doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.005

果树冠层三维点云颜色矫正方法研究*

郭彩玲^{1,2} 宗 泽¹ 张 雪¹ 马晓丹¹ 刘 刚¹
 (1.中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室,北京 100083;
 2.唐山学院机电工程系,唐山 063000)

摘要:针对地面三维激光扫描仪在室外环境下获取果树冠层三维点云信息的复杂性,以及三维点云的颜色和真实颜色存在较大色差问题,提出了一种三维点云颜色矫正方法。通过计算 Pearson 系数和 Spearman 相关系数,确定扫描点的 *R*、*G*、*B*分别与太阳辐射值、TCCR24 标准颜色测试板与地面夹角 θ、TCCR24 标准颜色测试板不同色块颜色、扫描质量、光线方向变量之间均存在相关关系。利用统计学方法,在置信度为 95%时,建立 *R*、*G*、*B*分量的双重筛选逐步回归模型。利用建立的回归模型,矫正三维点云颜色。采用该方法对室外果树冠层三维点云进行颜色矫正实验,结果表明,利用建立的颜色矫正回归模型,三维点云颜色 *R*、*G*、*B* 与真实颜色 *R*、*G*、*B* 的相关度由矫正前的低于 0.69 提高到 0.90 以上,颜色矫正后的标准差明显由矫正前的高于 50% 降到低于 13%。该方法可为地面三维扫描仪获取较准确的三维点云的彩色信息提供理论依据。

关键词:果树冠层 三维点云 颜色矫正 多元线性回归 中图分类号:TP391.41 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2015)S0-0027-08

Research of 3D Points Cloud Color Correction Method for Fruit Tree Canopy

Guo Cailing^{1,2} Zong Ze¹ Zhang Xue¹ Ma Xiaodan¹ Liu Gang¹

 Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China 2. Department of Electromechanical Engineering, Tangshan University, Tangshan 063000, China)

Abstract: There are large differences between the actual colour of fruit trees canopy and the point cloud from the ground three-dimensional laser scanner in the complex outdoors environment. In order to solve this problem, a new color correction method for color correction was proposed. Firstly, the Pearson coefficient and Spearman correlation coefficient were calculated to make sure that there are relationships among the R, G, B values of the scanning spot and the R, G, B values of the 24-Patch Color Checker Chart Classic, the solar radiation values, the angle θ between 24-Patch Color Checker Chart Classic and the earth, scan quality, and light direction variables. And then, with confidence level of 95%, an R, G, Bcomponents multiple regression model was established by using the dual-sifting stepwise regression in statistical method. Lastly, the model was used to correct three-dimensional points cloud colors. The experiment results show that, using the three-dimensional point correlation regression model, the correlation coefficient between the three-dimensional point cloud color R, G, B value and the real R, G, Bvalues increased from less than 0.69 to above 0.90 after correction, and color-corrected standard deviation fell significantly from above 50% to below 13%. The method could be used to provide a theoretical basis for terrestrial laser scanning to obtain more accurate three-dimensional color points cloud.

Key words: Fruit tree canopy 3D point cloud Color correction Multiple linear regression

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-11

^{*} 国家自然科学基金资助项目(31371532)

作者简介:郭彩玲,博士生,唐山学院副教授,主要从事自动化与信息化技术研究,E-mail: gcl@ cau.edu.cn

通讯作者:刘刚,教授,博士生导师,主要从事电子信息技术在农业中的应用研究, E-mail: pac@ cau. edu. cn

引言

地面三维激光扫描仪可以快速获取地面物体表 面三维点云信息,其信息既包含了模型的空间坐标、 法向量等几何信息,有的激光扫描仪还包括颜色信 息。该仪器在隧道、文物、地图、桥梁、监测等领域得 到广泛应用^[1-4]。随着地面三维激光扫描技术的成 熟以及成本的降低,在林业^[5-7]、农作物^[8-11]、畜牧 业^[12-13]等领域也逐渐开展了应用性研究。上述研 究在利用三维点云建模上,主要用到了几何信息。

