外场景仿真研究存在着重大意义,国内外目前关于近红外场景仿真的研究比较少.本文提出了一种基于可见光图像的近红外图像反演仿真的算法.该算法参照相机采集的可见光图像灰度,基于地物反射率寻找近红外图像的灰度分布关系,进而得到近红外仿真图像.算法的具体流程是:首先,基于相机的辐射定标原理,在实验室利用积分球对近红外增强(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)相机进行可见、近红外波段的辐射定标,根据实验数据拟合出相机入瞳处接收到的可见、近红外波段的辐亮度与相机采集相应波段的图像灰度之间的关系;其次,在室外利用该相机采集同一时间段、同一天气条件下典型目标的可见、近红外图像,同时,利用地物光谱仪采集上述典型目标可见、近红外波段的反射率光谱曲线,并对典型目标的反射光谱特性进行分析;然后,根据大气辐射传输原理,得出相机入瞳处接收到的可见、近红外波段的辐亮度与相应波段目标反射率和太阳直接照射到目标的辐亮度之间的关系;最后,考虑大气距离衰减的影响,确定近红外图像灰度值与可见光图像灰度值、目标可见光波段反射率、近红外波段反射率三个参量之间的关系,建立基于可见光图像的近红外图像反演算法,完成近红外图像的反演仿真.本文算法为后续复杂场景及不同环境下的近红外仿真提供参考依据.

## 1 近红外增强 CMOS 相机辐射定标

相机辐射定标是指通过一定方法寻找出相机输出信号(拍摄图像灰度值)与到达相机入瞳处的辐射亮度之间的定量关系<sup>[14-16]</sup>.本文使用最小二乘法拟合图像灰度值和辐射亮度之间的关系曲线.

### 1.1 最小二乘法原理

曲线拟合的实际含义是寻求一个函数  $y=f(x)$ ,

使  $f(x)$  在某种准则下与所有数据点最为接近,即曲线拟合得最好.给定平面上的点  $(x_i, y_i)$ ,  $(i=1, 2, \dots, n)$  进行曲线拟合有多种方法,其中最小二乘法是解决曲线拟合最常用的方法.最小二乘准则是使所有散点到拟合曲线的距离平方和最小.用数学表达式表示最小二乘法的原理<sup>[14,17]</sup>为:求  $f(x)$ ,使

$$\delta = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [f(x_i) - y_i]^2 \quad (1)$$

达到最小.其中,  $\delta_i$  为点  $(x_i, y_i)$  与曲线  $y=f(x)$  的距离.拟合函数  $f(x)$  可由一系列函数的线性组合表示为

$$f(x) = c_0 \varphi_0(x) + c_1 \varphi_1(x) + \dots + c_m \varphi_m(x) \quad (2)$$

式中,  $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x)$  为基函数,可以是幂函数、三角函数等.

### 1.2 辐射定标方法及实验原理

根据定标用的光源不同,实验室辐射定标包括平行光管定标、朗泊板定标和积分球定标.平行光管光源只能照明相机少数像元和对其定标;朗泊板定标杂散光大,影响定标精度;用积分球光源可避免这些缺点,还具有亮度均匀等优点<sup>[13]</sup>.本文采用积分球定标的方法进行了相机的辐射定标.

本文辐射定标实验及室外采集典型目标可见、近红外图像所用相机为某近红外增强 CMOS 相机.其波段范围为  $0.25 \sim 1.1 \mu\text{m}$ ,分辨率为  $1280 \times 1024$ , CMOS 增益为  $1 \sim 4$  倍,曝光时间为  $0.09 \sim 46.406 \text{ ms}$ .在室外采集目标图像时,该相机与某透可见光滤光片(透光波段  $0.38 \sim 0.76 \mu\text{m}$ ,透过率为  $0.95$ )结合使用可以采集目标的可见光图像;与某透近红外滤光片(透光波段  $0.76 \sim 1.1 \mu\text{m}$ ,透过率为  $0.95$ )结合使用可以采集目标的近红外图像.

