

基于多源信息融合的果树冠层三维点云拼接方法研究

周 薇^{1,2} 马晓丹^{1,3} 张丽娇¹ 郭彩玲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,农业部农业信息获取技术重点实验室,北京 100083)
² 福建省特种设备检验研究院,福州 350008; ³ 黑龙江八一农垦大学信息技术学院,大庆 163319)

摘要 构建了基于彩色相机和光学混合探测(PMD)相机的多源视觉系统,旨在建立具有真彩色信息的果树冠层三维点云模型,为果树的剪枝、疏花疏果和采摘等果园管理提供技术支持。针对 PMD 相机获取的目标场景三维点云,结合 PMD 相机的幅度图像和密度聚类算法提取有效点,利用前期研究的图像配准方法得到多源图像之间的坐标转换关系,完成了果树冠层多源信息融合。通过主成分分析法得到较好的初始位置,再采用最近点迭代算法,实现两组三维点云之间的拼接。对自然场景下的开花期和坐果期的果树冠层三维点云拼接方法进行了实验验证,结果表明多视角三维点云拼接误差为 2.62 cm,可以较好地弥补单个角度下拍摄造成的数据缺失,实现了果树冠层完整的三维显示。

关键词 机器视觉;果树冠层;信息融合;三维点云拼接;最近点迭代法

中图分类号 TP242 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.1215003

Three Dimensional Point Cloud Splicing of Tree Canopy Based on Multi-Source Camera

Zhou Wei^{1,2} Ma Xiaodan^{1,3} Zhang Lijiao¹ Guo Cailing¹ Liu Gang¹

¹ Key Laboratory for Modern Precision Agriculture System Integration Research of the Ministry of Education, Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology of the Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China

² Fujian Special Equipment Inspection and Research Institute, Fuzhou, Fujian 350008, China

³ College of Information Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China

Abstract In order to guide the pruning, flower thinning and harvesting of fruit trees in orchard, a novel vision system which combines a color-camera system with a photo mixing detector (PMD)-camera is constructed. For the three-dimensional coordinate information of target scene acquired by the PMD camera, effective point cloud combining PMD amplitude image with density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN) algorithm is extracted. Multi-source information fusion is completed with the result of image registration in the previous studies. Primary component analysis algorithm (PCA) is used to get the initial state of the point cloud at different locations, which is called prealignment. Accurate splice between two point clouds is realized by the iterative closest point (ICP) algorithm based on the least square method to get the optimal matching. Coordinate transformations are obtained by singular value decomposition (SVD) after prealignment and accurate splice. Several groups of experiments are used for verification, which show the average error of multi-view point cloud splicing reaches 2.62 cm and can better make up full three dimensional display of apple tree canopy without missing data than a single angle shot.

Key words machine vision; tree canopy; information fusion; three-dimensional point cloud splicing; iterative closest point algorithm

OCIS codes 150.0155; 150.4232; 150.6910; 150.6044

收稿日期: 2014-06-06; **收到修改稿日期:** 2014-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(31371532)、中央高校基本科研业务费专项资金(2013YJ008)

作者简介: 周 薇(1990—),女,硕士研究生,主要从事机器人方面的研究。E-mail: suibian199090@126.com

导师简介: 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等方面的研究。

E-mail: pac@cau.edu.cn(通信联系人)

1 引言

随着信息技术的快速发展,应用智能农业机械实现果园管理,将是 21 世纪农业发展的必然趋势^[1]。利用机器视觉技术建立具有颜色信息的果树冠层三维(3D)模型,用以科学地指导果树的剪枝、疏花疏果和采摘等果园管理。

国内外果树冠层的三维重建手段可分为三大类:立体视觉技术、激光扫描技术和三维数字化仪技术。国内外学者采用立体视觉技术对树木进行了三维重建^[2-4],室外非结构环境中光照的变化是制约立体视觉系统应用的主要因素;为降低或避免自然光照对视觉系统造成的影响,研究人员尝试采用激光扫描仪进行树木枝干或冠层的三维重建^[5-8],但利用该方法建立模型需要大量的人工交互,效率较低,难以在农业生产中应用;近年来,虚拟植物模型得以较快发展,国内外较多研究^[9-10]利用三维数字化仪进行植株冠层重建,但测量时对环境条件要求高,且需人工测量多项数据,只能采集空间位置信息,无法同时记录植株颜色信息。因此,建立具有真实感的植物模型仍然是当前国内外研究的热点问题^[11]。