随着研究的深入,三维点云的应用研究已经不 再局限于点云能表达目标物外形,还需要颜色信息, 才能更好满足三维模型真实感的要求。Adams 等^[14]提出基于点云模型的三维物理表面着色系统。 随之对于点云颜色的研究成为热点。但是由于点云 颜色配准误差的存在,地面三维激光扫描仪获取的 原始彩色点云反映物体表面的颜色存在一定的误 差。Reinhard 等^[15]提出适用于单一颜色的颜色转 移法,用于纠正扫描颜色误差。与此同时,针对不同 颜色的误差影响,许多研究也提出了新的算法。 Welsh 等^[16]提出了 swatch-based 方法, Wen 等^[17]提 出了高斯概率加权颜色传输方法,Li等^[18]研究了对 数空间点云的颜色配准问题。但这些研究仅限于二 维扫描下的颜色研究,因三维点云含有深度信息,在 颜色和深度信息进行配准时,前述方法对误差矫正 不明显。文献[19-22]研究了扫描仪颜色、入射 角、物体表面粗糙度对点云精度的影响,但是研究均 在实验室条件下进行,对于室外复杂环境条件下,利 用地面激光三维扫描仪获取果树冠层三维点云的颜 色信息,其颜色的矫正技术问题,将会成为相关应用 领域的一个新的研究内容。

在室外环境下,物体表面的颜色与真实颜色误 差较大,课题组在之前研究果树冠层三维点云颜色 时,采用了"顶式法"获取点云数据,试图减少室外 环境下太阳光照对点云颜色的影响。为了矫正室外 环境下果树冠层三维点云颜色的误差,本文尝试用 统计学的方法建立多元回归模型,建立太阳光照、不 同入射角、果树冠层与扫描仪方向等参数之间的相 关关系,来预测果树冠层叶片颜色。

1 材料与方法

为了提高室外环境下获取果树冠层三维点云颜 色配准的准确性,本文针对不同人射角对点云颜色 配准的影响,研究不同太阳辐射值下获取的 TCCR24标准颜色测试板三维点云误差特性,分析 该扫描仪在果树冠层扫描中的颜色配准精准程度, 提出果树冠层三维点云颜色矫正方法。

1.1 实验设计

2015 年 7—8 月在中国农业大学苹果采摘机器 人实验基地(北京市昌平区南口镇辛力庄村)内,开 展三维点云颜色配准精确程度的研究工作。果园苹 果树株距 2.5 m,行距 5 m,树高 3.4 m,行间生草,灌 水条件良好,采用常规管理方式进行冬季修剪。本 文的研究对象是树龄 6 a 的自由纺锤形富士苹果 树。

为了减少风对三维点云噪声的影响,实验选择 无风或者微风的天气,并采用图1所示实验现场中 自行设计的挡风板,最大限度地保证被测果树冠层 处于静止状态。



图 1 实验现场 Fig. 1 Experimental scene

为了获取太阳辐射值相差较大时的三维点云色 彩信息,利用 FARO 130 型地面三维激光扫描仪获 取了间隔为7d的晴天和阴天时的 TCCR24标准颜 色测试板和苹果树叶幕成型期果树冠层的三维点云 数据。实验扫描仪安置示意图如图2所示。该扫描 仪距离树干中心位置5.5m,扫描仪使用状况设置 为户外0~20m,考虑是户外扫描,设置扫描仪分辨 率为1/4,TCCR24标准颜色测试板中心和 FARO 130型地面三维激光扫描仪激光发射中心在同一水 平线,距离地面高度均为1.6m,扫描激光定位高度



Fig. 2 Scanner resettlement

为目标物树冠顶部。

1.2 三维点云数据预处理

由于外界太阳辐射具有随天气变化而变化的特征,为了能够获得不同太阳辐射和不同果树树冠叶 片对点云配准的影响,选择叶幕成型期的某一周时 间,扫描得到了晴天和阴天自然天气条件下, TCCR24标准颜色测试板和苹果树树冠的点云数 据。从图3原始扫描点云图中看出,晴天时,扫描目 标物颜色发白,阴天时,扫描目标物颜色发黑。



图 3 原始扫描点云 Fig. 3 Original points cloud (a)晴天 (b)阴天

苹果树叶片正反面的颜色不同,叶片与地面夹 角也不同,获取的三维点云颜色存在差异性,即叶片 入射角影响点云颜色。在进行地面三维激光扫描实 验时,扫描仪扫描距离相对树冠位置不变的情况下, 逐渐改变 TCCR24 标准颜色测试板与地面的角度, 获取与地面呈 30°、60°、90°不同夹角的扫描点云。

