

多光谱激光雷达数据强度校正及点云色彩优化

何东^{1,2}, 宋沙磊^{2*}, 王滨辉^{2,3}, 曹雄², 刘中正², 张金业¹

¹湖北工业大学理学院, 湖北 武汉 430068;

²中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北 武汉 430071;

³武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079

摘要 随着激光雷达成像技术的发展,采用超连续谱激光作为光源的多光谱激光雷达系统可同步探测多个光谱通道的回波信号,从而可直接获取具有空间-光谱信息一体化的点云数据。对于多光谱激光雷达点云数据,采用强度校正、色彩重建和色彩优化方法并通过多光谱激光雷达的强度校正模型从原始点云中获取精确的点云强度;通过色彩重建方法来获取彩色点云,并采用多项式回归算法来优化点云的色彩信息。实验结果表明,所提方法可以有效校正距离和角度效应对强度的影响,可以获取近似真实场景的彩色点云;经过色彩的优化处理,进一步提高彩色点云的质量,使其与真实场景之间的色差降低到人眼可接受的误差范围(色差小于 10)。

关键词 遥感;多光谱激光雷达;彩色点云;强度校正;色彩优化

中图分类号 P237

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1110004

1 引言

激光雷达系统因其具有极高的空间分辨率,已发展成为获取精确空间信息的一种有效设备^[1],广泛应用在土地覆盖分类^[2]、建筑物提取^[3]和地形测绘^[4]等领域。激光雷达系统通常以单波长的工作方式为主,其可以获取具有高精度空间信息的点云数据,但无法探测到目标的光谱信息,只能重建出目标的三维灰度点云影像^[5]。然而,随着遥感测绘技术的发展,获取目标的空间和光谱信息数据以及重建三维彩色影像已成为遥感测绘的迫切需求之一^[6],激光雷达系统为解决这个需求提供了可行的途径。

激光雷达系统可以获取探测目标的彩色点云数据以及重建三维彩色影像,当前主要是通过单波长激光雷达系统所获取的三维点云数据与多光谱或彩色相机所获取的影像数据的融合方式来实现的^[7-8]。但是点云数据与影像数据是通过两套探测器来获取的,两种数据的融合存在点与面空间位置不对等而造成配准误差的问题,同时影像数据受到光照的影响较大,这也为数据的融合增加了困难^[9]。然而,随

着超连续谱激光技术的发展,使用具有宽谱的多/高光谱激光雷达系统直接获取目标的空间和光谱一体化信息已逐渐发展成为一种新趋势^[10-11]。多/高光谱激光雷达系统通过发射超连续谱激光来覆盖整个可见光波段以扫描目标,通过多通道来探测目标的空间-光谱一体化信息的点云数据。空间信息与光谱信息的一一对应解决了融合被动影像数据所面临的问题,在理论上为获取目标的彩色点云提供了一种可能。

为了实现多光谱激光雷达系统获取彩色点云,本课题组前期致力于多光谱激光雷达系统的研制,已自主研发出可用于重建彩色点云的多光谱激光雷达系统^[12]。区别于单色激光雷达系统侧重于获取目标的几何结构,多光谱激光雷达系统不仅关注了目标几何结构的获取,而且更侧重于获取目标的光谱强度信息。目前,对点云数据使用波形分解^[13]等处理手段来提取带有强度的点云,但是点云的强度受到激光入射角和距离效应^[14]的影响而出现失真,故需要对其进行校正处理,才可以得到较精确的强度。根据色彩重建的理论^[15],利用校正后的点云强

收稿日期: 2020-11-17; 修回日期: 2020-12-23; 录用日期: 2021-01-04

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504500)、国家自然科学基金(41571370)

*E-mail: songshalei@wipm.ac.cn

度来重建点云色彩。因为基于强度重建的点云色彩与多光谱激光雷达系统的探测原理相关,所以与人眼所观察的目标真实颜色不可能完全一致,故需要对其进行优化。针对上述问题,近年来国内外科研人员提出了 Oren-Nayar 模型^[16]和 Phong 模型^[17]等强度校正模型,以及基于多项式回归和神经网络映射等色彩优化方法^[18-19],这为本文的研究提供了可行的思路。

本文首先提出一种适用于多光谱激光雷达点云数据的强度校正模型,该模型充分考虑到入射角和距离效应对各通道点云强度的影响,设置合适的模型参数以实现对各通道点云强度的校正。然后,根据颜色重建的理论提出利用校正后的点云强度重建点云色彩的方法,实现点云的色彩重建。最后,采用多项式回归算法对重建的点云色彩进行优化并进行色差分析,从而获取色彩真实度较高的彩色点云。