随着现代科学技术的发展,对视觉系统的精度和效率的需求逐渐提高,多传感器信息融合的方法,因其具有多源数据的优势互补、提高图像信息利用率等优点而被广泛重视。光学混合探测(PMD)[vision][®] CamCube3.0 是基于飞行时间(TOF)技术的 3D 相机,是近年来研制的一种测量物体深度信息的新型设备。由于这种深度摄像机采用主动光源成像方式,受自然光变化影响较小,且能够提供物体深度信息^[12],但其输出的深度图像像素分辨率较低^[13];彩色摄像机提供了丰富的颜色、纹理等信息,但易受外界光照影响。信息融合是指对来自两个或者两个以上传感器获取的多源信息进行多层次、多方面的处理和综合,得到更丰富可靠的有用信息;另外,由于受目标物体几何形状以及遮挡的限制,数据采集设备需要从不同视角对目标物进行多次采集操作,对各个不同视角获取的点云数据进行拼接,实现目标物的三维立体显示。

以开心型苹果树为研究对象,构建彩色相机和 PMD 相机相结合的多源信息采集系统,运用图像处理技术和数据挖掘技术,建立具有颜色特征的果树冠层三维模型。

2 多源信息采集系统

如图 1 所示,构建的多源信息采集系统由 PMD 相机、彩色摄像头、可调节三脚架、笔记本电脑和可移动平台组成。PMD 相机是德国 PMD Technologies[®] 公司开发的 PMD[vision][®] Camcube3.0,由照明模块、传感器模块、电源模块和镜头构成,照明模块向目标场景发射连续波调制信号,由传感器模块接收和解析反射信号^[14]。相机测量距离范围是 0.3~7 m,图片空间分辨率为 200 pixel×200 pixel 时帧速率是 40 frame/s,因此能实时获取图像。彩色相机采用 Logitech 公司的 C270 系列摄像头,空间分辨率是 320 pixel×240 pixel,有实时拍照和摄像的功能。



图 1 多源信息采集系统图

Fig. 1 Multi-source vision system

PMD 相机可提供深度图像、强度图像、幅度图像和标记图像。深度图像是用伪彩色反映场景中的各目标点到相机镜头的距离,强度图像呈现的是包括自然光线和近红外光线在内的入射光线的均值,幅度图像表现的是镜头接收到目标物体反射光线的的能力,标记图像返回的是图像像素的质量信息。另外,利用配套的开发工具包 PMDMDK 和 PMDSDK2 可通过 Matlab 和 VC++ 获取各类图像信息以及各目标点的三维坐标信息。

3 果树冠层的三维点云拼接方法

获取果树冠层的三维点云模型如图 2 所示,以树干中心为轴,半径约为 2 m 的圆周上设立两个数据采集点,两个位置上的相机坐标系分别为 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 和 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 。

以 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 为基准坐标系,由位置二到位置一的坐标变换可表示为

$$\begin{bmatrix} X'_2 \\ Y'_2 \\ Z'_2 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (1)$$

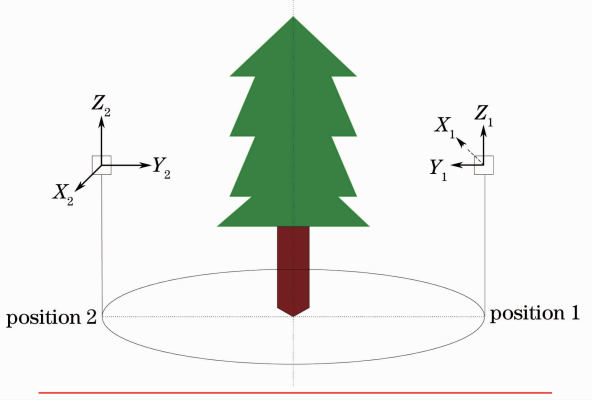


图2 三维点云获取模型

Fig. 2 3D point cloud acquisition model

式中 \mathbf{R} 为 3×3 的旋转矩阵, \mathbf{T} 为 3×1 的平移矢量。

要实现树木冠层完整的三维显示,需要对不同位置下获取的点云数据进行拼接。点云的拼接主要包括三个步骤:点云的预处理、对应点对的匹配和坐标变换求解。点云预处理包括除噪和数据的简化,通过密度聚类完成点云的预处理,并采用粗匹配和精匹配两个步骤实现果树冠层的三维点云拼接过程。

3.1 基于密度聚类的点云筛选

PMD 相机获取的三维点云数据虽然能够描述三维物体的形状,但是由于点云数据间的无序性,而且点云中包含有部分噪声点,直接用这些数据进行点云拼接,将会产生尖锐的凸出,会严重影响三维视觉效果,因此需要对三维点云进行预处理。

聚类是指将物理或抽象的对象集合分成由类似的对象组成的多个类的过程。由聚类所生成的一组数据对象的集合被称为簇,同一个簇中的对象彼此相似,与其他簇中的对象相异^[15]。基本密度的带有噪声的密聚类(DBSCAN)是一个比较有代表性的基于密度的聚类算法,能够把具有足够高密度的区

域划分为簇^[16]。

三维点云 P 可表示为

$$P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_i \mid 1 \leq i \leq n\}, \quad (2)$$