在辐射定标实验之前紧挨固定相机及光谱辐亮度计的位置,保证积分球出射光线均匀的照射到相机上,并被光谱辐亮度计探测.实验过程中,不断改变加在积分球上的电压,同时记录由光谱辐亮度计探测到的辐射亮度及由相机采集的相应的辐亮度下的积分球光源的图像.依据 1.1 节所讲最小二乘法原理,利用 Matlab 软件拟合出相机拍摄图像的灰度值与到达相机入瞳处的辐亮度之间的定量关系,完成相机的辐射定标.

为避免外界光源干扰,整个实验过程处于较黑暗的室内完成.

本次室内定标实验还考虑了 CMOS 的增益及曝光时间对相机输出图像灰度的影响.研究表明:当输入辐亮度不变时,相机输出图像灰度值随曝光时间或 CMOS 增益的变化呈线性变化趋势,如此,只要知道了一组曝光时间和 CMOS 增益下相机的辐射定标结果,就可以快速推演出其他工作条件下相机的辐射定标结果.

## 2 典型目标可见-近红外波段光谱反射特性分析

自然界中任何温度高于绝对零度的物体,都具有反射、吸收、透射及辐射电磁波的特性,在可见、近红外波段主要考虑目标对太阳光的反射和吸收特性. 物体的物理化学特性不同、结构不同、表面平整度不同、甚至外表颜色不同都会造成物体对太阳光的反射不同,且随着入射波长的变化,物体的反射率也会相应变化.

本文主要研究了典型植物(草地、灌木)及人工建筑物(墙面、路面)的反射特性,它们均为构成一幅简单场景必不可少的因素. 利用便携式数字综合气象观测仪对实验时的气象条件进行了测量,并利用便携式地物光谱仪对上述典型景物的可见、近红外波段光谱反射率进行了采集,同时,利用近红外增强 COMS 相机采集了典型目标的可见、近红外图像. 实验过程中光谱仪 CCD 探测方向与采集图像时 COMS 相机拍摄方向一致,且近似认为目标为均匀的朗伯体,即在各个方向反射率均相等.

图 1 为同一天同一时间段某大学校园内绿草、灌木和深灰墙面、沥青路面在可见-近红外波段(0.38~1.1 μm)的光谱反射特性分布. 测量时间为 2013 年 8 月 26 日上午 10:00,实验时的天气条件:气温为 31℃,湿度为 29%,大气压强为  $1.007 \times 10^5$  Pa. 从图 1(a)中可以看出两种绿色植物的光谱反射特性曲线走向一致:在可见光波段绿草和灌木的反射光谱有着较