2 原理方法

2.1 多光谱激光雷达点云数据的强度校正

使用本课题组自主研发的多光谱激光雷达系统进行探测,其具有三个探测通道,分别探测 612.0~644.0 nm(红)、517.0~537.0 nm(绿)和 434.5~474.5 nm(蓝)三个光谱波段。根据激光雷达方程^[15]与系统光电响应^[20],同时考虑到多光谱激光雷达系统的多波长和多通道探测的特点,多光谱激光雷达系统在通道 C 下的强度方程可以表示为

$$I_C = \frac{D_r^2 \eta_{\text{sys}} \eta_{\text{atm}}}{d^2 \beta_i^2} \cos \theta \int P_i(\lambda) \rho(\lambda) \tau(\lambda) l(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中: λ 为波长; C 为多光谱激光雷达系统的探测通道; I_C 为通道 C 在对应波长下所探测的强度值; D_r 为接收孔径; θ 为激光的入射角; d 为探测器与目标之间的距离; β_i 为激光波束的宽度; η_{sys} 为系统的衰减系数; η_{atm} 为大气的衰减系数; $P_i(\lambda)$ 为发射光功率分布; $\tau(\lambda)$ 为滤光系统的透射率; $l(\lambda)$ 为光电探测器的响应函数; $\rho(\lambda)$ 为对应波长下的目标光谱反射率。

在多光谱激光雷达系统的强度方程中,点云强度取决于激光光源的光谱功率、探测波段和接收系统光电响应等探测特性。同时,多光谱激光雷达系统的距离和角度效应的结论:点云的强度与探测距离的平方成反比以及与角度的余弦呈线性关系,这会导致探测不同角度和距离下的相同色彩目标的强度出现误差。为了校正多光谱激光雷达点云的强度,根据(1)式建立一种适合于多光谱激光雷达点云

强度数据的校正模型,表达式为

$$I_{C\text{-calibration}} = k_C \frac{\cos \theta_{\text{rf}}}{\cos(a_C \theta_i + b_C)} \times \frac{d_i^{2v_C}}{d_{\text{rf}}^2} \times I_C, \quad (2)$$

式中: $I_{C\text{-calibration}}$ 为校正后探测通道 C 的强度值; θ_i 和 d_i 分别为激光的入射角和探测距离($0^\circ \leq \theta_i < 90^\circ$); θ_{rf} 和 d_{rf} 分别为垂直于目标的激光入射角和探测距离($\theta_{\text{rf}} = 0^\circ, d_{\text{rf}} = 3 \text{ m}$); a_C, b_C, k_C 和 v_C 为强度校正的模型参数。

根据(2)式可知,该校正模型将所有 θ_i 和 d_i 下探测的强度校正到 θ_{rf} 和 d_{rf} 下。考虑到实际多光谱激光雷达系统的角度和距离效应与(1)式中的偏差,设定了合理的模型参数,使模型更适用于实际探测点云强度的校正。

2.2 点云的色彩重建及优化

多光谱激光雷达系统的点云强度经过校正后,可以获得比较精确的且含有光谱信息的强度数据,但此强度不能直接表示出点云色彩。根据(1)式可知,校正的点云强度是由多光谱激光雷达系统探测特性的共同作用产生的结果。在色彩的重建理论中,点云强度的产生过程可以模拟人眼视觉的形成过程^[15],为此提出了点云强度重建色彩的方法。在重建颜色前,首先需要定义一个颜色空间,该颜色空间与激光雷达系统的探测特性相关,表示重建色彩的范围。将重建点云的颜色 RGB(Red, Green, Blue)值定义在颜色空间 MSL-RGB(Multispectral LiDAR-RGB)内。在此颜色空间内,多光谱激光雷达系统重建目标的 RGB 值与强度呈线性相关,强度归一化后映射在 $[0, 255]$ 的颜色区间上,即可得到点云的色彩。因此,在颜色空间 MSL-RGB 内,多光谱激光雷达系统利用探测通道 r, g 和 b 校正后的强度 $I_{r\text{-calibration}}, I_{g\text{-calibration}}$ 和 $I_{b\text{-calibration}}$ 来重建点云的 RGB 值,表达式为

$$\begin{cases} R_{\text{MSL}} = \frac{I_{r\text{-calibration}}}{I_{\text{rf-r}}} R_0 \\ G_{\text{MSL}} = \frac{I_{g\text{-calibration}}}{I_{\text{rf-g}}} G_0 \\ B_{\text{MSL}} = \frac{I_{b\text{-calibration}}}{I_{\text{rf-b}}} B_0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $R_{\text{MSL}}, G_{\text{MSL}}$ 和 B_{MSL} 分别为校正后的 MSL 回波强度重建点云的 RGB 值; $I_{\text{rf-r}}, I_{\text{rf-g}}$ 和 $I_{\text{rf-b}}$ 分别为各通道强度归一化的参考强度; R_0, G_0 和 B_0 为强度到色彩的映射系数。