式中 $p_i = \{(x, y, z) \mid x \in \mathbf{R}, y \in \mathbf{R}, z \in \mathbf{R}\}$ 。

点 p_i 在给定半径 eps 内的邻域,记为 $\text{epsneb}(p_i)$,是满足以下等式的点的集合:

$$\text{epsneb}(p_i) = \{p_j \mid \sqrt{(p_i - p_j)(p_i - p_j)^T} \leq \text{eps}\}. \quad (3)$$

核心点、边界点和噪声点的定义为

$$C_{\text{type}} = \begin{cases} -1(\text{noise point}), & N[\text{epsneb}(p_i)] = 1 \\ 0(\text{boundary point}), & 1 < N[\text{epsneb}(p_i)] \leq k \\ 1(\text{core point}), & N[\text{epsneb}(p_i)] > k \end{cases} \quad (4)$$

DBSCAN 算法是:对于点云 P 中的每一个点,计算给定半径(eps)邻域内的点的个数,根据个数指定当前点类型,即噪声点、边界点或者核心点,如果该点在指定半径内的邻接点数大于给定的阈值 k ,则属于核心点,那么将处于该半径内的点 $[\text{epsneb}(p_i)]$ 归为一簇,同时采用广度优先遍历此邻域内的点,逐步将这个簇扩大,重复这种操作,直到点云 P 中所有的点都被访问。

3.2 果树冠层多源信息融合方法

多源信息融合首先需要通过图像配准将点云数据和彩色图像数据转换到同一个坐标系中,以 PMD 相机坐标系为基准坐标系,对彩色图像进行坐标变换,然后利用彩色图像建立颜色索引,在三维坐标系中对每个点云赋值,实现多源信息融合。

前期针对不同生长时期的果树冠层图像进行了研究^[17-18],在此基础上,将彩色图像的颜色信息赋予对应点云^[19],旨在构建具有颜色信息的三维点云模型,具体过程如图 3 所示。

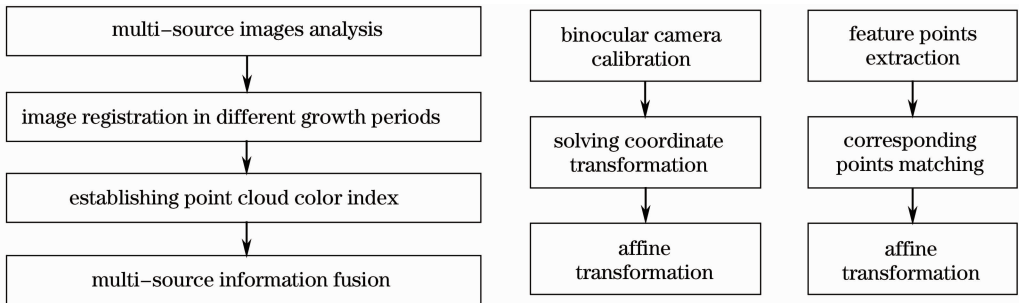


图3 多源信息融合过程。(a)多源信息融合流程图;(b)基于相机标定的配准方法;(c)基于图像特征的配准方法

Fig. 3 Information fusion of multi-source. (a) Flowchart of data fusion; (b) registration based on camera calibration; (c) registration based on image feature

3.3 基于最近点迭代算法 (ICP) 算法的三维点云拼接方法

3.3.1 三维点云的粗匹配

使用主成分分析法 (PCA) 对三维点云数据进行粗匹配, 通过统计的方法实现坐标系的初步变换, 这样可避免不同位置下初始状态的差异导致的配准发散现象, 提高匹配精度。主成分分析法是一种正交线性变换, 变换之后的数据在新坐标系各个坐标轴上的投影均与其方差对应, 数据变化最大的线性组合是第一主元方向, 变化次大的是第二主元, 以此类推^[20]。

以三维点云获取模型中的位置一和位置二的点云 \mathbf{P} 和 \mathbf{Q} 为例, 其中,

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n_1} \\ y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n_1} \\ z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n_1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} x_{21} \\ y_{21} \\ z_{21} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

具体步骤为:

1) 对于点云 \mathbf{P} , 先找随机变量的均值, 即点云中心 $O_1(\bar{X}_1, \bar{Y}_1, \bar{Z}_1)$, 计算公式为

$$\bar{X}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} X_{1i}}{n_1}, \quad \bar{Y}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} y_{1i}}{n_1}, \quad \bar{Z}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} z_{1i}}{n_1}; \quad (6)$$

2) 计算点云顶点的协方差矩阵, 公式为

$$\mathbf{C}_1 = E\{(\mathbf{P} - O_1)(\mathbf{P} - O_1)^T\}, \quad (7)$$

由于该协方差矩阵为实对称矩阵, 实对称阵的特征向量相互正交, 因此可以采用奇异值分解法构建由此三个特征向量定义的空间坐标系 $\mathbf{U}_1, \mathbf{D}_1, \mathbf{V}_1, \mathbf{U}_1$ 和 \mathbf{V}_1 分别表示三维模型在空间顶点最密集的方向和模型上点分布最稀疏的方向;