利用 Realworks 9.0 软件根据步长获得采样扫描点云数据,并提取标准颜色测试板中每个色块的三维点云 *R*、*G*、*B* 分量和扫描强度。

2 实验与结果分析

2.1 实验

2.1.1 太阳辐射对三维点云颜色的影响

为了表示不同太阳辐射值对三维点云颜色的影响,统计了在太阳辐射值相差较大的晴天和阴天状态下,地面三维激光扫描仪获取的TCCR24标准颜色测试板三维点云的 R、G、B。图4为上午10:00至10:30,连续3次扫描后,晴天(太阳辐射平均值为630W/m²)和阴天(太阳辐射平均值为564W/m²)状态下,该色板 24个色块的三维点云的平均 R、G、B 以及色板的标准 R、G、B 统计图。

从图 4 可以看出,晴天扫描的 *R*、*G*、*B*均大于 TCCR24 标准颜色测试板的 *R*、*G*、*B*,阴天则相反,说 明扫描仪扫描的三维点云的 *R*、*G*、*B*和太阳辐射具 有相关性。

2.1.2 其他室外环境对三维点云颜色的影响

室外环境下,由于风速、自然光线的变化,加之 激光回波入射角的不同,地面三维激光扫描仪器获 得的点云颜色发生了较大变化。实验中,采用了挡 风板遮挡风,使后续分析不考虑风速的影响。

将前述提取的标准颜色测试板中每个色块的三 维点云随机取出150~250个点的*R*、*G*、*B*,去除噪声 点,得到48182个点,以扫描点*R*、*G*、*B*,TCCR24标 准颜色测试板*R*、*G*、*B*,太阳辐射值,测试板与地面 夹角θ作为矩阵变量,以扫描质量作为标记变量作 出矩阵散点图如图5所示。

从图 5 可以看出,对于离散变量而言,光线方向 包括顺光扫描和逆光扫描,对扫描点的 R、G、B 也存 在较大的影响,即顺光扫描和逆光扫描时,扫描点的 R、G、B 分量均高于逆光扫描获得的扫描点 R、G、B 分量;另一个离散变量就是扫描仪扫描质量对点云 颜色的影响,实验获取了 1X(低质量)、3X(中等质 量)、4X(中等质量)、6X(高质量)4 种扫描质量的





图 5 K, G, B 取尽图 Fig. 5 Scatter diagram of R, G, B

(a) R (b) G (c) B

点云,图中分别用不同颜色代表了不同的扫描质量, 实验结果分析表明,在中等质量下扫描获得的三维 点云 R、G、B相对误差小一些。

以本文实验设计获取的三维点云信息为样本, 设定扫描仪获得的三维点云第*i*个点的*R*、*G*、*B*值 为*Y_{ri}、Y_{gi}、Y_{bi},设X_{ri}、X_{gi}、X_{bi}为与扫描<i>R*、*G*、*B*有关的 一组自变量,表示三维点云中第*i*个扫描点的*R*、*G*、 *B*,这些样本参数配对形成(*X_{ri}*,*Y_{ri}*),(*X_{gi}*,*Y_{gi}*), (*X_{bi}*,*Y_{bi}*),*i*=1,2,…,*n*,将这些配对值分别排序,评 出各自在样本中的位置记为*X'_{ri}*和*Y'_{ri}、X'_{gi}*和*Y'_{gi}、X'_{bi}* 和*Y'_{bi}*,用*d_{ri}、d_{gi}、d_{bi}*度量其相关程度,即

$$d_{ri} = X'_{ri} - Y'_{ri}$$
(1)
$$d_{gi} = X'_{gi} - Y'_{gi}$$
(2)

$$d_{bi} = X'_{bi} - Y'_{bi} \tag{3}$$

样本中2个参数间的相关性可以用 Spearman 秩相关系数 r_{rs}、r_{gs}、r_{bs}计算得到(表1),其相关系数 计算式为

$$r_{rs} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} d_{ri}^2}{n(n^2 - 1)}$$
(4)

$$r_{gs} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} d_{gi}^2}{n(n^2 - 1)}$$
(5)

$$r_{bs} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} d_{bi}^2}{n(n^2 - 1)}$$
(6)

表 1 扫描点 R、G、B 与室外环境的相关性

Tab. 1	Correlation	between	points	cloud	R,	<i>G</i> , <i>I</i>	B and	outside	conditions
--------	-------------	---------	--------	-------	----	---------------------	-------	---------	------------