虽然利用校正后的点云强度重建出点云的色彩,但是受到多光谱激光雷达系统探测原理的影响,重建的色彩与目标在人类视觉中所形成的色彩存在

色差^[18]。因此,需要进一步对 MSL 重建的点云色彩进行优化以获取真实度更高的彩色点云。

采用多项式回归算法来优化点云色彩,其校正过程采用多项式变换方法从一系列的训练色中使用

参数化函数来得到最优的映射矩阵,再通过映射矩阵将 RGB 从 MSL-RGB 颜色空间中映射到与设备无关的标准颜色空间(sRGB)内^[18-19]。多项式变换模型可以表示为

$$\mathbf{S} = \mathbf{V} \times \mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} R_1 & G_1 & B_1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_n & G_n & B_n & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{m \times n} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3n} \end{bmatrix}_{3 \times n}^T, \quad (4)$$

式中: \mathbf{S} 为 sRGB 标准空间内色彩 RGB 值的矩阵; \mathbf{A} 为映射系数矩阵; \mathbf{V} 为 R、G 和 B 互相组合的多项式矩阵。

多项式有 RG 、 RB 、 GB 、 R^2 、 G^2 、 B^2 和 RGB 等组合,多项式变换的思想为多项式矩阵 \mathbf{V} 添加上述多项式中的一项或多项来提高变换精度。通过最小二乘法来求解多项式变换精度最高的映射矩阵 \mathbf{A} , 表达式为

$$\mathbf{A} = [(\mathbf{V}^T \mathbf{V})^{-1} \mathbf{V}^T \mathbf{S}]^T, \quad (5)$$

式中: \mathbf{V}^T 为 \mathbf{V} 的转置矩阵; \mathbf{V}^{-1} 为 \mathbf{V} 的逆矩阵。通过映射矩阵 \mathbf{A} 就可以对(3)式中重建的多光谱激光雷达点云色彩进行优化。

为了评估点云色彩的真实性和引入色差来评估目标真实颜色和点云数据颜色之间的差异。颜色评估中,均匀颜色空间($L^*a^*b^*$)常用来对颜色进行色差分析,计算色差的过程中需将颜色从 RGB 颜色空间转换到 $L^*a^*b^*$ 空间^[19], 色差可以表示为

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}, \quad (6)$$

式中: L_1^* 和 L_2^* 为明度指数; a_1^* 、 b_1^* 、 a_2^* 和 b_2^* 为色品指数,可以表示 $L^*a^*b^*$ 颜色空间内的三维坐标。当 ΔE_{ab}^* 值越小时,点云数据颜色与真实颜色之间的色差越小,色彩真实度越高。根据国际标准 ISO12646:2008^[21] 可知,对于显示器上显示的彩色,

当色彩的 $\Delta E_{ab}^* \leq 6$ 时,则认为是相同的色彩;最大可接受色差为 10。因此,当点云数据在显示器上显示时,实验以色差不大于 10 作为色差可接受范围。

3 实验结果与分析

3.1 实验场景及对象

为了验证所提方法的优化效果,使用多光谱激光雷达系统在黑暗环境中对特定目标进行探测。首先定点探测标准朗伯板,采集各个训练角度和距离下的强度数据,用于求解强度以校正模型。然后采集点云数据,扫描探测的目标如图 1 所示。图 1(a) 为标准色卡,尺寸为 30 cm × 20 cm,由 24 个具有真实 RGB 值的彩色方块组成,色卡的点云数据可以重建色卡的彩色点云。点云色彩优化后,可计算优化前后点云色彩与真实色彩之间的色差,用来验证优化效果。图 1(b) 为地图图片,尺寸为 200 cm × 150 cm,色彩丰富,纹理清晰。实验选取图 1(b) 中的 5 个色彩特征明显区域作为地图点云数据的观测点,区域‘1’为地图上的高原和戈壁等地形;区域‘2’为平原和森林等地形;区域‘3’为海洋区域;区域‘4’为天空区域;区域‘5’为小国旗和字体。同时,地图尺寸较大,角度和距离效应对点云强度的影响很大,点云数据可用于验证强度校正模型的有效性。