3) 同理, 对点云 \mathbf{Q} 求出点云中心 O_2 和顶点协方差矩阵的三个特征向量 $\mathbf{U}_2, \mathbf{D}_2, \mathbf{V}_2$;

4) 通过点云 \mathbf{P}, \mathbf{Q} 的特征向量可求解旋转矩阵和平移矢量。

PCA 算法的使用可对获取的点云数据进行初步调整, 得到较优的点云初始状态, 有利于精匹配中的加速收敛, 提高点云匹配精度。

3.3.2 三维点云的精匹配

ICP 是一种通用的, 且与表示方式无关的解决 3D 点集配准问题的方法。ICP 算法实质上是基于最小二乘法的最优匹配方法, 它重复进行“确定对应点集——计算最优刚体变换”的过程, 直到设定的收敛准则得到满足^[21]。ICP 算法首先需要确定两片

点云的对应点集, 然后通过最小二乘法迭代计算旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矢量 \mathbf{T} , 使得误差函数最小。

根据最近距离确定方法的不同, 可把 ICP 及其各种改进算法分成三类: 点到点的最近距离、点到投影的最近距离和点到面的最近距离^[22]。

最为简单的最近点计算方法是直接采用欧氏距离法, 此方法匹配精度高, 但是对初始状态要求较高^[23], 本文采用 PCA 算法获取了较好的初始状态, 因此直接采用点到点的方法寻找最近点, 然后通过奇异值分解求得坐标变换向量, 将得到的新数据作为下一次迭代的源数据。

假设点云 \mathbf{P} 中的一点 p 的坐标为 (x_1, y_1, z_1) , 在点云 \mathbf{Q} 中的对应点为 $q(x_2, y_2, z_2)$, $q_i(x_{2i}, y_{2i}, z_{2i})$ 表示 \mathbf{Q} 中的任意一点, 两点之间的欧氏距离定义为

$$d(p, q_i) = \|p - q_i\| = \sqrt{(x_1 - x_{2i})^2 + (y_1 - y_{2i})^2 + (z_1 - z_{2i})^2}. \quad (8)$$

整个过程可以具体描述为:

1) 获取目标点云 \mathbf{P} (含有 N_1 个点) 和参考点云 \mathbf{Q} (含有 N_2 个点);

2) 采用 (8) 式寻找 \mathbf{P}_k 在 \mathbf{Q} 中的最近点集 \mathbf{Q}_k ;

3) 奇异值分解求解旋转变换矩阵 \mathbf{R}_k 、平移矢量 \mathbf{T}_k 以及误差值 \mathbf{E}_k ;

4) 对目标点云进行坐标变换, 得到 \mathbf{P}_{k+1} ;

5) 判断误差 \mathbf{E}_k 是否收敛, 若收敛, 则得到最后的坐标变换矩阵和变换后的目标点云 \mathbf{P}_{k+1} , 若不收敛, 则跳到步骤 2) 迭代运算直到误差收敛。

4 实验验证与分析

课题组于 2014 年 2 月到 2014 年 5 月在北京市昌平区建立的苹果园实验基地内进行了大量实验, 选取自然光线下开花期和坐果期的苹果树图像数据各 30 组, 用于多源信息融合和不同位置下的三维点云拼接方法研究。

4.1 多源信息融合的实验分析

以花期的一组数据为例, 信息融合过程如图 4 所示。图 4(a) 是获取的彩色相机图像, 图 4(b) 是 PMD 相机的幅度图像, 容易看出幅度图像易于区分前景和背景, 对其二值化后得到图 4(d), 像素值为 1 的点记为有效点。图 4(e) 是 PMD 相机获取的原始三维点云数据, 得到的是半顶角为 40° 的正四棱锥, 由于没有去除背景和噪点, 难以辨别出目标物体的形状, 因此结合幅度图像的有效像素和聚类筛选, 得

到图 4(f), 可以看到经过处理之后, 三维坐标系中的树形已经较为显著。图 4(c) 是图 4(a) 经过图像配准后, 与图 4(b) 在同一坐标系下的彩色图像, 根