	项目	扫描点	TCCR24	太阳辐射值	θ	光线方向	扫描质量
	Spearman 相关系数	1.000	0. 499 * *	0. 530 * *	-0.501 * *	0. 097 * *	-0.434 * *
	Sig. (双侧)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
扫描点 R	Pearson 相关系数	1.000	0. 446 * *	0.634 * *	-0.536 * *	0.052 * *	-0.403 * *
	Sig. (双侧)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n	48 182	48 182	48 182	48 182	48 182	48 182
	Spearman 相关系数	1.000	0. 534 * *	0. 581 * *	-0.557 * *	0. 086 * *	-0.481 * *
	Sig. (双侧)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
扫描点 G	Pearson 相关系数	1.000	0. 445 * *	0.685 * *	-0.564 * *	0.031 * *	-0.418 * *
	Sig. (双侧)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	n	48 182	48 182	48 182	48 182	48 182	48 182
	Spearman 相关系数	1.000	0. 408 * *	0. 559 * *	-0.507 * *	0. 059 * *	- 0. 422 * *
	Sig. (双侧)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
扫描点 B	Pearson 相关系数	1.000	0. 339 * *	0.704 * *	-0.548 * *	0.009	-0.387 * *
	Sig. (双侧)		0.000	0.000	0.000	0.050	0.000
	n	48 182	48 182	48 182	48 182	48 182	48 182

注:**表示在 0.01 (双侧)水平上,相关性是显著的。

从图 5 还可以看出,对于连续变量扫描点的 $R \ G \ B$,太阳辐射值,TCCR24 标准颜色测试板与 地面夹角 θ ,TCCR24 标准颜色测试板不同色块颜 色各变量之间均存在线性关系。用 $\overline{x}_r, \overline{x}_g, \overline{x}_b$ 表示 扫描 $R \ G \ B$ 有关的自变量平均值,用 $\overline{y}_r \ \overline{y}_g \ \overline{y}_b$ 表 示扫描仪获得的三维点云 $R \ G \ B$ 平均值,可以用 Pearson 系数 $r_r \ r_g \ r_b$ 计算得到(表 1),其相关系数 计算式为

$$r_{r} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_{ri} - \bar{x}_{r}) (Y_{ri} - \bar{y}_{r})}{\left(\sum_{i=1}^{n} (X_{ri} - \bar{x}_{r})^{2} \sum_{i=1}^{n} (Y_{ri} - \bar{y}_{r})^{2}\right)}$$
(7)

$$r_{g} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_{gi} - \bar{x}_{g}) (Y_{gi} - \bar{y}_{g})}{(8)}$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (X_{gi} - \bar{x}_{g})^{2} \sum_{i=1}^{n} (Y_{gi} - \bar{y}_{g})^{2}}$$

$$r_{b} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_{bi} - \bar{x}_{b}) (Y_{bi} - \bar{y}_{b})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (X_{bi} - \bar{x}_{b})^{2} \sum_{i=1}^{n} (Y_{bi} - \bar{y}_{b})^{2}}} \qquad (9)$$

表1中,Spearman 秩的相关分析说明,在置信 区间为95%时,扫描点 *R*、*G*、*B*与光线方向和扫描 质量具有相关性,均为弱相关。扫描点 *R*、*G*、*B*与扫 描质量之间为负相关,扫描质量越高,扫描点 *R*、*G*、 *B*越大,图中显示出的点颜色越深,反之相反。相关 系数 Pearson 相关分析显示,在置信区间为95%时, 扫描点 *R*、*G*、*B*与 TCCR24 标准颜色测试板 *R*、*G*、*B* 颜色、太阳辐射值均为正相关,与 TCCR24 标准颜色 测试板与地面夹角 θ 为负相关。扫描点的 *R*、*G*、*B* 与显著性检测 *p* 值均小于 0.05,具有统计学意义。

2.2 颜色矫正回归模型

2.2.1 构建模型

多元线性回归模型是用 2 个或 2 个以上的解释 变量来解释因变量的一种模型^[23],多用于估算和预 测^[24-26]。由前述分析可知,样本总量 n 为 48 182, Y_{ri}, Y_{gi}, Y_{bi} ($i = 1, 2, \dots, n$)为因变量, $X_{ri}, X_{gi}, X_{bi}, X_2,$ X_3, X_4, X_5 为解释变量,表示第 i 行的 TCCR24 的 R,G, B,太阳辐射值, TCCR24 标准颜色测试板与地面 的夹角,扫描仪扫描质量,光线方向,满足建立多元 回归线性模型的条件。由于参数的单位不一致,在 构建回归模型之前进行了归一化处理。