图 1 实测对象的照片。(a) 24 标准色卡;(b) 地图

Fig. 1 Photographs of measured objects. (a) 24 standard color card; (b) map

3.2 多光谱激光雷达系统强度校正模型及结果

为了求解(2)式中校正模型的参数,多光谱激光雷达系统所获取的 r 、 g 和 b 三通道强度数据随激光入射角 θ 和探测距离 d 的变化关系及其曲线拟合

方程如图 2 所示,其中横轴分别表示激光入射角和探测距离,对应拟合方程中的 x ,纵轴表示强度的归一化值,对应拟合方程中的 y 。

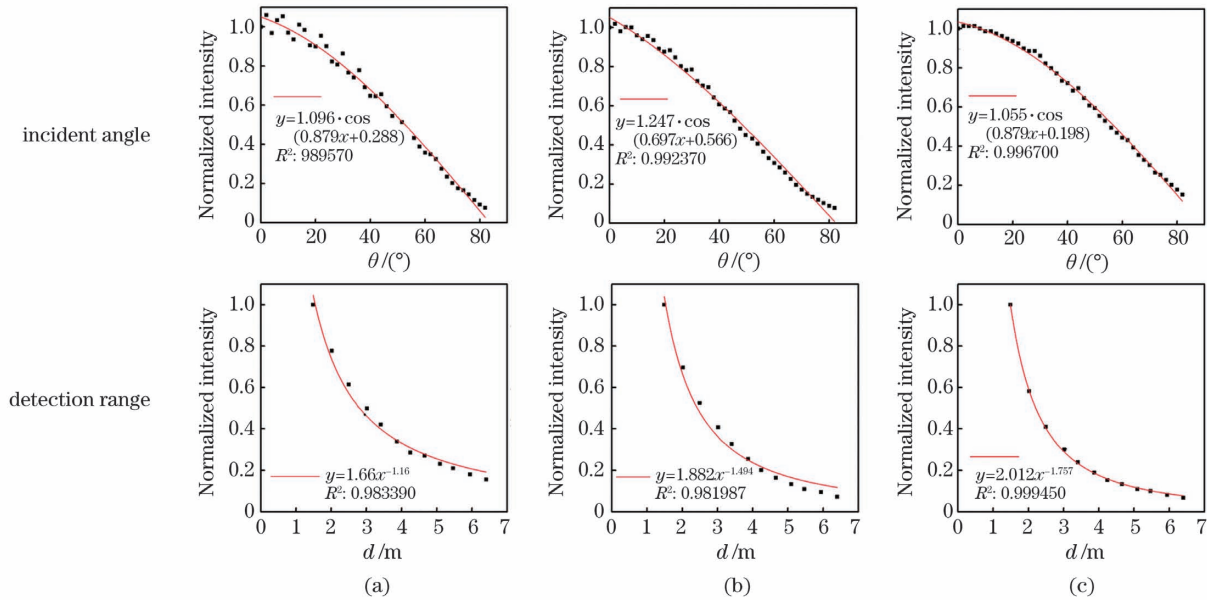


图 2 不同通道的强度与不同参数的关系。(a) r 通道;(b) g 通道;(c) b 通道

Fig. 2 Relationship between intensity of different channels and different parameters. (a) r channel; (b) g channel; (c) b channel

从图 2 可以看到,各通道数据所对应的拟合精度 R^2 依次为 0.989570、0.992370、0.996700、0.983390、0.981987 和 0.999450, R^2 均在 0.98 以上,表明图 2 的曲线方程可以很好地描述激光强度与激光入射角和探测距离的关系。因此,通过图 2 的拟合方程可以求解(2)式中的模型参数 a_c 、 b_c 、 k_c 和 v_c 。基于求解的强度校正模型参数并结合(2)式,多光谱激光雷达系统在 r 、 g 和 b 三通道的强度校正模型可以表示为

$$\begin{cases} I_{r\text{-calibration}} = 0.659 \times \frac{d^{-1.16}}{\cos(0.879\theta_i + 0.228)} \times \frac{I_r}{9} \\ I_{g\text{-calibration}} = 0.663 \times \frac{d^{-1.494}}{\cos(0.697\theta_i + 0.556)} \times \frac{I_g}{9} \\ I_{b\text{-calibration}} = 0.524 \times \frac{d^{-1.757}}{\cos(0.879\theta_i + 0.198)} \times \frac{I_b}{9} \end{cases} \quad (7)$$

为了验证校正模型的有效性,对图 2(b)中 r 、 g 和 b 三通道点云数据的强度信息进行校正,结果如图 3 所示。从图 3(a)可以看到,校正前点云数据的强度十分微弱,大部分在 0.4 以下,强度没有反映出地图中的清晰纹理信息(比如区域‘1’与区域‘2’和区域‘2’与区域‘4’的分界线);而且 r 、 g 和 b 三

道在区域中的强度很弱,区域中的图像特征几乎无法看清。

从图 3(b)可以看到,校正后的点云数据的强度整体上变强,各种纹理十分清晰,可以分辨出区域‘1’与区域‘2’和区域‘2’与区域‘4’的边界,并且 r 、 g 和 b 三通道在区域中的强度明显增强,图像特征清晰。校正后的结果与多光谱激光雷达系统的探测原理更相符,证明强度校正模型可行。

3.3 多光谱激光雷达点云色彩重建结果及优化

图 2 的点云数据经过强度校正后,重建的彩色点云如图 4 所示。从图 4 可以看到,重建的 24 色彩点云与色卡相比,整体色彩十分接近,验证了重建目标点云色彩方法的可行性,稍显不足的是整体上的色彩不如色卡实物图像鲜艳,个别色块(如 2、18 和 24)的色彩有些细微偏差;地图的彩色点云整体上与真实图像的相似度很高,图上‘1’、‘3’、‘4’和‘5’区域基本可以识别,只是整体色彩稍微偏暗,区域‘2’在原图中的深绿色几乎变成黑色,区域‘5’中的地名(如武汉和北京)还比较模糊。

