

成熟期苹果树冠层器官异源图像配准*

马晓丹^{1,2} 刘刚¹ 冯娟³ 周薇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. 黑龙江八一农垦大学信息技术学院, 大庆 163319; 3. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071001)

摘要: 为精确构建果树冠层彩色三维空间结构,以成熟期苹果树冠层为研究对象,将 PMD 摄像机及彩色摄像机相结合获取冠层器官异源图像,开展异源信息配准技术研究。将 SIFT 算法应用于异源图像特征点提取研究中,并应用目标函数优化 RANSAC 算法完成同名点提纯以保证特征点匹配的有效性,避免了异源图像尺度变化及果园自然光照的影响;在分析异源图像成像效果基础上,确定了应用双线性映射模型求解异源图像空间映射关系,有效克服了应用仿射变换模型求解异源图像空间映射关系的不精确性。果园不同自然环境下的配准实验表明:提出的混合算法适用于苹果树冠层器官异源图像的配准,晴天顺光环境下的正确配准率为 88.2%,晴天逆光环境下的正确配准率为 84.2%,阴天环境下的正确配准率为 72.7%。

关键词: 苹果树冠层 异源图像 配准 PMD 摄像机 彩色摄像机

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0082-07

引言

果树冠层是指果树树体上方的树叶、枝条和叶幕的总和,包括果树的枝、叶、花和果实等器官的大小、形状、方位以及分布情况^[1]。成熟期果树冠层可视化技术的研究对于果园信息化管理中采摘及测产等关键环节具有重要的意义。近年来,立体视觉技术较多地应用到植株的三维重建中^[2-3]。研究表明,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。文献[4-5]能够降低或避免自然光照对视觉系统造成的影响,但利用该方法建立模型需要大量的人工交互,效率较低。利用三维数字化仪进行植株冠层结构重建得到了较多研究^[6-7]。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。

PMD (Photonic mixer device) 摄像机是近年来研制的一种测量物体深度(距离)信息的新型设备,以“高帧速”捕获场景的深度图像,但分辨率较低(200 像素×200 像素)。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。将 PMD 摄像机和彩色摄像机相结合,可互为补充,为果树冠层三维重建提供了有力的方法和工具^[8]。基于

PMD 和彩色摄像机的双摄像机异源图像配准问题是保证三维重建精确度的关键,传统图像配准的重点主要集中于配准基于同一摄像机获取的图像,而基于 PMD 与彩色摄像机的异源图像配准研究较少。

本文以成熟期苹果树为研究对象,开展基于 PMD 及彩色摄像机的异源图像配准技术研究,以期提高苹果树冠层三维重建的精确度,为智能化的果树采摘及测产等果园管理关键环节提供相关理论依据。

1 冠层器官异源图像获取

在北京市昌平区香堂村中国农业大学果树采摘机器人试验示范基地完成成熟期苹果树冠层图像采集,异源图像采集系统由 PMD Technologies 公司的 PMD CamCube 3.0 型深度摄像机和 Logitech 公司的彩色摄像机构成,如图 1 所示,二者采用上下结构安放。

PMD CamCube 3.0 摄像机基于飞行(Time of flight, ToF)时间原理,主动光源发射的波长为 870 nm,利用内部 200 像素×200 像素分辨率的光学传感器 PhotonICs PMD 41k-S2 获取被测物体的距离和灰度信息,帧速为 40 帧/s,标准测量距离 0.3~7.0 m,可快速获取静态及移动物体的强度信息,依

收稿日期: 2013-06-13 修回日期: 2013-08-14

* 国家自然科学基金资助项目(31371532)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013YJ008)

作者简介: 马晓丹, 博士生, 黑龙江八一农垦大学讲师, 主要从事计算机农业应用技术研究, E-mail: mxm@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