采用双重筛选逐步回归方法,考虑到太阳辐射 值不同,扫描同一目标物点云颜色的差异性和两者 的相关系数,将 TCCR24 的 *R*、*G*、*B*和太阳辐射值作 为强制进入模型变量,其余 3 个参数作为逐步进入 模型变量。

初步构建多元线性回归的模型为

$$Y_{r} = \beta_{r0} + \beta_{r1}X_{r} + \beta_{r2}X_{2} + \beta_{r3}X_{3} + \beta_{r4}X_{4} + \beta_{r5}X_{5}$$
(10)

$$Y_{g} = \beta_{g0} + \beta_{g1}X_{g} + \beta_{g2}X_{2} + \beta_{g3}X_{3} + \beta_{g4}X_{4} + \beta_{g5}X_{5}$$
(11)

$$Y_{b} = \beta_{b0} + \beta_{b1}X_{b} + \beta_{b2}X_{2} + \beta_{b3}X_{3} + \beta_{b4}X_{4} + \beta_{b5}X_{5}$$
(12)

式中
$$\beta_{r_0}$$
、 β_{g_0} 、 β_{b_0} —常数

β_{ri} , β_{gi} , β_{bi} —偏回归系数

2.2.2 模型初步验证与分析

表 2 模型汇总 Tab.2 Model summary

模型	R_a	R^2	调整 R ²	随机误差的估计值
R - I	0. 789ª	0.623	0.623	44.488
$R - \prod$	0.872^{b}	0.761	0.761	35.387
$R - \coprod$	0.891 [°]	0.794	0.794	32.904
R - IV	$0.\ 900^{\rm d}$	0.811	0.811	31.520
G - I	0. 806 ^a	0.650	0.650	48.070
$G - \prod$	$0.886^{\rm b}$	0.784	0.784	37.729
$G - \mathbf{II}$	0. 905°	0.818	0.818	34.609
$G - \mathbb{N}$	0.915^{d}	0.837	0.837	32.827
B - I	0. 776 ^a	0.602	0.602	49.017
$B - \prod$	0.852^{b}	0.726	0.726	40.682
$B - \coprod$	$0.\ 887^{\mathrm{c}}$	0.787	0.787	35.828
B - IV	$0.\ 897^{\rm d}$	0.805	0.805	34.313

注:a 表示预测变量:太阳辐射值,TCCR24 R。b 表示预测变量:太阳辐射值,TCCR24 R,光线方向。c 表示预测变量:太阳辐射 值,TCCR24 R,光线方向,θ。d 表示预测变量:太阳辐射值, TCCR24 R,光线方向,θ,扫描质量。

为了检验模型中是否存在偏回归系数,对3个 模型进行方差分析。从表3数据中看出,3个模型

表 3 R、G、B 模型 Anova[®]分析

Tab. 3Anova^e analysis of R, G, B model

模型		平方和	df	均方	F	Sig.
D W	回归	2.048×10^8	5	$4.\ 095\times 10^8$	41 224.7	0.000^{d}
K - IV	残差	4. 786 $\times 10^{7}$	48 176	993.537		
G – IV	回归	2.660 × 10^8	5	5. 320×10^{7}	49 371.8	0.000^{d}
	残差	5. 191 × 10^{7}	48 176	1 077. 590		
P_W	回归	2.339×10^{8}	5	4. 679 $\times 10^{7}$	39 736.0	0.000^{d}
8 - IV	残差	5.672×10^7	48 176	1 177.404		

注:d 表示预测变量:太阳辐射值,TCCR24 R、TCCR24 G、 TCCR24 B光线方向,θ,扫描质量。e 表示因变量:扫描点 R、G、B。 满足 F 检验, Sig. 为 0.000 均小于 0.005, 说明每个 回归模型都拒绝回归系数为 0 的假设, 即每个回归 模型至少一个偏回归系数不为 0, 说明 $R - \mathbb{N}$ 模型、 $G - \mathbb{N}$ 模型、 $B - \mathbb{N}$ 模型具有统计学意义。根据以上 分析和表 4 的回归系数, 解释变量 $X_r, X_s, X_b, X_2,$ X_3, X_4, X_5 分别表示为三维点云颜色矫正值 R, G, B,太阳辐射值, 光线方向, 扫描目标物与地面夹角 θ , 扫描质量,回归方程即 $Y_r = -910.849 + 0.467X_r + 1.228X_2 + 82.757X_3 + 2.260X_4 - 12.311X_5$ (13) $Y_g = -1073.6 + 0.548X_g + 1.412X_2 + 92.285X_3 + 2.671X_4 - 14.296X_5$ (14) $Y_b = -1104.98 + 0.376X_b + 1.485X_2 + 92.409X_3 + 2.907X_4 - 13.443X_5$ (15)