采用多项式回归算法对重建的色卡彩色点云进行优化。由于各个同色色块内的点云色彩表现一致,但在数据上的 RGB 值并不完全一致,因此选取

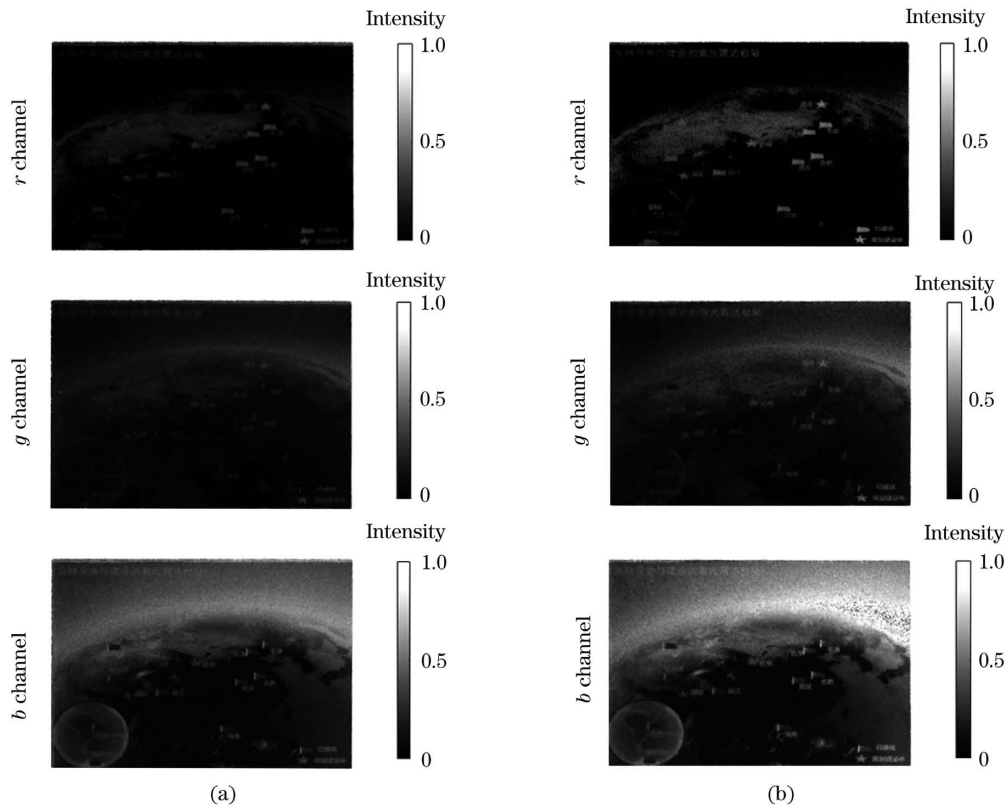


图 3 多光谱激光雷达点云数据的强度校正。(a)原始点云;(b)强度校正后的点云

Fig. 3 Intensity correction of multi-spectral LiDAR point cloud data. (a) Original point cloud; (b) intensity corrected point cloud

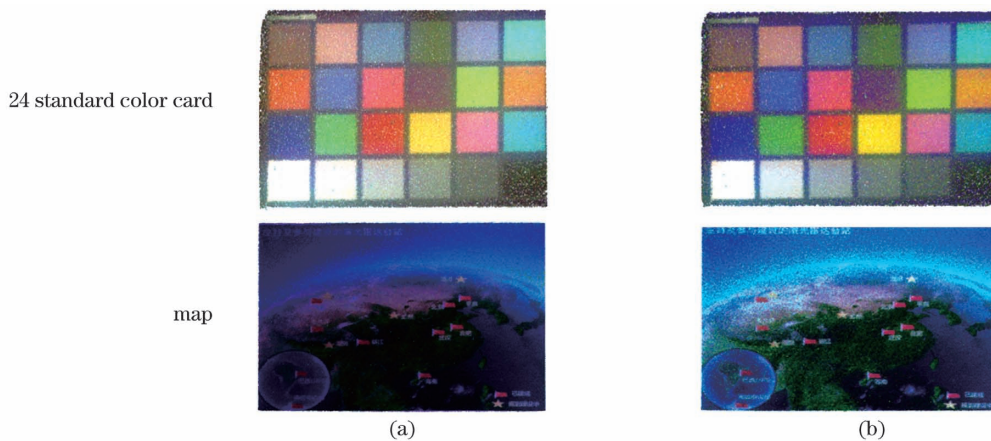


图 4 色卡及地图点云色彩的重建与优化结果。(a)色彩重建的点云;(b)色彩优化的点云

Fig. 4 Reconstruction and optimization of color card and map point cloud color. (a) Point cloud for colour reconstruction; (b) point cloud with color optimization

其各个色块 2000 个扫描点的 RGB 均值作为多项式优化算法的测试样本。多项式回归算法的求解结果:当选择多项式组合 $\mathbf{V}=[R \ G \ B \ R^2 \ G^2 \ B^2 \ 1]$ 时,