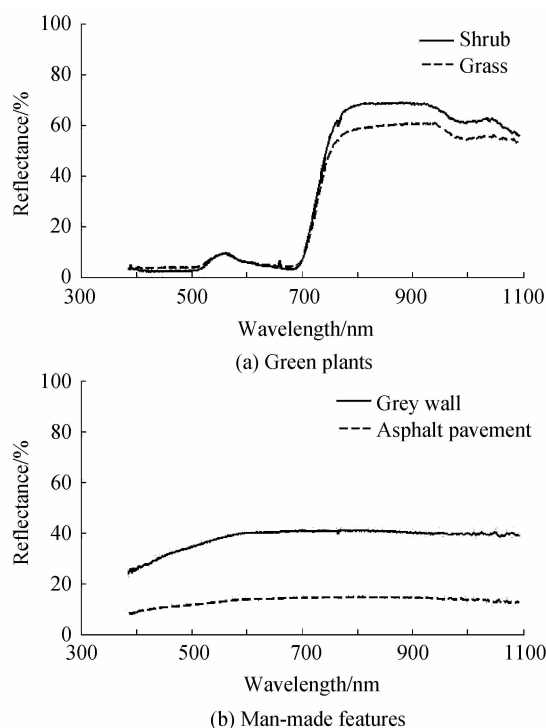


图 1 典型地物反射光谱特性曲线

Fig. 1 The curve of spectral reflectance of typical feature

为明显的波峰、波谷;近红外波段反射率均出现陡增,并形成较高的近红外反射坪<sup>[18]</sup>. 可见光波段 0.45 μm、0.65 μm 附近出现波谷,0.55 μm 附近出现较小的波峰,这是由于绿色植被体内的叶绿素对蓝紫光、红光吸收较多,对绿光吸收较少,反射较多导致的;在 0.65~0.75 μm 之间反射率急剧增大出现一个陡坡,这是由于植被叶细胞结构的影响造成的;在 0.78~1.1 μm 波段,由于植物叶内细胞间隙导致光的散射和折射,使反射率增高,形成一个红外反射坪,这一波段内的主要控制因素是叶体细胞结构、叶面粗糙度、以及树冠结构等. 近红外波段灌木的反射率大于绿草的反射率,主要是由于两种植物的细胞结构及含水量不同.

从图 1(b)中可以看出人工地物的光谱反射曲线在可见、近红外波段总体呈平直形状. 人工地物的材质成分、表面粗糙程度、颜色等都是影响其光谱特征的主要因素. 图中深灰墙面的反射率明显大于沥青路面,主要原因就是:深灰墙面表面比较光滑,散射较少,所以反射会相对较大;另外,深灰墙面的颜色比沥青路面浅,对于太阳光的吸收较少,也是其反射率大于沥青路面的一个原因.

## 3 基于可见光图像反演近红外图像的算法设计

本文算法基于地物反射率及可见光图像灰度分布来寻找近红外图像的灰度分布关系,根据第 2 节采集到的典型目标在可见、近红外波段的反射率光谱曲线,可计算出地物在可见、近红外波段的反射率均值,即

$$\rho_v = \frac{1}{N_v} \sum_{k=1}^{N_v} \rho(\lambda_k) \quad (3)$$

$$\rho_{nir} = \frac{1}{N_{nir}} \sum_{k=1}^{N_{nir}} \rho(\lambda_k) \quad (4)$$

式中,  $\rho_v$  表示可见光波段平均反射率,  $\rho_{nir}$  表示近红外光波段平均反射率,  $\rho(\lambda_k)$  为实验测得的波长  $\lambda_k$  处的反射率. 本文所采用光谱仪为 512 像元,即在波段范围 0.38~1.1 μm 内,共采集 512 个波长处的数据,  $N_v$  表示波长在 0.38~0.76 μm 的采样点总数,由光谱仪自带软件统计得出该值为 277,  $N_{nir}$  表示波长在 0.76~1.1 μm 的采样点总数,由光谱仪自带软件统计得出该值为 235. 由第 2 节中对典型目标可见、近红外波段的反射光谱特性的分析,知可见、近红外波段的平均反射率在一定程度上可以表征这两波段的光谱反射特性.

根据大气辐射传输理论,相机入瞳处探测到的可见光、近红外波段的辐亮度与这两波段测得的目标反射率可表示为

$$L'_v = \rho_v \cdot L_v \cdot \tau_v \quad (5)$$

$$L'_{nir} = \rho_{nir} \cdot L_{nir} \cdot \tau_{nir} \quad (6)$$

式中,  $L'_v$ 、 $L'_{nir}$  为相机入瞳处探测到的目标反射的可见

光、近红外波段的辐亮度,  $L_v$ 、 $L_{nir}$  为太阳光直接照射到目标上的可见、近红外波段的辐亮度,  $\tau_v$ 、 $\tau_{nir}$  为可见、近红外波段大气透过率, 可由大气辐射传输软件 MODTRAN 进行精确计算, 本文中相机到目标景物的距离为 10 m, 由 MODTRAN 计算出的可见、近红外波段的透过率较为接近, 且均在 0.99 以上, 由此, 可知在相机与目标景物的距离较近的情况下, 大气透过率可以忽略, 但当距离较大时, 大气对可见光与近红外光的透过率会有较大差异, 不可忽略。