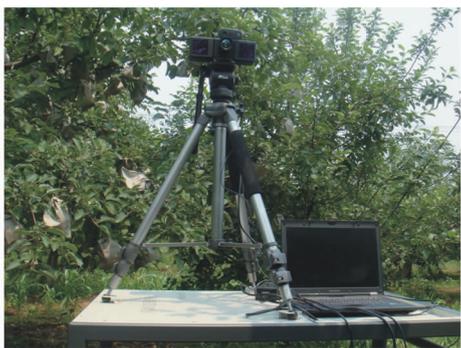


图1 冠层器官异源图像采集系统

Fig. 1 Acquisition system for multi-images of canopy organ

据距离镜头的远近,成像颜色由蓝到红,且能够有效地去除测量范围外的其他树木及天空等复杂干扰物的影响。彩色摄像机空间分辨率为 320 像素 × 240 像素,最大帧速为 30 帧/s。异源图像采集系统获取的试验示范基地苹果树冠层器官异源图像如图 2 所示。

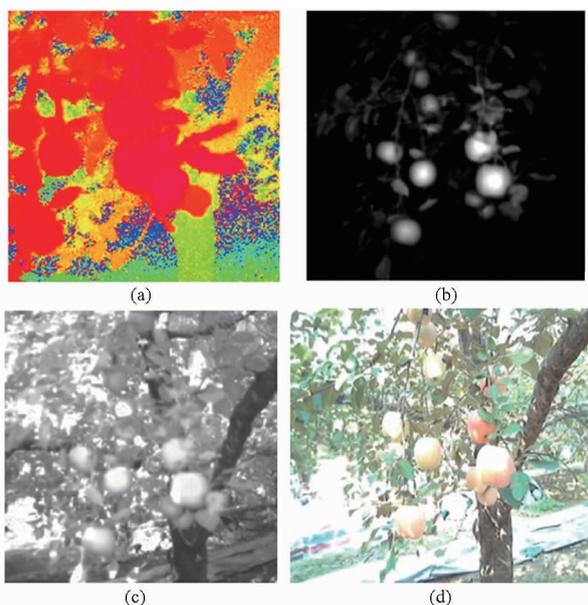


图2 成熟期苹果树冠层器官异源图像

Fig. 2 Multi-source images for canopy organ of apple trees in mature period

(a) 深度图像 (b) 幅度图像 (c) 强度图像 (d) 彩色图像

2 冠层器官异源图像配准

配准^[9]即对同一景物在不同时间、用不同探测器、从不同视角获得的图像,利用图像中的公有景物,通过比较和匹配,找出图像之间的相对位置关系。其目标是找到把一幅图像中的点映射到另一幅图像中对应点的最佳变换。基于特征的图像配准方法克服了基于灰度^[10]和变换域^[11]配准方法易受光照影响的缺点,其中的 SIFT (Scale invariant feature transform) 算法在同源图像的匹配及拼接中得到了较为稳健的配准效果,而在果树冠层异源图像的配准

方面未见相应研究报道,因此具有重要的探索价值。

2.1 冠层器官异源图像配准流程

为了保证冠层三维重建的精度及彩色信息的有效性,确定强度图像为待配准图像,彩色图像为目标图像。首先,分别在异源图像中建立多尺度空间,分别提取尺度不变的特征点;进而通过消除噪声等方法确定有效特征点,确定关键点的主方向,生成 SIFT 特征描述算子;以此确定匹配的同名点,并采用改进的 RANSAC 算法提纯同名点对;最后,依据同名点坐标建立异源图像空间关系映射模型,实现成熟期苹果树冠层的异源图像配准,其配准流程如图 3 所示。

