doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.021

基于颜色取样的苹果树枝干点云数据提取方法

郭彩玲[1,2]　刘　刚[1,3]

(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;
3. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了快速提取苹果树冠层枝干三维点云数据,以不同生长时期苹果树冠层彩色点云数据为研究对象,提出了基于颜色取样的苹果树枝干点云数据提取方法。首先,提出了苹果树冠层彩色点云获取方法,利用 Trimble TX8 型地面三维激光扫描仪获取冠层点云数据,同轴全景摄像机获取彩色全景图,采用贴图方法着色点云数据;然后,提取全景图像苹果树冠层区域 R、G、B 颜色分量信息,根据其分布规律建立枝干部分自适应分割阈值,并根据颜色阈值删除冠层中非枝干部分彩色点云数据;最后,在 Geomagic 软件中经过封装—创建流形—编辑多边形—填充孔—光滑等一系列操作重建枝干三维模型。苹果树提取枝干点云数据实验结果表明,本文方法点云删除率为 75.74%,相对于人工枝干点云数据提取,侧枝数量平均准确率为 93.34%,效率提高 200 倍以上,大大缩短了冠层枝干三维重建时间。本研究成果可为有叶苹果树枝干动力学模型建立提供技术基础。

关键词: 苹果树; 冠层; 点云提取; 颜色取样; 枝干

中图分类号: TP391.41; S126　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)10-0189-08

Point Cloud Extraction of Apple Tree Canopy Branch Based on Color Sampling

GUO Cailing[1,2]　LIU Gang[1,3]

(1. *Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research*, *Ministry of Education*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *College of Electromechanical Engineering*, *Tangshan University*, *Tangshan* 063000, *China*
3. *Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Construction of 3D model of tree is a long-term research hotspot in botany, computer graphics, and architecture. And tree canopy branch reconstruction is an important component in the canopy dynamics analysis. The emergence of terrestrial laser scanners has accelerated this reconstruction process. To quickly reconstruct the canopy branch model, it is necessary to delete a large number of non-branched interference point clouds. Taking the canopy of apple tree in the maturity growth stage as the research object, a method of color-based sampling apple tree canopy trunk point cloud extraction was proposed. Firstly, the apple tree canopy color point cloud acquisition method was proposed. Trimble TX8 and coaxial panoramic camera were selected as the data acquisition device to acquire the apple canopy color point cloud data. Point clouds and color panoramic photos were matched in Realworks software, and color point clouds were get. Then, the color information R, G and B in the panoramic image was extracted. The adaptive segmentation threshold was established according to the distribution rules of R, G and B in the panoramic image branch area. Color point cloud data of the non-branch part in the canopy was deleted according to the threshold. Finally, the 3D branch model was reconstructed in the Geomgic software. The process was followed by a series of operations, such as wrap, manifold creation, polygon editing, hole filling and smoothing. The experimental results of the apple tree branch extraction point cloud data showed that the point cloud deletion rate of this method was 75.74%. Compared with the

收稿日期: 2019-05-22　修回日期: 2019-08-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700503)和河北省高等学校科学技术研究项目(QN2017417)

作者简介: 郭彩玲(1976—),女,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

通信作者: 刘刚(1966—),男,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

artificial branch point cloud data extraction, the side branch accuracy rate was 93.34%, and the efficiency was improved by more than 200 times, shortening the three-dimensional reconstruction time of canopy branches. In this way, the results of this study can provide a basis for studying the canopy structure analysis and the establishment of the branching dynamics model of the leafy apple tree.
Key words: apple tree; canopy; point cloud extraction; color sampling; branch

0 引言

随着果园收获自动化研究的发展,振动收获被认为是效率最高的收获方式,其原理[1-2]是在不伤害树体的基础上通过一定形式的机构振动果树树干,使果树枝干以一定频率和振幅振动,果实受到振动加速运动,当惯性力大于果树与枝干的结合力时,果实脱落。该收获方式在核桃[3-4]、樱桃[5]、橄榄[6]、苹果[7-8]、杏[9]、冬枣[10]等果品收获中均有应用。

为了研究不同树枝在受迫振动下的运动和动态特征,建立了树干-主枝[11]、主干-侧枝[12]、树干-枝条、树叶-嫩枝[13]等有限元模型,并建立了采收与频率、振幅变化的数学模型。因受实验条件的限制,树木冠层较高区域、不同树木冠层枝干的振动实验大多采用数学模型方式模拟,该模拟方式不能真实反映枝干空间信息。三维扫描仪为获取真实的树木冠层内枝干空间分布提供了技术基础[14-16],采用三维扫描仪获取苹果树冠层点云数据,进行苹果树枝干三维重建,即可对枝干进行较为准确的动力学分析。