结合第 1 节相机的辐射定标理论及实验, 考虑到在较大的太阳辐亮度照射下, 曝光时间与 CMOS 增益较大时, 相机输出图像的灰度非常容易达到饱和, 不利于定标结果的应用, 故在利用该相机进行室外采景时采用小增益、短曝光时间和小镜头光圈工作条件的相机辐射定标结果. 该工作条件下, 相机采集到的可见 (0.38~0.76  $\mu\text{m}$ )、近红外波段 (0.76~1.1  $\mu\text{m}$ ) 图像的灰度值与相机入瞳处接收到的辐亮度值的拟合曲线如图 2.

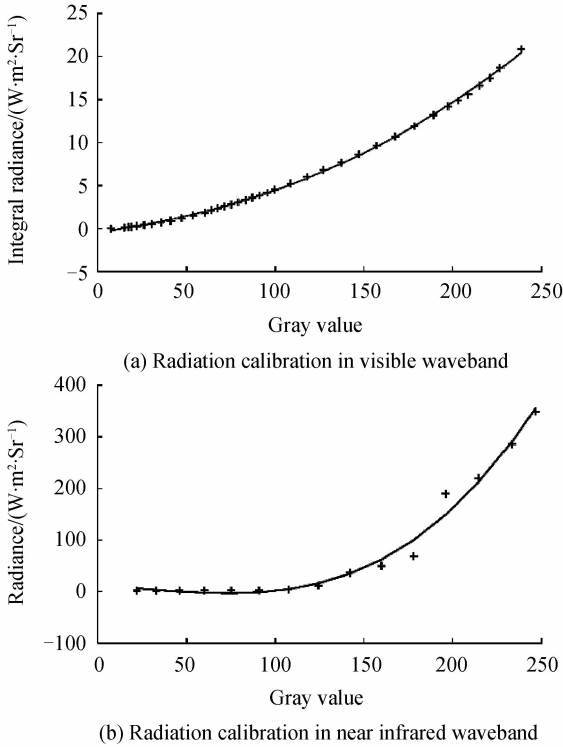


图 2 可见、近红外波段辐射定标数据及定标结果  
Fig. 2 Radiation calibration data and calibration results in visible and near infrared wavebands

式(7)、(8)分别为利用最小二乘法拟合出的该相机在可见光波段及近红外波段采集的图像灰度值与相机入瞳处接收到的辐射亮度之间的关系式.

$$L'_v = 3.4495 \cdot 10^{-7} \cdot G_v^3 + 1.6044 \cdot 10^{-4} \cdot G_v^2 + 0.0298 \cdot G_v - 0.4610 \quad (7)$$

$$L'_{nir} = 3.9297 \cdot 10^{-5} \cdot G_{nir}^3 - 0.0027 \cdot G_{nir}^2 - 0.2131 \cdot G_{nir} + 12.0182 \quad (8)$$

式中,  $G_v$ 、 $G_{nir}$  为可见、近红外图像的灰度值,  $L'_v$ 、 $L'_{nir}$  为相机入瞳处接收到的可见、近红外光的辐亮度.

将式(7)、(8)代入式(5)、(6), 并作比可得到近红外图像的灰度值与同条件下测得的可见光图像的灰度值之间的关系式(9).

$$\frac{\rho_{nir} \cdot L_{nir} \cdot \tau_{nir}}{\rho_v \cdot L_v \cdot \tau_v} = (3.9297 \cdot 10^{-5} \cdot G_{nir}^3 - 0.0027 \cdot G_{nir}^2 - 0.2131 \cdot G_{nir} + 12.0182) / (3.4495 \cdot 10^{-7} \cdot G_v^3 + 1.6044 \cdot 10^{-4} \cdot G_v^2 + 0.0298 \cdot G_v - 0.4610) \quad (9)$$