采用最小二乘法求解具有最小的误差平方和,经过多项式回归算法优化后,点云色彩的效果最好。所求解得到的映射系数矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2.0464 & 0.442305 & 1.330228 & -0.00421 & -0.00205 & -0.00754 & 1.39 \times 10^{-5} & -143.221 \\ -0.56413 & 4.403577 & 0.107174 & 0.00183 & -0.01082 & -0.00118 & 8.31 \times 10^{-6} & -239.442 \\ 0.243714 & -1.8851 & 2.203086 & -0.00156 & 0.004244 & -0.00429 & 1.19 \times 10^{-5} & 58.39277 \end{bmatrix} \quad (8)$$

使用优化矩阵 A 对图 4(a) 的色彩进行优化, 结果如图 4(b) 所示。从图 4(b) 可以看到, 从视觉效果上看, 优化色卡后的 24 色块处的色彩总体上更加鲜艳, 贴近真实, 其中色块 1、4、8、10、11、13、14 和 19 等色块的效果更好, 而且优化后的色块 2 和 18 的色差变小。从图 4(b) 的地图图片可以看到, 地图的彩色点云整体上比优化前更接近原图, 区域‘2’、‘3’和‘4’中的天空和海洋比优化前更清晰, 分界线更明显, 区域‘5’中地名(如武汉和北京)已经可以识别。因此, 以视觉效果定性分析, 多项式优化算法对点云色彩的优化具有效果。

为了进一步验证优化算法的有效性, 通过计算图 4(a) 中各色块 2000 点优化前后的色差, 定量分析优化后的点云色彩变化情况, 判断多项式优化算法的有效性, 结果如图 5 所示, 其中 ΔE_{ab1} 和 ΔE_{ab2} 分别表示 24 色卡的色彩优化前后的色差, $\Delta E_{ab} < 10$ 表示色差降到人眼可接受范围, $\psi(\Delta E_{ab} < 10)$ 表

示色差在人眼可接受范围内的点云比例。同一点云的 $\Delta E_{ab2}/\Delta E_{ab1} < 1$, 则表示优化后的色差降低, $\psi(\Delta E_{ab2}/\Delta E_{ab1} < 1)$ 表示优化后色差降低的点云比例。

从图 5(a) 可以看到, 24 色卡中有 19 个色块的 $\psi(\Delta E_{ab2}/\Delta E_{ab1} < 1)$ 值在 0.82 以上, 表示这 19 个色块优化后, 2000 个点中大部分色差减小, 整体色彩的真实度提高; 色块 1、6 和 24 有超过一半的点的色差减小, 色块 2 和色块 4 只有少部分色差减小。从图 5(b) 可以看到, 除了色块 2、4、6、19 和 20 的 $\psi(\Delta E_{ab1} < 10)$ 值很大, 其他 19 个色块的 ψ 值很小, 表明优化前 24 色卡整体上的色差明显超出了可接受范围, 优化后有 19 个色块的 $\psi(\Delta E_{ab2} < 10)$ 值上升, 其中 15 个色块的 $\psi(\Delta E_{ab2} < 10)$ 值在 0.7 以上, 表明优化后 24 色卡整体色块的色差明显下降到可接受范围内。上述结果表明, 优化算法在整体上对点云数据的色彩具备优化效果, 验证点云色彩优化算法的有效性。

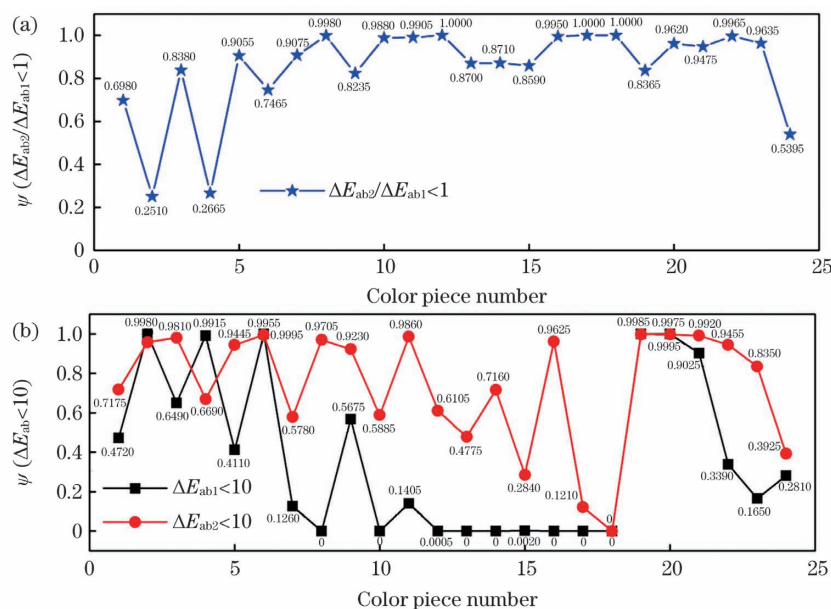


图 5 色卡各色块 2000 点优化前后的色差结果。(a) 色差降低比例; (b) 色差可接受比例

Fig. 5 Chromatic aberration results before and after 2000 point optimization of color card blocks. (a) Ratio of color difference reduction; (b) acceptable proportion of color difference