目前,根据苹果树冠层点云数据提取枝干信息主要有两种方法:提取枝干骨架[17-19]和采用圆拟合法或者管道模型进行枝干建模[20-21]。这两种方法均存在冠层叶片干扰问题,研究人员尝试树木结构重建前采用半监督的 SVM[22]方法、基于空间索引的欧几里德簇[23]对树木点云进行枝叶分离,删除大量叶片点云数据;利用 Geomagic Studio 软件并采用逐层剔除树叶法[24]将树木点云分层,人工删除叶片部分点云数据;采用 K-means 聚类[25]方法将树干与地面点云分离;采用直方图统计分析方法[26],通过经验阈值,以有效区分枝干和其他点;深度球截线法[27]实现了近景室内环境下提取深度图像中果实之外的点云数据,可实现枝干和叶片的提取。上述方法虽然可以实现树木点云数据枝叶分离,删除部分叶片点云数据,但是大多数的叶片点云还是需要人工处理。

为了能快速获取收获期苹果树冠层内枝干点云信息,本文以苹果树冠层为研究对象,提出基于点云颜色取样的苹果树枝干重建方法,为振动收获枝干识别和建立枝干动力学模型提供基础,也为树冠风中载荷[28]研究提供可行性方法。

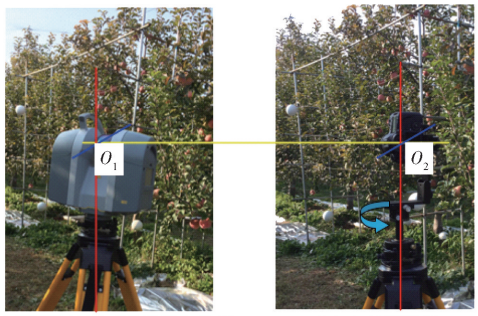
1 材料与方法

1.1 仪器与材料

在中国农业大学苹果树采摘机器人实验基地果园(北京市昌平区南口镇辛力庄村),开展苹果树冠层彩色三维点云数据采集工作。该实验果园采用常规管理方式进行春季修剪,行间生草,灌水条件良好,苹果树高 2.5 ~ 3.5 m,株距 2.5 m,行距 5 m,行方向为东西方向。本文数据采集对象为随机选择的果园自然生长状态下树龄 7 a 的自由纺锤形宫藤富士苹果树。实验中不考虑扫描环境中温湿度、大气压等参数的影响。

本文实验采用美国 Trimble 公司 TX8 型地面三维激光扫描仪(图 1)进行苹果树冠层三维点云数据采集。扫描仪最大扫描范围为 340 m,测量速度为 106 点/s,视场角为 317° × 360°,精度为 0.5°,采用脉冲激光测距,测量精度小于 0.5°,100 m 测距时,误差小于等于 2 mm。

全景摄像机镜头为 EOS 5D Mark Ⅲ搭载 EF 8 ~ 15 mm f/4L USM 鱼眼镜头,实验现场如图 1 所示。



(a) TX8型地面三维激光扫描仪 (b) 全景摄像机

图 1 数据采集实验现场

Fig. 1 Data acquisition experiment site

1.2 彩色点云数据获取方法

为了采集收获期的苹果树冠层三维点云数据进行冠层枝干三维重建,本文对彩色三维点云数据获取展开研究。扫描仪内置彩色摄像机获取彩色点云数据时受自然环境下光线变化影响较大,且每站扫描结束后采集图像方式造成的图像不连续性,导致彩色点云数据颜色失真[29-30]且难以克服。

本文在采集彩色图像时,假设纹理空间是连续的。实验前,调整扫描仪激光发射中心 O_1 与摄像机

镜头中心 O_2 在同一位置。扫描仪支架放置到扫描仪扫描位置后，两台全景摄像机同时拍摄全景图像。为了保证彩色图像拼接成全景时无缝，两幅彩色图像重合面积尽量不小于画面面积的 1/4，以减少广角边缘的变形对画面的影响，因此，每拍摄一幅彩色图像，摄像机旋转 90°。每个扫描站获取的 4 幅彩色图像通过 Kolor Autopano Giga 4.0 拼接成全景图像，图 2 为第 1 站获取的 4 幅彩色图像拼接而成的全景图。