由于本文目标距离相机为 10 m, 故式(9)左边  $\frac{\tau_{nir}}{\tau_v}$  近似为 1,  $L_v$ 、 $L_{nir}$  为太阳光直接照射到目标上的可见、近红外波段的辐亮度, 其与太阳辐射及大气衰减有关, 在特定大气条件下, 均为定值. 故式(9)左边  $\frac{L_{nir}}{L_v}$  也是定值, 其作用是根据实际的太阳辐射情况及大气衰减情况对反演出的近红外图像的灰度值进行一个调整, 使得反演结果与真实拍摄的近红外图像更为接近. 因此式(9)中影响近红外图像反演的最大因素是地物在可见、近红外波段的反射率.

利用第 2 节中使用的地物光谱仪, 测量典型目标反射率的同时, 对地物光谱仪自带的经过标定的白板 (反射率近似为 1) 的光谱反射率也进行了多次测量, 得到不同条件下白板可见、近红外波段反射率光谱, 该光谱可代表当时太阳光照射到典型目标上可见、近红外波段的光谱. 因此, 式(9)中, 太阳光直接照射到目标上的近红外波段的积分辐亮度与可见光波段积分辐亮度的比值  $\frac{L_{nir}}{L_v}$  在数值上就等于由光谱仪测得的白板近红外波段积分辐亮度与可见光波段积分辐亮度的比值. 借助与第 2 节典型目标反射率测量实验相同天气状况下测得的白板反射光谱曲线, 经过大量统计实验计算可得, 白板近红外波段积分辐亮度与可见光波段积分辐亮度的比值为 1/3.58. 由此, 式(9)可由式(10)近似替代.

$$\frac{\rho_{nir}}{\rho_v} = 3.58 \cdot (3.9297 \cdot 10^{-5} \cdot G_{nir}^3 - 0.0027 \cdot G_{nir}^2 - 0.2131 \cdot G_{nir} + 12.0182) / (3.4495 \cdot 10^{-7} \cdot G_v^3 + 1.6044 \cdot 10^{-4} \cdot G_v^2 + 0.0298 \cdot G_v - 0.4610) \quad (10)$$

利用式(10), 可解出由可见光图像灰度  $G_v$ 、典型目标可见光波段的均值反射率  $\rho_v$ 、及近红外波段的均值反射率  $\rho_{nir}$  等三个参数表征的近红外图像灰度  $G_{nir}$  的数值解, 进而得到近红外图像的灰度分布关系, 最终考虑大气透过率的影响, 完成近红外图像反演仿真.

## 4 近红外场景仿真实现及结果分析

根据 1~3 节提出的近红外场景仿真实理论及算法, 利用 MATLAB 软件进行了灌木、草地、墙面的近红外

图像反演仿真.结果如图3~图5.利用相机进行可见、近红外波段图像采集时,测量地点、时间、天气条件等均与测量典型目标景物的光谱反射率时的条件相同.

图3为灌木的近红外仿真结果.图3(a)为CMOS

相机拍摄的灌木可见光图像,图3(b)为基于本文算法得到的近红外仿真图像,图3(c)为CMOS相机拍摄的灌木近红外图像.