表 4	因变量回归系数
Tab. 4	Regression coefficient

			8			
推工		非标准化系数		标准系数		c.
快型		В	标准误差	试用版	t	51g.
	常量	- 910. 849	4.280		- 212. 799	0.000
	TCCR24 R	0.467	0.002	0.478	241.003	0.000
	太阳辐射值	1.228	0.005	1.321	269.354	0.000
K - W	光线方向	82.757	0.401	0. 527	206. 197	0.000
	θ	2.260	0.021	0.714	106. 511	0.000
	扫描质量	- 12. 311	0.187	- 0. 285	- 65. 744	0.000
	常量	- 1 073.600	4.440		- 241. 795	0.000
	TCCR24 G	0.548	0.002	0.418	226.704	0.000
c W	太阳辐射值	1.412	0.005	1.354	297.355	0.000
G -IV	光线方向	92.285	0.418	0. 524	220. 776	0.000
	θ	2.617	0.022	0.737	118. 391	0.000
	扫描质量	- 14. 296	0. 195	-0.295	-73.310	0.000
	常量	- 1 104. 980	4.643		- 238. 013	0.000
	TCCR24 B	0.376	0.002	0.321	159.461	0.000
D W	太阳辐射值	1.485	0.005	1.490	299. 331	0.000
B – IV	光线方向	92.409	0. 437	0. 548	211. 529	0.000
	θ	2.907	0. 023	0.857	125. 851	0.000
	扫描质量	- 13. 443	0. 204	-0.290	- 65. 952	0.000

2.2.3 模型进一步验证与分析

随机取出本文实验取得的 TCCR24 标准颜色测 试板色块的扫描点 $R \ G \ B$,以及统计扫描时期的太 阳辐射值、 θ 、光线方向、扫描质量等参数列表。根据 式(13)~(15)计算对应的 $X_r \ X_g \ X_b$ 。对于色板上 同一个点有两组测量值,即扫描点 $R \ G \ B$ 和预测 $R \ G \ B$ 。将矫正后的 $R \ G \ B (X_{ri} \ X_{gi} \ X_{bi})$ 和扫描原 始 $R \ G \ B (Y_{ri} \ Y_{gi} \ Y_{bi})$ 进行样本配对,假设满足正 态分布,在置信区间为 95%时,进行配对 T 检验。

表5可以看出,经过回归预测之后,对于随机抽

Tab 5	Paird.	sample correlation	coefficient
	表 5	成组样本相关系数	女

样本组合	样本数	相关系数	Sig.
标准色板 R & 扫描点 R	54 464	0.690	0.000
标准色板 R & 预测 R	54 464	0.984	0.000
标准色板 G & 扫描点 G	54 464	0.639	0.000
标准色板 G & 预测 G	54 464	0.981	0.000
标准色板 B & 扫描点 B	54 464	0.493	0.000
标准色板 B & 预测 B	54 464	0.974	0.000

取的 54 464 个样本来说,同一个扫描点的 R、G、B, 矫正后比矫正前的原始扫描值更接近于真值,R、G、 B 相关系数分别为 0.994、0.991、0.994,并且 Sig. 均 小于 0.005,说明三维点云颜色在矫正后和校正前 有显著差异。

表 6 表明,预测 *R*、*G*、*B* 与标准色板 *R*、*G*、*B*,扫 描点原始 *R*、*G*、*B* 与标准色板 *R*、*G*、*B* 所形成的标准 差变化比较大,颜色矫正后的标准差明显低于矫正 前,说明矫正模型的精准程度显著提高。