图 2　第 1 站全景图像

Fig. 2　Panoramic picture of the first station

在 Trimble 扫描仪自带软件 Realworks 中实现点云数据与全景图像配准、点云数据配准、去噪等预处理，实现冠层点云数据具备彩色信息。

于 2018 年 4、5、9 月中连续 3 d 的下午获取彩色点云数据，风速小于 1.6 m/s 时采集的数据作为预处理前的点云数据，图 3 为 2018 年 9 月获取的收获期苹果树冠层一个侧枝的彩色点云数据。



图 3　彩色点云数据

Fig. 3　Color point cloud data

2　苹果树枝干点云数据提取方法

以苹果树冠层彩色点云数据为研究对象，在 RGB 彩色空间，采用线剖图分析法[31-32]分析全景彩色图像线剖面 R、G、B 分布规律，并提取全景图中枝干彩色图像，通过求取 $R-G$、$R-B$ 拟合直线斜率寻找自适应分割阈值，通过分割点云颜色数据进而分割枝干点云坐标数据。基于颜色取样的苹果树枝干点云数据提取流程如图 4 所示。

2.1　成熟期苹果树冠层彩色点云颜色线剖图分析

彩色点云中的颜色信息来源于全景彩色图像对应位置的彩色信息，包含有全景彩色图像中枝干、果实和叶片的颜色信息，天空地面等颜色信息不能投

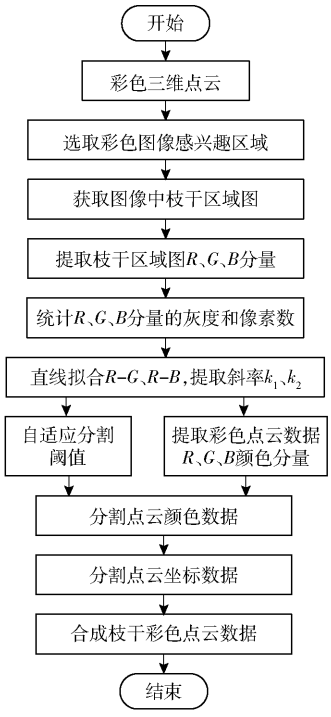


图 4　基于颜色取样的苹果树枝干点云提取流程图

Fig. 4　Flowchart of apple tree branches point cloud extraction method based on color sampling

射到苹果树冠层点云数据上。因此，分析彩色点云中冠层 R、G、B 颜色信息时，可以用全景彩色图像枝干、果实和叶片的彩色信息代替。

图 5 为顺光拍摄时，全景图像中苹果树冠层部分原始彩色图像，图 5a 中黄色线段分别表示全景彩色图像中上、中、下剖面Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ，图 5b、5c、5d 分别是各个剖面的 R、G、B 彩色分量曲线图。图中可见，苹果图像的 R 分量大于 G 和 B 分量，叶片部分 G 分量大于 R 和 B 分量，枝干部分的 R 分量大于其他分量。

图 6 为逆光拍摄时，全景图像中苹果树冠层的部分原始彩色图像。图中可见，苹果图像的 R 分量大于 G 和 B 分量，叶片部分 G 分量大于 R 和 B 分量，枝干部分的 R 分量和 G 分量在图中上半部分和下半部分的表现不同。彩色图像上半部分 R 分量大于其他分量，中下部 G 分量大于其他分量。

2.2　基于色差法的枝干点云分割

按照彩色点云贴图原理，图 5 和图 6 是不同站点获取的全景彩色图像，在贴图时都会出现在冠层点云中。图 5 和图 6 数据分析表明，无论顺光或逆光拍摄的全景彩色点云数据，枝干部分的 R、G、B 变化幅度相近，叶片部分 R 分量最大，果实部分 G 分量最大，且总体上来说，顺光图像颜色分量值大于逆光图像相应的数值。