4 结 论

相对于单波长激光雷达数据与被动影像数据融合获取彩色点云的方式, 多光谱激光雷达系统在获取彩色点云上另辟蹊径, 多波长和多通道探测的多光谱激光雷达系统可以直接获取目标的空间-光谱信息一体化的点云数据。针对多光谱激光雷达系统的点云数据, 首先提出多光谱激光雷达点云数据的强度校正模型, 并通过实测点云数据来验证模型的

可行性, 为重建点云色彩奠定了基础。进一步提出点云色彩的重建及优化方法, 并对方法进行实验验证。实验结果表明, 该优化算法可明显提高多光谱激光点云的可视化效果。在未来的工作中, 将进一步提高点云色彩重建的精度, 使重建方法更普遍适用于复杂场景的重建。

参 考 文 献

- [1] Zhou Y H, Qiu F. Fusion of high spatial resolution

- WorldView-2 imagery and LiDAR pseudo-waveform for object-based image analysis[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 101: 221-232.
- [2] Cheng X J, Guo W, Li Q, et al. Joint classification method for terrestrial LiDAR point cloud based on intensity and color information[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1010007.
程效军, 郭王, 李泉, 等. 基于强度与颜色信息的地面 LiDAR 点云联合分类方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1010007.
- [3] Wang D L, Li Y. Building edge extraction from LiDAR point cloud based on rotational difference kernel estimation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0104005.
王岱良, 李玉. 基于旋转差值核估计的激光雷达点云建筑物边缘提取 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0104005.
- [4] Hui Z Y, Cheng P G, Guan Y L, et al. Review on airborne LiDAR point cloud filtering [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 060001.
惠振阳, 程朋根, 官云兰, 等. 机载 LiDAR 点云滤波综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 060001.
- [5] Man Q X. Fusion of hyperspectral and LiDAR data for urban land use classification[D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.
满其霞. 激光雷达和高光谱数据融合的城市土地利用分类方法研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [6] Shan J, Li Z X, Zhang W Y. Recent progress in large-scale 3D city modeling[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(12): 1523-1541.
单杰, 李志鑫, 张文元. 大规模三维城市建模进展 [J]. *测绘学报*, 2019, 48(12): 1523-1541.
- [7] Brell M, Segl K, Guanter L, et al. 3D hyperspectral point cloud generation: fusing airborne laser scanning and hyperspectral imaging sensors for improved object-based information extraction[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 149: 200-214.
- [8] Feng L, Wei L D, Yang L, et al. Design of double-channel hyperspectral imaging system based on curved prism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0511002.
冯蕾, 魏立冬, 杨雷, 等. 双通道曲面棱镜高光谱成像系统设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0511002.
- [9] Chen B W, Shi S, Sun J, et al. Hyperspectral lidar point cloud segmentation based on geometric and spectral information [J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24043-24059.
- [10] Zhang Y, Zhao Y, Wu X M, et al. Advancement on multi-spectrum detecting and laser multi-spectrum detecting technology [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 188-191.
张宇, 赵远, 吴晓敏, 等. 多光谱探测与激光多光谱探测技术的进展 [J]. *激光技术*, 2007, 31(2): 188-191.
- [11] Krzysztow B. Multispectral airborne laser scanning-a new trend in the development of lidar technology[J]. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 2015, 27: 25-44.
- [12] Song S L, Wang B H, Gong W, et al. A new waveform decomposition method for multispectral LiDAR [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 149: 40-49.
- [13] Wang B H, Song S L, Gong W, et al. Color restoration for full-waveform multispectral LiDAR data[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 593.
- [14] Höfle B, Pfeifer N. Correction of laser scanning intensity data: data and model-driven approaches[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(6): 415-433.
- [15] Noordijn M N M J, Mat Isa N A, Lim W H. Saturation avoidance color correction for digital color images [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, 76(7): 10279-10312.
- [16] Carrea D, Abellan A, Humair F, et al. Correction of terrestrial LiDAR intensity channel using Oren-Nayar reflectance model: an application to lithological differentiation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 113: 17-29.
- [17] Ding Q, Chen W, King B, et al. Combination of overlap-driven adjustment and Phong model for LiDAR intensity correction [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 75: 40-47.
- [18] Wang X Z, Zhang D. An optimized tongue image color correction scheme [J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2010, 14(6): 1355-1364.
- [19] Haeghen Y V, Naeyaert J M A D, Lemahieu I, et al. An imaging system with calibrated color image acquisition for use in dermatology [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2000, 19(7): 722-730.
- [20] Qian L Y, Wu D C, Zhou X J, et al. Radiation calibration and ground object information acquisition based on high spectral imaging lidar system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1128001.
钱立勇, 吴德成, 周晓军, 等. 高光谱成像激光雷达系统辐射定标和地物信息获取 [J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1128001.
- [21] International Standard Organization. Graphic

technology-displays for colour proofing-characteristics and viewing conditions: ISO 12646: 2008 [S/OL]. [2020-11-16]. [https://www.baidu.com/link?url=](https://www.baidu.com/link?url=8IIALtVsnCs4JUj91BGNkzck3EvgIwJyyyQ0q3ECnP-dhV3-MLdd3jMBPkMnVnPRg&wd=&eqid=c272db8c0044b0d90000000460aa545b)