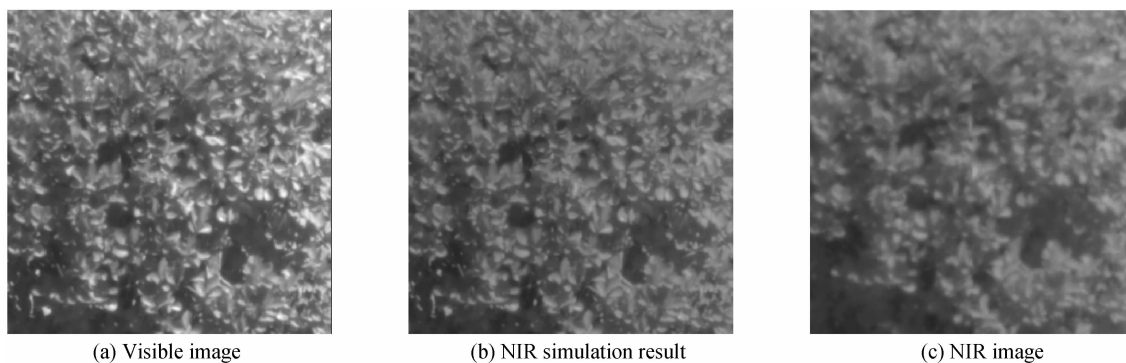


图3 灌木近红外仿真结果  
Fig. 3 Near infrared (NIR) simulation result of shrub

从图3灌木近红外仿真结果可以看出:利用本文算法对灌木进行近红外仿真,仿真结果较好地体现了灌木的近红外特征.由于近红外波长比可见光波长长,离散斑较大,导致灌木实拍近红外图像比较模糊,而近红外仿真是基于可见光图像完成的,所以没有体现出近红外图像的模糊感.

图4为绿草的近红外仿真结果.实验设备、测量时间及测量条件同灌木.图4(a)为CMOS相机拍摄的绿草的可见光图像,图4(b)为基于本文算法得到的近红外仿真图像,图4(c)为CMOS相机拍摄的绿草的近红外图像.

从图4绿草近红外仿真结果可以看出:基于本文

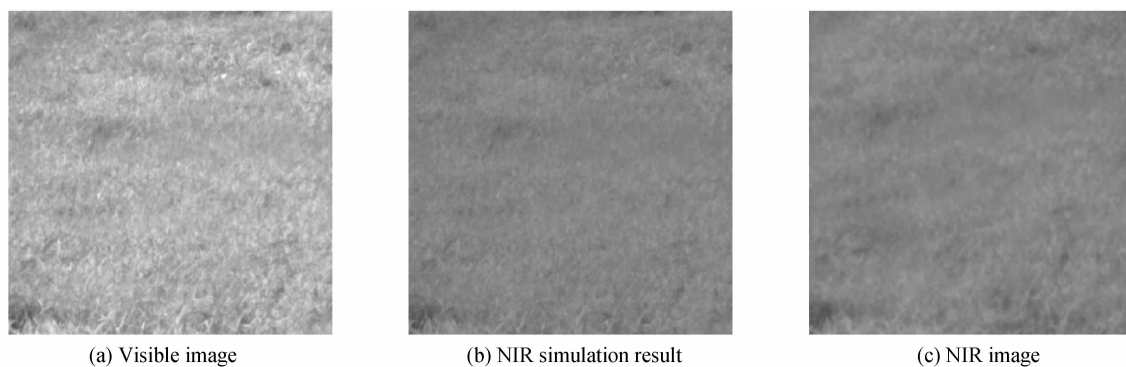


图4 绿草近红外仿真结果  
Fig. 4 Near infrared (NIR) simulation result of grass

算法对绿草进行近红外仿真,结果基本上反映了其近红外特征,但由于拍摄的可见光图像中存在草与草之间相互遮挡的现象,像素灰度差异并不完全取决于物

体本身的反射率,因此,仿真图像与实拍图像在细节上还存在一定差异.