提取枝干顺光和逆光图像中各颜色分量值进行统计分析。由于冠层中绿色分量是最多的，蓝色分量相对较少，图 7 为 R、G、B 颜色分量相关关系，图

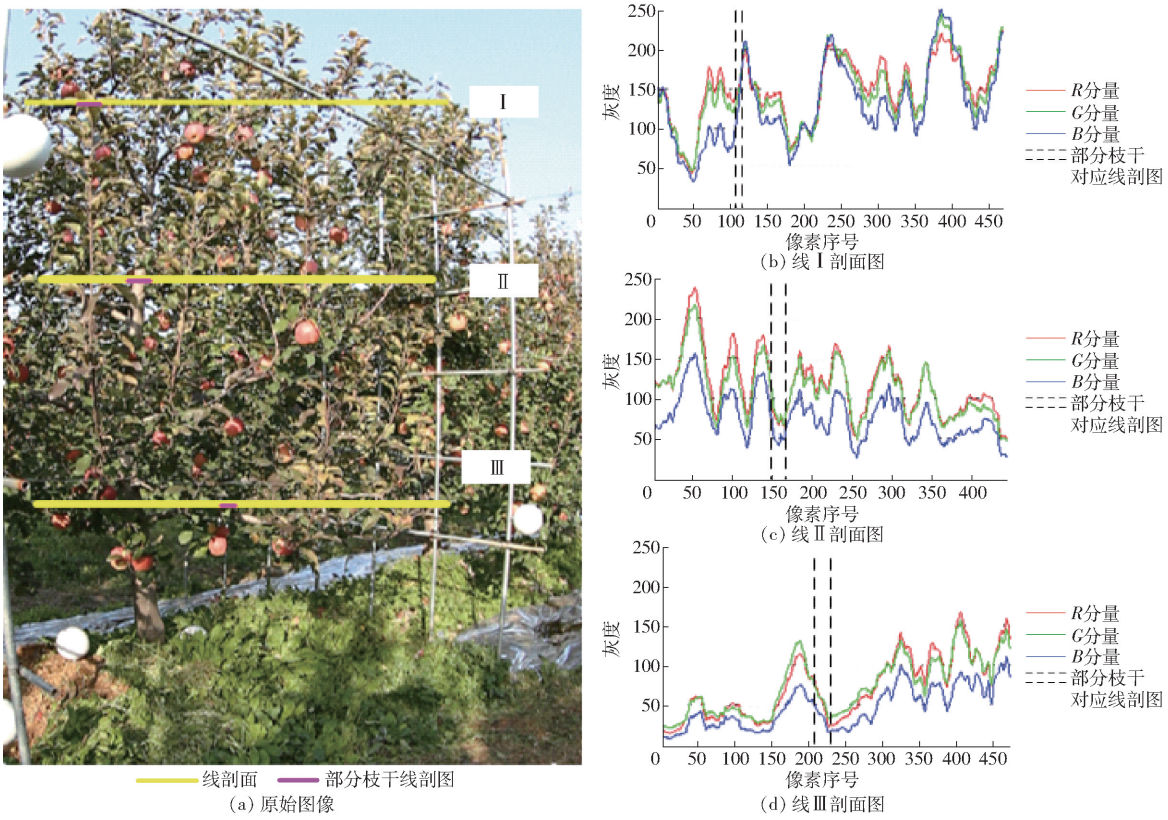


图 5 顺光图像线剖图

Fig. 5 Result of line profile map in frontlighting

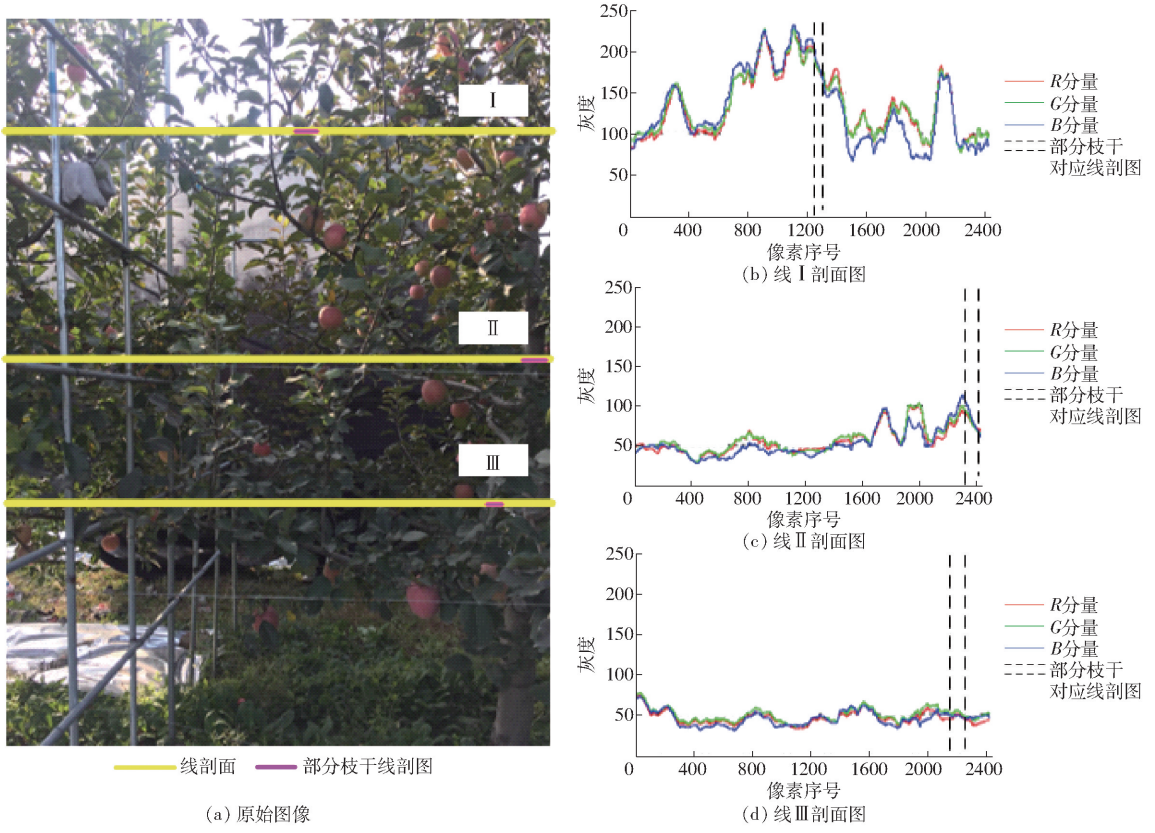


图 6 逆光图像线剖图

Fig. 6 Result of line profile map in backlighting

中红色拟合线为 $G_{COLOR}-R_{COLOR}$ 拟合直线,蓝色线为 $G_{COLOR}-B_{COLOR}$ 拟合直线。R_{COLOR}、G_{COLOR}、B_{COLOR} 分别表示红、绿和蓝颜色分量的像素值,由图中可以看出,枝干各颜色分量像素值之间呈强相关关系,决定

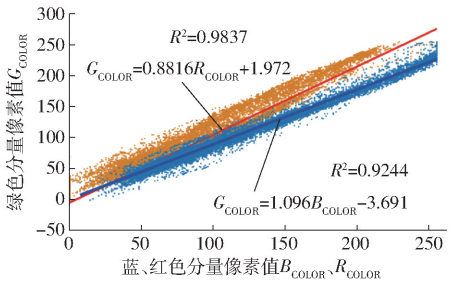


图 7　R、G、B 颜色分量相关关系

Fig. 7　Correlation of color R, G and B components

系数 R^2 分别为 0.983 7 和 0.924 4。

分别以 B、R 系数为修正值改进 $2G-R-B$ 色差算法，采用决定系数较高的 $G-R$ 拟合直线斜率作为改进差分算法系数，即以动态阈值 $2G-1.1184B-0.8816R$ 对彩色点云进行阈值分割，为了提取冠层枝干点云数据，提取彩色点云数据的 R、G、B 颜色信息，按照自动阈值将颜色信息分割，并对相应的点云坐标信息进行分割，最后合成为彩色点云数据，运行结果如图 8 所示。