据图 4(c) 建立的颜色索引对三维坐标系中相应的点着色, 得到图 4(g) 的效果。

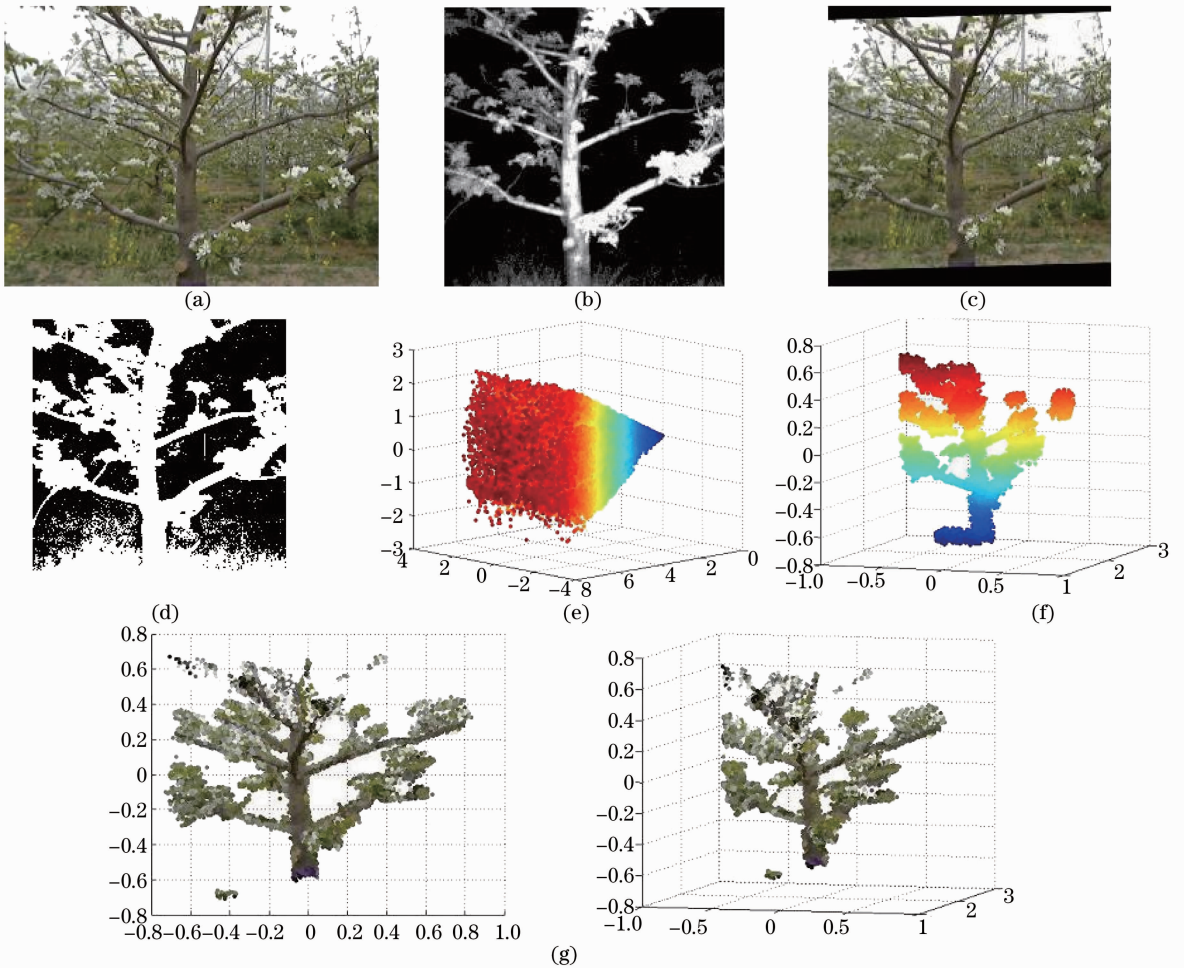


图 4 多源信息融合。(a)彩色相机图像；(b)PMD 幅度图像；(c)配准后的彩色图像；(d)幅度图像二值化；(e)原始三维点云；(f)聚类筛选后的三维点云；(g)信息融合效果图

Fig. 4 Multi-source information fusion. (a) Color image; (b) amplitude image of PMD; (c) color image after registration; (d) amplitude image after binarization; (e) original 3D point cloud; (f) 3D point cloud after preprocessing; (g) 3D point after information fusion

由图 3 可以看出, 使用的多源信息融合方法有效地结合了 PMD 相机和彩色相机的优点, 从复杂的果园背景中分离出了果树冠层, 并且通过彩色图像获取了三维点云中每个像素点的颜色信息, 增强了视觉效果, 但是在点云筛选的同时存在信息丢失的情况, 试图在三维点云拼接的过程中得到弥补。

4.2 三维点云拼接算法实验分析

图 5 是对不同位置下获取的三维点云数据进行拼接处理的过程。4.1 节中对花期的一个视角下的多源信息融合结果进行了详细分析, 图 5(a) 是从另一视角获取的同一棵苹果树冠层的图像, 图 5(b) 是由图 4 可以看出, 通过基于主成分分析算法确

与彩色图像信息融合之后的三维效果图, 由于遮挡, 果树的主干无法正常显示, 因此, 对不同位置下获取的点云数据进行拼接处理, 以得到完整的果树冠层三维信息。图 5(c) 是拼接之前的三维点云图, 红色点和蓝色点分别代表不同的视角, 可以看出两组点云在各个坐标轴方向上都存在较大偏差。图 5(d) 是基于 PCA 算法获取的初始位置, 图 5(e) 是基于 ICP 算法的点云拼接之后的三维点云图, 从主干的位置基本保持一致可以看出, 两组点云较好地融合在一个坐标系中, 图 5(f) 是拼接之后的具有真彩色三维点云模型。