图5为墙面的近红外仿真结果.实验设备、测量时

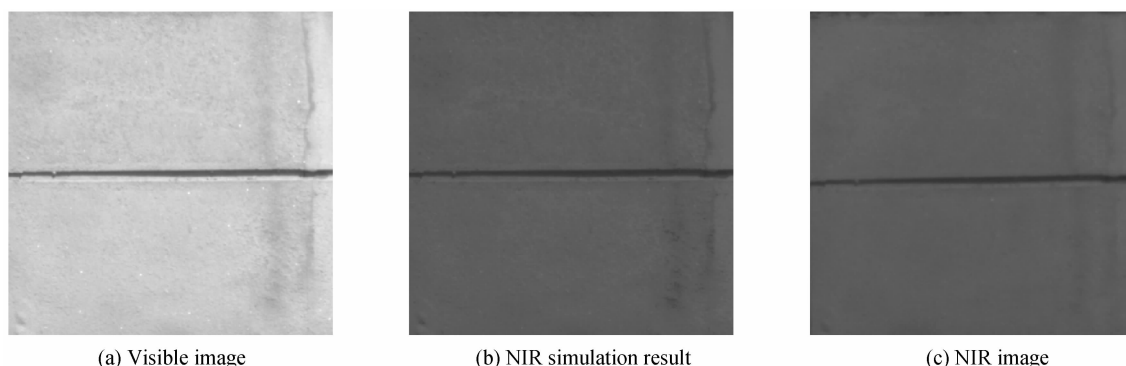


图5 墙面近红外仿真结果  
Fig. 5 Near infrared (NIR) simulation result of wall

间及测量条件同灌木.图 5(a)为 CMOS 相机拍摄的墙面的可见光图像,图 5(b)为基于本文算法得到的墙面的近红外仿真图像,图 5(c)为 CMOS 相机拍摄的墙面的近红外图像.

从图 5 墙面近红外仿真结果可以看出:基于本文算法对墙面进行近红外仿真,结果较好地体现了其近红外特征,在细节纹理方面,仿真结果与实拍图像也较为接近.

从上述三种典型目标的仿真结果可以看出,对于人工地物和植物而言,本文基于可见光图像的近红外场景仿真算法都能较好地体现其近红外目标的特征;人工地物仿真结果在细节纹理上优于绿色植物,这主要是因为对植物而言,拍摄的可见光图像中存在叶片相互遮挡现象,本文算法仿真时只考虑了地物对太阳光直接的反射情况,没有考虑阴影等对反射率造成的影响.另外,由于近红外波长长,实拍近红外图像离散斑较大,导致实拍图像存在不同程度的模糊感.

## 5 结论

同可见光一样,近红外场景仿真的基础也是地物的反射率.本文通过寻找地物反射率与相机入瞳处接收到的辐亮度,及相机采集图像的灰度值与相机入瞳处接收到的辐亮度之间的关系,确定了近红外波段图像灰度值与可见光波段图像灰度值之间的关系,从而提出了一种基于可见光图像反演近红外图像的算法.本文对仿真结果进行主观评价,结果表明在晴朗的天气条件下,本文算法较好地体现了近红外图像的全局特征,人工地物的仿真结果在纹理细节上与实拍图像非常接近,植物仿真结果在纹理细节上略有欠缺,在细节的逼真度上还有待于进一步的提高.本文关于近红外反演图像的客观评价将在后续工作中进行.