(a) 点云数据　(b) 人工逐层删除方法　(c) 欧几里德簇方法　(d) 本文算法

图 8　枝干点云提取结果比较

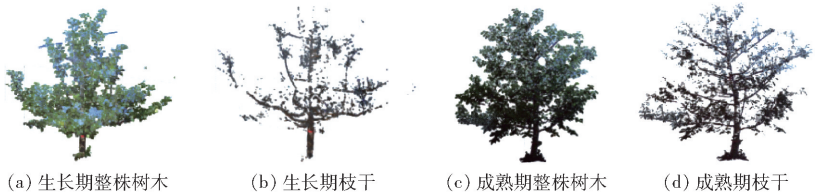
Fig. 8　Comparisons of branches point cloud extraction results

由图 8 可知，相对于人工提取枝干效果，图 8c、8d 可以提取直径较小的侧枝③，且在遮挡比较严重的侧枝②和④也可以提取出部分点，图 8c 中对于枝叶分离效果并不明显，产生的枝干之外的干扰点数量多于本文算法。

3　结果与分析

3.1　苹果树枝干提取可视化效果

采用上述算法，在 Windows 7(专业版)平台下，利用 Matlab 开发果树冠层枝干点云提取程序。计算机环境：处理器 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2603 V4 @1.70 GHz(2 个处理器)，内存 64 GB。以苹果树不同生长时期的带叶树木为例进行算法验证，提取效果如图 9 所示，可见枝干点云数据相对于树点云数据，枝干部分易于分辨。



(a) 生长期整株树木　(b) 生长期枝干　(c) 成熟期整株树木　(d) 成熟期枝干

图 9　不同生长时期提取枝干点云数据视觉化

Fig. 9　Visualization of point cloud data in different growth stages

3.2　苹果树枝干提取精度与准确性

为了验证本文算法的枝干点云提取精度和准确性，以不同生长时期苹果树(共 9 棵)为对象，获取其彩色三维点云数据，以人工提取枝干点云数据为基准，对本文方法的准确率等进行比较分析，结果如表 1 所示。