表 6 成组样本 t 检验 Tab. 6 Paird-sample t test

样本组合	标准差	t	df	Sig.
标准色板 R & 扫描点 R	53.587	- 319. 803	54 463	0.000
标准色板 R & 预测 R	11.367	- 317. 851	54 463	0.000
标准色板 G & 扫描点 G	48.497	- 408. 263	54 463	0.000
标准色板 G & 预测 G	10.227	- 407. 327	54 463	0.000
标准色板 B & 扫描点 B	57.873	- 435. 940	54 463	0.000
标准色板 B & 预测 B	12.145	- 436. 286	54 463	0.000

2.3 三维点云颜色矫正

利用 Realworks 9.0 软件导出需要处理的三维 点云初始值,包括扫描点的坐标和 R、G、B,统计各 个点对应的模型中的参数值。将 R、G、B 利用本文 提到的回归模型矫正 X_r、X_g、X_b,矫正后点云 R、G、B 相对于原始点更接近于真实值,如图 6 所示。



图 6 矫正点云 Fig. 6 Rectified points cloud (a)晴天 (b)阴天

3 结论

(1)通过对扫描环境中太阳辐射值、TCCR24 标准颜色测试板与地面夹角θ、TCCR24标准颜色测 试板不同色块颜色、扫描质量、光线方向变量的分析 统计,利用 Pearson 系数和 Spearman 相关系数计算, 确定以上变量和扫描点 *R*、*G*、*B*之间均存在线性关 系。

(2)采用双重筛选逐步回归方法,在置信度 95%时,建立三维点云颜色 R、G、B 分量的多元回归 模型。实验表明,矫正后比矫正前的原始扫描值更 接近于真值,R、G、B 相关系数均大于 0.90,说明模 型的建立对于三维点云颜色矫正的有效性。三维点 云颜色矫正方法为地面三维扫描仪获取较准确的三 维点云的彩色信息提供了理论依据。

(3)因果树冠层各个叶片和枝干与地面夹角均 不同,本文提出的颜色矫正模型仍需要进一步细致 的角度方位划分,并进行多级颜色矫正才可能获取 满意的结果。

(4)接近真彩的彩色点云数据携带的目标物的 表面信息更有利于三维重建细节信息的获取,在目 标物真实感的表现上会出现新的突破。

- 参考文献
- 1 Argüelles-Fraga R, Ordóñez C, García-Cortés S, et al. Measurement planning for circular cross-section tunnels using terrestrial laser scanning[J]. Automation in Construction, 2013, 31: 1-9.
- 2 Pirotti F, Guarnieri A, Vettore A. Ground filtering and vegetation mapping using multi-return terrestrial laser scanning[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 76: 56-63.
- 3 Pejic M. Design and optimisation of laser scanning for tunnels geometry inspection [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2013, 37:199-206.
- 4 Moorthy I, Miller J R, Berni J A J, et al. Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2011, 151(2):204-214.
- 5 Seidel D, Beyer F, Hertel D, et al. 3D-laser scanning: a non-destructive method for studying above-ground biomass and growth of juvenile trees[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2011, 151(10):1305-1311.
- 6 Liang X, Hyyppä J. Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels [J]. Sensors, 2013, 13(2):1614-1634.
- 7 Metz J, Seidel D, Schall P, et al. Crown modeling by terrestrial laser scanning as an approach to assess the effect of above ground intra-and interspecific competition on tree growth[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 310: 275 - 288.
- 8 孙智慧,陆声链,郭新宇,等.基于点云数据的植物叶片曲面重构方法[J].农业工程学报,2012,28(3):184-190. Sun Zhihui, Lu Shenglian, Guo Xinyu, et al. Surfaces reconstruction of plant leaves based on point cloud data[J]. Transactions of
- the CSAE,2012,28(3):184 190. (in Chinese)
- 9 王勇健,温维亮,郭新宇,等.基于点云数据的植物叶片三维重建[J].中国农业科技导报,2014,16(5):83-89.
 Wang Yongjian, Wen Weiliang, Guo Xinyu, et al. Three-dimensional reconstruction of plant leaf blade based on point cloud data [J]. Journal of Agricultural Science and Techology,2014,16(5):83-89. (in Chinese)
- 10 岳杰,陆声链,孙智慧,等. 三维点云孔洞修补算法及在植物形态重建中的应用[J]. 农机化研究, 2013(5): 190-195. Yue Jie, Lu Shenglian, Sun Zhihui, et al. The repair algorithm of 3D point cloud holes and the application of the reconstruction in plant forms[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(5): 190-195. (in Chinese)
- 11 韦雪花,王永国,郑君,等. 基于三维激光扫描点云的树冠体积计算方法[J]. 农业机械学报,2013,44(7):235-240.
 Wei Xuehua, Wang Yongguo, Zheng Jun, et al. Tree crown volume calculation based on 3-D laser scanning point clouds data[J].
 Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(7):235-240. (in Chinese)
- 12 郭浩,马钦,张胜利,等. 基于三维重建的动物体尺获取原型系统[J]. 农业机械学报,2014,45(5): 227-232.