### 参考文献

- [1] WU Guo-jun, BAI Ting-zhu, BAI Fu-ning. Research on infrared images simulation by inverting the scene of the visible light images [J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(10): 574-579.  
武国军, 白廷柱, 白茯苓. 基于可见光图像的红外图像反演研究[J]. *红外技术*, 2011, **33**(10): 574-579.
- [2] PENG Xiao-dong, LIU Bo, MENG Xin, et al. Research on remote sensing image generation modeling in the visible regions [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1106-1111.  
彭晓东, 刘波, 孟新, 等. 星载可见光相机成像仿真建模研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 1106-1111.
- [3] WANG Bin, DAI Shu-ling. Simulation of lens system imaging in virtual reality system [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, **19**(6): 1312-1319.  
王滨, 戴树岭. 虚拟现实系统中的可见光成像仿真[J]. *系统仿真学报*, 2007, **19**(6): 1312-1319.
- [4] YU Hong, LEI Jie. Image generation of visual imaging simulation in HWIL [J]. *Modern Defence Technology*, 2006, **34**(6): 107-114.  
虞红, 雷杰. 可见光成像制导半实物仿真中的图像生成技术[J]. *现代防御技术*, 2006, **34**(6): 107-114.
- [5] ZHANG Kai, HUANG Yong, YAN Jie, et al. Dynamic infrared scene simulation using grayscale modulation of digital micro-mirror device [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, **26**(2): 394-400.
- [6] ZHENG Lu-lu, SUN Si-yuan, ZHANG Tian-xu, et al. A method for dynamic infrared image simulation under various natural conditions [C]. SPIE, 2009, 74940B.
- [7] ZOERB M C, HARRIS C B. A simulation program for dynamic infrared (IR) spectra [J]. *Journal of Chemical Education*, 2013, **90**(4): 506-507.
- [8] HU Hai-he, BAI Ting-zhu, GUO Chang-geng, et al. Long wave infrared scene simulation research based on zero stadia of landmark [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 1011002.  
胡海鹤, 白廷柱, 郭长庚, 等. 零视距地物长波红外特征场景仿真研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(10): 1011002.
- [9] ZHANG Kai, HUANG Yong, SUN Li, et al. Dynamic infrared scene simulation using grayscale modulation imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(9): 2283-2287.  
张凯, 黄勇, 孙力, 等. 动态红外场景仿真的灰度调制成像技术[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(9): 2283-2287.
- [10] TAN Wei-xian, HONG Wen. Three-dimensional microwave imaging algorithm for the surface of the human body based on wavenumber domain integration [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, **31**(11): 2541-2545.  
谭维贤, 洪文. 基于波数域积分的人体表面微波三维成像算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2009, **31**(11): 2541-2545.
- [11] LI Qing-xia, ZHANG Qing-ye, HE Lin-feng. A clutter modeling method in the composite sea-plus-land environment [J]. *Journal of Microwaves*, 2010, **26**(1): 22-26.  
李青侠, 张庆业, 贺林峰. 地海面复合场景的杂波建模方法[J]. *微波学报*, 2010, **26**(1): 22-26.
- [12] QIN Yu-liang, WANG Hong-qiang, LI Xiang. Active jamming penalization and scene scattering jamming suppression technique for INS/Passive-Radar/SAR seeker [J]. *Signal Processing*, 2009, **25**(6): 900-904.  
秦玉亮, 王宏强, 黎湘. INS/微波被动/SAR 导引头抗场景散射干扰和有源欺骗干扰技术[J]. *信号处理*, 2009, **25**(6): 900-904.
- [13] HUANG Quan-liang, ZHANG Zu-yin, GUO Wei. Simulation of microwave radiometric images on complex scene [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(1): 87-91.  
黄全亮, 张祖荫, 郭伟. 复杂场景微波辐射图像的模拟[J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(1): 87-91.
- [14] XIU Ji-hong, HUANG Pu, LI Jun, et al. Radiometric calibration of large area array color CCD aerial mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(6): 1365-1373.  
修吉宏, 黄浦, 李军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(6): 1365-1373.
- [15] PENG Guang-xiong, HE Yu-hua, LI Jing, et al. Study on CBERS-2's CCD image cross calibration and atmospheric correction [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **26**(1): 22-34.  
彭光雄, 何宇华, 李京, 等. 中巴地球资源 02 星 CCD 图像交叉定标与大气校正研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(1): 22-34.
- [16] GOU Zhi-yang, YAN Lei, CHEN Wei, et al. In-flight absolute radiometric calibration of UAV hyperspectral camera and its validation analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(2): 430-434.  
勾志阳, 晏磊, 陈伟, 等. 无人机高光谱成像仪场地绝对辐射定标及验证分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(2): 430-434.
- [17] 吴勃英. 数值分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [18] SID'KO A F, BOTVICH I Y, PISMAN T I, et al. A study of spectral-polarization characteristics of plant canopies using land-based remote sensing [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, **129**: 109-117.