表 1 结果表明，人工逐层删除非枝干点云数据，删除率平均为 76.08%，本文算法为 75.74%，本文算法一次性删除点云的数量多于人工删除的数量，因为部分侧枝枝干点云数据由于叶片遮挡并未获取到，人工删除点云时，可以根据拓扑关系保留部分点云数据。在冠层侧枝数量方面，相对于人工删除非枝干部分点云数据，本文算法的平均准确率为 93.34%，效率至少提高 200 倍，节省了冠层枝干三维重建时间。

表 1 中数据 A-3 为风速 3.9 m/s 时获取，由于风速超出了 1.6 m/s 的最佳扫描环境[33]，因此果树冠层中叶片出现分层，影响枝干点云数据的采集，无论人工删除还是本文算法删除，点云删除率都较低，且本文算法提取的枝干点云数据侧枝准确率仅为 77.5%。数据表明，使用本文算法时，需考虑风速影响。

表 1 中数据 A-6 为阴天时获取，扫描获取冠层彩色点云数据，点云颜色差别较小(图 10a)，利用本文算法提取枝干点云数据时，点云删除率仅为 47.29%，且侧枝准确率小于平均准确率。因此，使用本文算法时，以室外天气晴天为宜。

表 1 枝干提取结果分析

Tab. 1 Branches point cloud extraction results analysis

样本编号	点云数量	枝干部分点云数量		非枝干点云删除率/%		侧枝数量			运行时间		
		人工删除	本文算法	人工删除	本文算法	人工删除	本文算法	准确率/%	人工删除/h	本文算法/s	效率比
A-1	602 556	97 325	103 516	83.85	82.82	39	38	97.44	3.5	21.14	596
A-2	1 498 542	182 547	215 862	87.82	85.60	56	54	96.43	7.5	49.38	540
A-3	1 610 454	583 875	425 217	63.74	73.60	80	62	77.50	9.0	86.11	376
A-4	781 217	215 214	175 009	72.45	77.60	49	48	97.96	6.0	68.12	318
A-5	135 573	18 521	10 246	86.34	92.44	27	26	96.30	2.0	23.55	313
A-6	266 096	67 384	140 272	74.68	47.29	44	41	93.18	5.5	34.51	565
A-7	2 740 877	1 023 124	967 042	62.67	64.72	51	47	92.16	9.0	109.83	297
A-8	5 207 640	1 752 148	1 579 008	66.35	69.68	68	63	92.65	13.0	210.32	222
A-9	2 118 665	279 815	256 487	86.79	87.89	56	54	96.43	7.0	65.65	387



(a) 点云数量 (b) 枝干点云数量 (c) 枝干三维重建

图 10 成熟期苹果树冠层枝干重建过程

Fig. 10 Process of apple tree canopy branches reconstruction in mature growth stage

3.3 枝干三维重建

获取 2018 年 9 月自由纺锤形苹果树冠层彩色三维点云数据,利用本文算法删除非枝干部分点云数据(图 10b),进行细化枝干[34]三维重建。

利用软件 Geomagic 完成数据的去噪和点云压缩,人机交互式检验噪声点并去除。由于遮挡、设备限制、点云删除造成的大量空洞,利用 Geomagic 软件经过封装—创建流形—编辑多边形—填充孔—光滑等操作人工交互完成空洞填补。图 10c 为苹果树冠层枝干三维重建结果,由 5 865 个曲面组成。

4 结论

(1)针对苹果树冠层彩色点云获取中颜色失真现象,构建了地面激光扫描仪和全景摄像机的苹果树冠层彩色点云获取系统,采用贴图方法将三维点云着色,获取苹果树冠层彩色三维点云数据。

(2)提出基于颜色取样的苹果树冠层枝干点云提取方法,苹果树冠层提取枝干点云数据的实验表明,本文算法点云删除率为 75.74%,相对于人工枝干点云数据提取,侧枝数量平均提取准确率为 93.34%,效率提高 200 倍以上。

(3)本文方法在提取冠层枝干点云数据时受数据品质以及数据采集环境影响较大,适宜在无风的晴天采集冠层彩色点云数据。本研究为成熟期带叶果树枝干动力学分析提供了技术基础,提高了三维重建效率。