定点云的初始位置, 采用最近点迭代算法最终实现

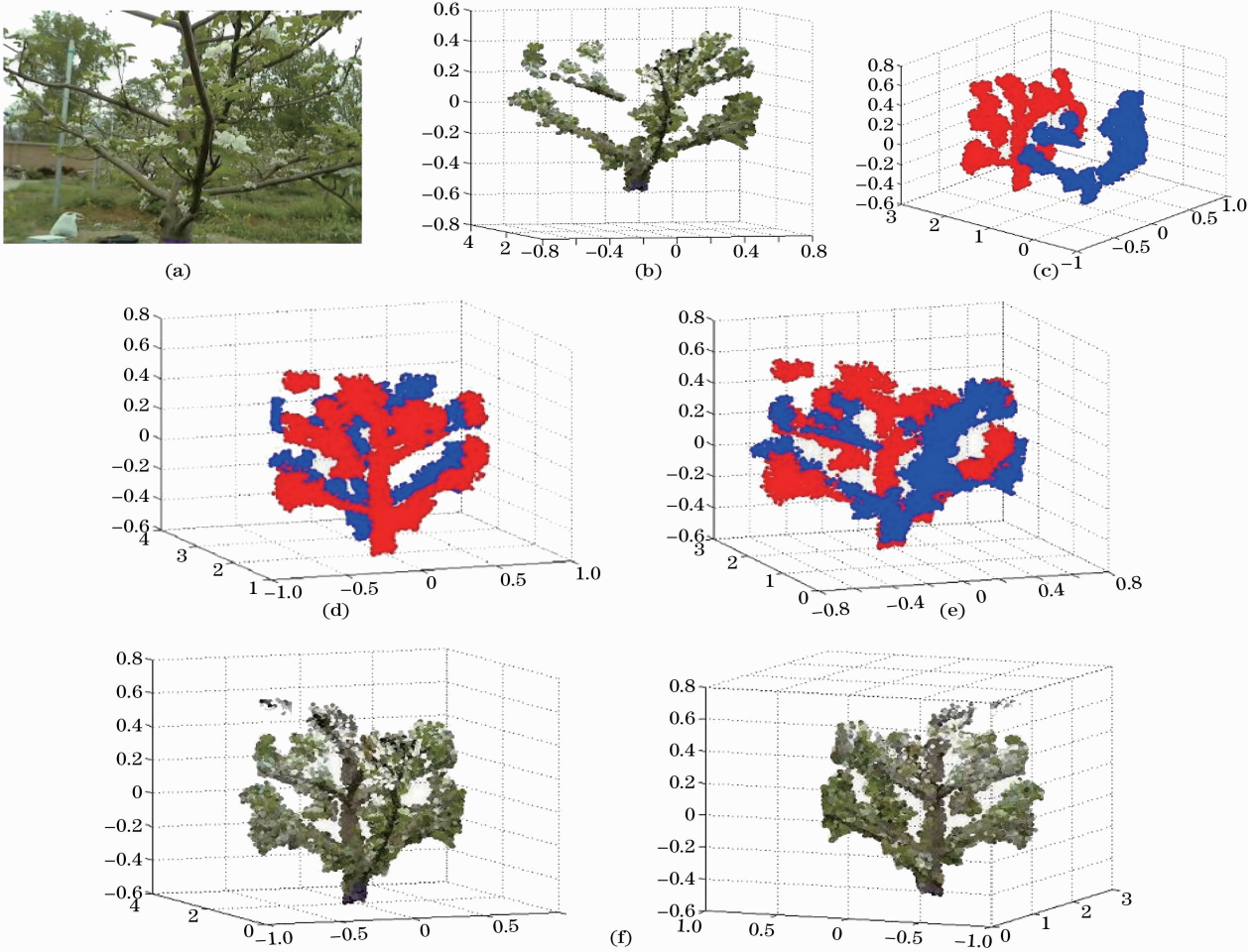


图 5 花期三维点云拼接。(a)彩色相机图像；(b)信息融合效果图；(c)不同位置下的三维点云图；(d)粗匹配后的三维点云图；(e)精匹配后的三维点云图；(f)三维点云拼接效果图

Fig. 5 3D point splicing at flowering stage. (a) Color image; (b) 3D point after information fusion; (c) 3D point in different perspectives; (d) result of prealignment stage; (e) result of refinement stage; (f) result of 3D point splicing

不同位置下三维点云的拼接过程,可以较好地弥补单个角度下拍摄造成的数据缺失。

4.3 三维点云拼接算法性能评估实验

为了客观地评价三维点云拼接算法的精确度和时间复杂度,采用了三种算法对开花期和坐果期获取的共 15 组数据进行了比较验证。这三种算法分别是:

- 1) 仅采用最近点迭代法的拼接算法,记作 ICP;
- 2) 文献[24]中提及的迭代最小空间分布熵法,记作 ILSDE-ICP;
- 3) 本文结合主成分分析法和最近点迭代法的拼接算法,记作 PCA-ICP。

假设点云 P_1 和点云 P_2 中的第 i 个对应点的三维坐标分别为 $P_{1i}(x_{1i}, y_{1i}, z_{1i})$ 。和 $P_2(x_{2i}, y_{2i}, z_{2i})$,将匹配点对定义为两片点云中的最近点,误差

定义为匹配点对的距离,误差越小,表示拼接的精度越高。理想状态下,当各最近点对之间的距离均为零时,此时得到的变换矩阵为无误差拼接。误差计算的表达式为

$$E_{err}(i) = \sqrt{(x_{1i} - x_{2i})^2 + (y_{1i} - y_{2i})^2 + (z_{1i} - z_{2i})^2}. \quad (9)$$

对于两组数据之间的点云拼接,匹配点对的距离沿着相机方向逐渐变大,取误差最小的 80 组匹配点对表征三维点云的拼接误差。三维点云拼接算法的性能结果分析如表 1 所示。

由表 1 可以得到,对于果树冠层的三维点云拼接,PCA-ICP 算法的精确度明显高于 ICP 算法和 ILSDE-ICP 算法,时间复杂度上与 ILSDE-ICP 算法相当,适用于果园复杂环境下对实时性要求不高的果树冠层三维重建。

表 1 拼接算法的性能分析

Table 1 Statistical results of splicing algorithm

Programs	Matching points	Maximum error /cm	Minimum error /cm	Average error /cm	Run time /s
ICP	1200	22.03	0.02	12.05	52.0473
ILSDE-ICP	1200	7.56	2.11	4.35	193.3954
PCA-ICP	1200	5.72	1.92	2.62	199.2238

5 结 论

1) 提出了采用多源相机融合技术实现果园复杂背景下的果树冠层三维重建,旨在为果树的剪枝、疏花疏果和采摘等果园管理提供技术支持。

2) 通过对 PMD 相机获取的幅度图像二值化,去除复杂背景环境,再采用密度聚类的方法进行点云筛选去除噪声,并简化点云,大大减小了后续处理的计算量。

3) 采用前期研究的多源图像配准算法和彩色图像的索引图像,实现了果树冠层多源信息的融合。在此基础上,研究了果树冠层三维点云的拼接算法,对经过预处理之后的点云,采用主成分分析法确定点云的初始位置,通过最近点迭代算法实现不同视角下的点云间的精确匹配,利用奇异值分解法求得坐标变换关系。

4) 对果树花期和坐果期获取的数据进行多源信息融合和三维点云拼接的实验验证,并用多种算法进行了性能评估对比实验,拼接的平均误差为 2.62 cm,分析结果表明具有较好的稳定性和可靠性。

5) 算法的时间复杂度大,若是用于实时场景下的三维重建,还有待于进一步的研究。

参 考 文 献

- Wang Jingyan, Li Zhuang, Li Min, *et al.*. Existing problem, countermeasure and development trend of apple industry in China [J]. *China Fruits*, 2011, (2): 62-65.
汪景彦, 李 壮, 李 敏, 等. 我国苹果业存在问题及其对策与发展趋势[J]. *中国果树*, 2011, (2): 62-65.
- M Nielsen, D C Slaughter, C Gliever. Vision-based 3D peach tree reconstruction for automated blossom thinning [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 8(1): 188-196.
- Cai Jianrong, Sun Haibo, Li Yongping, *et al.*. Fruit trees 3-D information perception and reconstruction based on binocular stereo vision [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(3): 152-156.
蔡健荣, 孙海波, 李永平, 等. 基于双目立体视觉的果树三维信息获取与重构[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(3): 152-156.
- Yuan Xiaomin, Zhao Chunjiang, Wen Weiliang, *et al.*. Detailed modeling of 3-D configuration of tomato plant [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(12): 204-210.
袁晓敏, 赵春江, 温维亮, 等. 番茄植株三维形态精确重构研究

[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(12): 204-210.