8IIALtVsnCs4JUj91BGNkzck3EvgIwJyyyQ0q3ECnP-dhV3-MLdd3jMBPkMnVnPRg&wd=&eqid=c272db8c0044b0d90000000460aa545b.

Multispectral LiDAR Data Intensity Calibration and Point Cloud Color Optimization

He Dong^{1,2}, Song Shalei^{2*}, Wang Binhui^{2,3}, Cao Xiong², Liu Zhongzheng², Zhang Jinye¹

¹ School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China;

² Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Science, Wuhan, Hubei 430071, China;

³ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

Abstract

Objective With the development of light detection and ranging (LiDAR) imaging technology, LiDAR imaging from monochromatic detection to multihyperspectral detection has developed into a new trend. Monochrome laser radar point clouds, different from traditional camera or multispectral image data fusion for visual color point cloud, the continuous spectrum of a laser as the light source of multispectral laser radar system can be synchronous detection more spectral channels of the echo signal, which can be directly obtained, have spatial and spectral information integration of point cloud data. This new type of point cloud data, which contains space spectrum information, lays a foundation for realizing three-dimensional point cloud color visualization imaging. Besides, it suggests higher requirements for quality control of the point cloud. This study uses intensity correction, color reconstruction, and color optimization methods to process the point cloud data of the multispectral LiDAR to obtain high-quality visual color point clouds. We believe that our method and research results can be useful for studying the direct acquisition of visual color point clouds by LiDAR.

Methods In this study, the point cloud data of our self-developed multispectral LiDAR is considered the research objective. First, an intensity correction model based on the LiDAR equation is proposed. By setting model parameters suitable for multispectral LiDAR, the influence of the angle and distance effect on point cloud intensity is corrected to lay a foundation for visual color point cloud reconstruction. Then, according to the theory of color reconstruction and considering the characteristics of the laser light source spectral power, detection wavelength, and the photoelectric response of the multispectral LiDAR system, a method of using the corrected intensity to reconstruct the color of the point cloud is proposed to realize the color reconstruction of the multispectral LiDAR point cloud. The color of the reconstructed point cloud is optimized using the polynomial regression algorithm to achieve the acquisition of a high-quality visual color point cloud. The color difference analysis of the point cloud before and after optimization is conducted to verify the proposed algorithm feasibility.

Results and Discussions The intensity correction model of the multispectral LiDAR is established to effectively correct the distance and angle effects on the intensity. The regression accuracy of each channel correction model is above 0.98 (Fig. 2). After the original point cloud correction of the target in the scene, the point cloud strength is significantly enhanced, and the details are highlighted overall (Fig. 3). Through the color reconstruction method, the point cloud intensity information of the corrected target is used to obtain the color point cloud that approximated the real scene (Figs. 4 (a)). The polynomial regression algorithm is used to obtain the optimal mapping matrix from a series of training colors using parameterized functions. Besides, the matrix is used to optimize the color information of the point cloud, further improving the quality of the color point cloud (Figs. 4 (b)). The color difference analysis shows that the color difference between the optimized point cloud color and the real scene reduces to the error range acceptable to the human eye (the color difference is less than 10) (Fig. 5).

Conclusions Compared with the fusion of single wavelength LiDAR and passive image data to obtain visual color

point clouds, multispectral LiDAR has a new approach for obtaining color point clouds. The multispectral LiDAR with multiwavelength and multichannel detection can directly obtain the point cloud data with integrated space-spectral information of the target. Aiming at the point cloud data of the multispectral LiDAR, this study first proposes the intensity correction model of the point cloud data of the multispectral LiDAR, and the feasibility of the model is verified by the measured point cloud data, which lay a foundation for color point cloud reconstruction. Besides, a color reconstruction and optimization method for a point cloud is proposed. The experimental results show that the color point cloud with a certain visual effect is obtained using the color reconstruction and optimization method for the point cloud. The optimization algorithm can significantly improve the visual effect of the multispectral laser point cloud. In the future study, the accuracy of color reconstruction of high point clouds will be further improved, making the reconstruction method more applicable to the reconstruction of complex scenes.

Key words remote sensing; multispectral LiDAR; color point cloud; intensity correction; color optimization

OCIS codes 280.3640; 110.4234; 100.3008