参 考 文 献

[1] 陈度,杜小强,王书茂,等. 振动式果品收获技术机理分析及研究进展[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8):195-200.
CHEN Du, DU Xiaoqiang, WANG Shumao, et al. Mechanism of vibratory fruit harvest and review of current advance[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8):195-200. (in Chinese)

[2] 罗钢,刘天湖,曾文,等. 水果振动收获中树干振动的分析与仿真[J]. 机械设计, 2017, 34(1): 47-51.
LUO Gang, LIU Tianhu, ZENG Wen, et al. Analysis and simulation of the trunk shaker for fruit vibration harvest[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(1): 47-51. (in Chinese)

[3] DU X Q, CHUANYU W, LEIYING H, et al. Dynamic characteristics of dwarf Chinese hickory trees under impact excitations for mechanical fruit harvesting[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(1): 17-25.

[4] RODRIGUEZ M, PLOQUIN S, MOULIA B, et al. The multimodal dynamics of a walnut tree: experiments and models[J]. Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME, 2012, 79(4):044505.

[5] DU X, CHEN D, ZHANG Q, et al. Dynamic responses of sweet cherry trees under vibratory excitations[J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(3): 305-314.

[6] BENTAHER H, HADDAR M, FAKHFAKH T, et al. Finite elements modeling of olive tree mechanical harvesting using different shakers[J]. Trees-Structure and Function, 2013, 27(6): 1537 - 1545.

[7] 付函,段洁利,陈度,等. 适用棚架树形的鲜苹果局部对靶振动收获方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 1 - 7.
FU Han, DUAN Jieli, CHEN Du, et al. Targeted shake-and-catch harvesting for fresh market apples in trellis-trained trees[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 1 - 7. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 2017S01&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.001. (in Chinese)

[8] MA S, KARKEE M, FU H, et al. Air suspension-based catching mechanism for mechanical harvesting of apples[J]. IFAC Papersonline, 2016, 49(16): 353 - 358.

[9] 吕梦璐,王春耀,蔡菲,等. 杏果实振动采收速度规律的研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(6): 169 - 172.
LÜ Menglu, WANG Chunyao, CAI Fei, et al. The laws of the velocity of apricot the vibration harvest to research[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(6): 169 - 172. (in Chinese)

[10] PENG J, XIE H, FENG Y, et al. Simulation study of vibratory harvesting of Chinese winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao)[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 143: 57 - 65.

[11] 王冬,陈度,王书茂,等. 基于有限元方法的整形果树振动收获机理分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊): 56 - 62.
WANG Dong, CHEN Du, WANG Shumao, et al. Analysis on vibratory harvesting mechanism for trained fruit tree based on finite element method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp.): 56 - 62. (in Chinese)

[12] HORVATH E, SITKEI G. Damping properties of plum trees shaken at their trunks[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(1):19 - 25.

[13] YUNG C, FRIDLEY R B. Simulation of vibration of whole tree systems using finite-elements[J]. Transactions of the ASAE, 1975, 18(3): 475 - 481.

[14] 彭飞,方芳,王红英. 基于三维激光扫描的大麦籽粒力学建模与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 342 - 348.
PENG Fei, FANG Fang, WANG Hongying. Modeling and experiment on mechanical properties of barley grain based on 3D laser scanning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 342 - 348. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20181141&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.041. (in Chinese)

[15] BURT A, DISNEY M, CALDERS K. Extracting individual trees from lidar point clouds using treeseg[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2019, 10(3): 438 - 445.

[16] 王佳,张隆裕,吕春东,等. 基于地面激光雷达点云数据的树种识别方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 180 - 188.
WANG Jia, ZHANG Longyu, LÜ Chundong, et al. Tree species identification methods based on point cloud data using ground-based LiDAR[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 180 - 188. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20181121&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.021. (in Chinese)

[17] 刘金鹏,张怀清,刘闽,等. 基于点云骨架的单木分枝参数提取研究[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(10): 15 - 20.
LIU Jinpeng, ZHANG Huaiqing, LIU Min, et al. Extraction of individual tree branch parameters from skeleton model based on point cloud data[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(10): 15 - 20. (in Chinese)

[18] 郝腾宇,耿楠,胡少军,等. 基于曲率法线流的树点云骨架提取方法[J/OL]. 计算机应用研究:1 - 7[2019 - 08 - 20]. http://doi-org-s.vpn.cau.edu.cn/10.19734/j.issn.1001-3695.2018.10.0847.
HAO Tengyu, GENG Nan, HU Shaojun, et al. Skeleton extraction of tree point cloud based-on curvature normal operator[J/OL]. Application Research of Computers: 1 - 7 [2019 - 08 - 20]. http://doi-org-s.cau.edu.cn/10.19734/j.issn.1001-3695.2018.10.0847. (in Chinese)

[19] HE G, YANG J, BEHNKE S. Research on geometric features and point cloud properties for tree skeleton extraction[J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2018, 22(5 - 6): 903 - 910.