Guo Hao, Ma Qin, Zhang Shengli, et al. Prototype system of shape measurements of animal based on 3D reconstruction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 227 - 232. (in Chinese)

- 13 刘同海,滕光辉,张盛南,等. 基于点云数据的猪体曲面三维重建与应用 [J]. 农业机械学报, 2014,45(6): 291-295.
 Liu Tonghai, Teng Guanghui, Zhang Shengnan, et al. Reconstruction and application of 3D pig body model based on point cloud
- data [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):291-295. (in Chinese)
 Adams B, Wicke M, Dutre P, et al. Interactive 3D painting on point-sampled objects [C] // Proceedings of Symposium on Point-Based Graphics 04, 2004:57-66.
- 15 Reinhard E, Ashikhmin M, Gooch B, et al. Color transfer between images [J]. Computer Graphics & Applications IEEE, 2001, 21(5):34-41.
- 16 Welsh T, Ashikhmin M, Mueller K. Transferring color to greyscale images [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 277-280.
- 17 Wen C, Hsieh C, Chen B, et al. Example-based multiple local color transfer by strokes [J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(7):1765-1772.
- 18 Li B, Jiang G, Shao W. Color correction based on point clouds alignment in the logarithmic RGB space [J]. Visual Computer, 2015, 31(3):257-270.
- 19 Clark J, Robson S, Clark J. Accuracy of measurements made with a Cyrax 2500 laser scanner[J]. Survey Review, 2004, 37: 626-638.
- 20 万燕,谭亮,龙文,等. 基于网格的三维彩色点云分割算法[J]. 东华大学学报:自然科学版,2014,40(4):481-485. Wan Yan, Tan Liang, Long Wen, et al. A new segmentation algorithm for 3D colored point cloud based on grid[J]. Journal of Donghua University: Natural Sciences,2014,40(4):481-485. (in Chinese)
- 21 李佳龙,郑德华,何丽,等. 目标颜色和入射角对 Trimble GX 扫描点云精度的影响[J]. 测绘工程, 2012(5):75-79. Li Jialong, Zheng Dehua, He Li, et al. The effects of known color and incidence angle on accuracy of Trimble GX 3D scanning point cloud[J]. Surveying and Mapping Engineering, 2012(5):75-79. (in Chinese)
- 22 高祥伟,孙乐,谢宏全.目标颜色和粗糙度对三维激光扫描点云精度影响研究[J].测绘通报,2013(11):84-86. Gao Xiangwei,Sun Le,Xie Hongquan. Research on accuracy impact of target color and roughness to 3D laser scanning point cloud [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(11):84-86. (in Chinese)
- 23 Preacher K J, Curran P J, Bauer D J. Computational tools for probing interactions in multiple linear regression, multilevel modeling, and latent curve analysis. [J]. Journal of Educational & Behavioral Statistics, 2006, 31(4):437-448.
- 24 员玉良,盛文溢.基于主成分回归的茎直径动态变化预测方法[J]. 农业机械学报, 2015,46(1): 306-314. Yun Yuliang, Sheng Wenyi. Prediction of stem diameter variations based on ptincipal component regression[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(1): 306-314. (in Chinese)
- 25 张智韬,兰玉彬,郑永军,等. 影响大豆 NDVI 的气象因素多元回归分析[J]. 农业工程学报, 2015,31(5):188 193. Zhang Zhitao, Lan Yubin, Zheng Yongjun, et al. Multiple regression analysis of soybean NDVI affected by meteorological fators[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(5):188 - 193. (in Chinese)
- 26 马常阳,张小栓,朱志强,等.基于多元回归的鲜食葡萄保鲜技术效果评估[J]. 农业机械学报, 2015,46(1): 216-223. Ma Changyang,Zhang Xiaoshuan,Zhu Zhiqiang, et al. Comprehensive evaluation on performance of preservation technologies for table grape based on multiple regression[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(1): 216-223. (in Chinese)