- Y Lin, J Hyyppä. Multiecho-recording mobile laser scanning for enhancing individual tree crown reconstruction [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(11): 4323-4332.
- A Bucksch, K Khoshelham. Localized registration of point clouds of botanic trees [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(3): 631-635.
- Wang Jian, Zhou Guomin. Trunk reconstruction method based on Laser scanner [J]. *Microcomputer Information*, 2009, 25(8-3): 227-230.
王 剑, 周国民. 基于激光扫描仪的树干三维重建方法研究 [J]. *微计算机信息*, 2009, 25(8-3): 227-230.
- P Raunonen, S Kaasalainen, M Kaasalainen, *et al.*. Approximation of volume and branch size distribution of trees from laser scanner data [J]. *Int Archives Photogramm, Remote Sens, Spatial Inf Sci*, 2011, 38(5): 1-6.
- T Watanabe, J S Hanan, P M Room, *et al.*. Rice morphogenesis and plant architecture: Measurement, specification and the reconstruction of structural develop by 3D architectural modeling [J]. *Annals of Botany*, 2005, 95(7): 1131-1143.
- Wang Fei. Study on Fractal Dimension and Three-Dimensional Digital Modeling and STAR Values of High Spindle Fuji Apple Tree [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012.
王 菲. 高纺锤形富士苹果树分形维数及三维数字化建模和 STAR 值的研究 [D]. 杨凌: 西北农林大学, 2012.
- Yang Liang, Guo Xinyu, Zhao Chunjiang, *et al.*. 3D morphological reconstruction of cucumber leaf based on multiple images [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(2): 141-144.
杨 亮, 郭新宇, 赵春江, 等. 基于多幅图像的黄瓜叶片形态三维重建 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 141-144.
- M Lindner, I Schiller, A Kolb, *et al.*. Time-of-flight sensor calibration for accurate range sensing [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2010, 114(12S1): 1318-1328.
- S F Salmerón, G A Ribas, C T Genis. Exploitation of time-of-flight (ToF) cameras [R]. Technical Report IRI-TR-10-07, Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, CSIC-UPC, 2010.
- Feng Juan, Liu Gang, Wang Shengwei, *et al.*. Multi source images registration for harvesting robot to recognize fruits [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(3): 197-203.
冯 娟, 刘 刚, 王圣伟, 等. 采摘机器人果实识别的多源图像配准 [J]. *农业机械学报*, 2013, 44(3): 197-203.
- Li Jia, Ayiguli Aman, Zheng Dehua, *et al.*. Automatically identifying uncertain spherical targets in 3D point clouds of complex scenario [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2013, 25(10): 1489-1495.
李 嘉, 阿依古丽·阿曼, 郑德华, 等. 复杂场景三维点云中未知球形目标的自动识别方法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(10): 1489-1495.
- Chen Xiaoxia, Chen Xiaowei. Sieving scattered 3D point clouds using clustering analysis for 3D surface reconstruction [J]. *Computer Systems & Applications*, 2011, 20(4): 141-144.
陈晓霞, 陈孝威. 三维重建中散乱点云的聚类筛选与网格重建

- [J]. 计算机系统应用, 2011, 20(4): 141-144.
- 17 Zhou Wei, Feng Juan, Liu Gang, *et al.*. Application of image registration technology in apple harvest robot [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(11): 20-26.
周 薇, 冯 娟, 刘 刚, 等. 苹果采摘机器人中的图像配准技术研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 20-26.
- 18 Zhou Wei, Liu Gang, Ma Xiaodan, *et al.*. A study on multi-image registration of apple tree at different growth stages [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0215001.
周 薇, 刘 刚, 马晓丹, 等. 不同生长时期果树多源图像的配准方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0215001.
- 19 Liu Shanyong. Research on laser scanning point cloud data and digital image sequence registration [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, (4): 92-95.
刘善勇. 三维激光点云与序列数码影像配准方法的研究[J]. 城市勘测, 2011, (4): 92-95.
- 20 Zhang He, Yang Jinling, Cao Xiange, *et al.*. Principal component analysis reconstruction surface algorithm based on points cloud data [J]. J Heilongjiang Institute of Technology, 2010, 24(1): 39-42.
张 贺, 杨金玲, 曹先革, 等. 基于点云数据的主成分分析重构表面算法[J]. 黑龙江工程学院学报(自然科学版), 2010, 24(1): 39-42.
- 21 Zhao Mingbo, He Jun, Luo Xiaobo, *et al.*. Two-viewing angle lidar data registration based on improved iterative closest-point algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1128007.
赵明波, 何 峻, 罗小波, 等. 基于改进迭代最近点算法的两视角激光雷达数据配准[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1128007.
- 22 Sun Junhua, She Ping, Liu Zhen, *et al.*. Automatic 3D point cloud registration based on hierarchical block global search [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 174-180.
孙军华, 射 萍, 刘 震, 等. 基于分层块状全局搜索的三维点云自动配准[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 174-180.
- 23 Tao Haiji, Da Feipeng. Automatic registration algorithm for the point clouds based on the normal vector [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0809001.
陶海跻, 达飞鹏. 一种基于法向量的点云自动配准方法[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0809001.
- 24 Zuo Chao, Lu Min, Tan Zhiguo, *et al.*. A novel algorithm for registration of point clouds [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1214004.
左 超, 鲁 敏, 谭志国, 等. 一种新的点云拼接算法[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1214004.

栏目编辑: 张浩佳