[20] 庄崟国. 基于地面激光雷达的单树枝干几何建模研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(1): 62 - 67.
ZHUANG Yinguo. Research on geometric modeling of single-tree branch based on terrestrial LiDAR[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, 41(1): 62 - 67. (in Chinese)

[21] 师翊,何鹏,胡少军,等. 基于角度约束空间殖民算法的树点云几何结构重建方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 207 - 216.
SHI Yi, HE Peng, HU Shaojun, et al. Reconstruction method of tree geometric structures from point clouds based on angle-constrained space colonization algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 207 - 216. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20180227&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.027. (in Chinese)

[22] 张天安,云挺,薛联凤,等. 基于地面激光雷达的活立木枝干三维建模[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(4): 163 - 167.
ZHANG Tianan, YUN Ting, XUE Lianfeng, et al. A new 3D modeling method for branches of standing trees based on point cloud data of terrestrial laser scanning[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015, 39(4):

163 – 167. (in Chinese)

[23] 张冬,严锐,云挺,等. 基于地面激光雷达的单木枝干建模方法[J]. 林业工程学报, 2016, 1(5): 107 – 114.
ZHANG Dong, YAN Rui, YUN Ting, et al. The 3D reconstruction of tree branches from point cloud based on terrestrial laser scanner[J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(5): 107 – 114. (in Chinese)

[24] 邓洁茹,王峰. 基于三维激光扫描技术的树木枝干建模研究[J]. 城市勘测, 2017(2): 109 – 113.
DENG Jieru, WANG Feng. Trunk modeling based on 3D laser scanning technology[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2017(2): 109 – 113. (in Chinese)

[25] 李真,汪沛,张青. 树干与地面点云分类 K-means 方法的改进[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(1): 41 – 46.
LI Zhen, WANG Pei, ZHANG Qing. An improved method for tree trunks and ground point clouds by K-means cluster analysis [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(1): 41 – 46. (in Chinese)

[26] 陈动,张振鑫,王臻,等. 骨架优化下的地面激光树木点云重建方法[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(2): 236 – 248.
CHEN Dong, ZHANG Zhenxin, WANG Zhen, et al. Individual tree modeling from terrestrial laser scanning point clouds via skeleton-based optimization[J]. Journal of Geoinformation Science, 2019, 21(2): 236 – 248. (in Chinese)

[27] 刘继展,朱新新,袁妍. 枝上柑橘果实深度球截线识别方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 32 – 39.
LIU Jizhan, ZHU Xinxin, YUAN Yan. Depth-sphere transversal method for on-branch citrus fruit recognition [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 32 – 39. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20171004&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.004. (in Chinese)

[28] JACKSON T, SHENKIN A, WELLPOTT A, et al. Finite element analysis of trees in the wind based on terrestrial laser scanning data[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 265: 137 – 144.

[29] 郭玲,王建宇,黄炎焱. 真实感 3D 重建中的纹理映射技术[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(10): 1881 – 1884.
GUO Ling, WANG Jianyu, HUANG Yanyan. On texture mapping for realistic 3D reconstruction[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(10): 1881 – 1884. (in Chinese)

[30] 张帆,黄先锋,李德仁. 激光扫描与光学影像数据配准的研究进展[J]. 测绘通报, 2008(2): 7 – 10.
ZHANG Fan, HUANG Xianfeng, LI Deren. A review of registration of laser scanner data and optical image[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2008(2): 7 – 10. (in Chinese)

[31] SI Y, GANG L, JUAN F. Location of apples in trees using stereoscopic vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 112(SI): 68 – 74.

[32] BULANON D M, KATAOKA T, OTA Y, et al. Segmentation algorithm for the automatic recognition of Fuji apples at harvest [J]. Biosystems Engineering, 2002, 83(4): 405 – 412.

[33] 郭彩玲,宗泽,张雪,等. 基于三维点云数据的苹果树冠层几何参数获取[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 175 – 181.
GUO Cailing, ZONG Ze, ZHANG Xue, et al. Apple tree canopy geometric parameters acquirement based on 3D point clouds [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 175 – 181. (in Chinese)

[34] BOURNEZ E, LANDES T, NAJJAR G, et al. Sensitivity of simulated light interception and tree transpiration to the level of detail of 3D tree reconstructions[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2019, 38: 1 – 10.