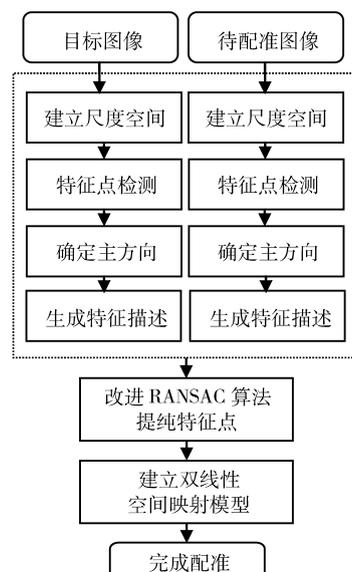


图3 配准流程

Fig. 3 Flowchart of registration

2.2 冠层器官异源图像特征点提取

2.2.1 尺度空间建立

为有效去除噪声影响,在异源图像中确定更为稳定的特征点,通过高斯金字塔模型获得多分辨率的异源图像,选择 DoG (Difference of Gaussian) 算子,采用高斯卷积和建立尺度空间。二维高斯函数表示为

$$G(x, y, \lambda) = 2\pi\lambda^{-1} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{(2\lambda)^2}} \quad (1)$$

式中 x, y ——图像像素的坐标

λ ——尺度因子

G ——异源图像尺度空间

对于异源图像 $P(x, y)$, 在 DoG 尺度空间中,通过与不同尺度高斯差分卷积和计算得到每组异源图像中相邻层的差值图像,高斯差分尺度空间用 DoG 算子表示为

$$D(x, y, \lambda) = (G(x, y, k\lambda) - G(x, y, \lambda))P(x, y) \quad (2)$$

式中 D ——DoG 算子 k ——比例系数
 P ——异源图像

2.2.2 特征点精确检测

在高斯差分空间精确检测特征点的关键在于去除候选特征点中的噪声及低对比度的不稳定因素,保留最稳健的特征点作为后续配准关键点。DoG 算子边缘响应较明显,其主曲率用于描述极值点的位置分布,与 2×2 的 Hessian 矩阵 H 有关,其中

$$H = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

利用 Hessian 矩阵的迹与其行列式的比值来剔除边缘响应点的计算式为

$$\text{Tr}(H)^2 / \text{Det}(H) < r \quad (4)$$

通过反复试验,确定阈值 r 的值为 10。

2.2.3 特征点主方向确定

为使 SIFT 算法更具尺度不变性,提高配准精度,引入特征点邻域像素的梯度方向分布特性来确定特征点主方向。特征点 $t(x, y)$ 处的梯度方向分布和幅度值分别表示为

$$\omega(x, y) = \arctan \frac{t(x, y+1) - t(x, y-1)}{t(x+1, y) - t(x-1, y)} \quad (5)$$

$$D(x, y) =$$

$$\sqrt{(t(x+1, y) - t(x-1, y))^2 + (t(x, y+1) - t(x, y-1))^2} \quad (6)$$

梯度方向最大角度为 360° ,为精确描述特征点方向,将该范围区间划分为 36 个方向柱,每 10° 为一个方向柱,利用直方图统计方法,以特征点 $t(x, y)$ 为中心的 2×2 邻域内采样点的梯度分布,定义直方图中最大值为特征点主方向。

2.2.4 SIFT 特征点描述

依据特征点主方向,选取以特征点 $t(x, y)$ 为中心的 16×16 邻域窗口,对其进行高斯加权,同时将窗口划分为 4 个 4×4 子窗口,分别计算其 8 方向梯度直方图,同一梯度方向累加值计算式为

$$S_{q(l,m)}(i) = \sum_{x,y \in r(l,m)} D(x,y) (1 - |\omega(x,y) - m_i| / d_i) \quad (i=1,2,\dots,8) \quad (7)$$

式中 $q(l, m)$ ——子块 q 的块坐标

m_i ——方向柱中心

d_i ——方向柱宽度

特征描述算子由 4×4 子窗口的梯度方向直方图构成,进而构成 128 维 SIFT 特征点描述符,即

$$\delta = (S_{q(1,1)}, \dots, S_{q(l,m)}, \dots, S_{q(4,4)}) \quad (8)$$

2.3 冠层器官同名点精确检测

在异源图像中,同名点即具有相同梯度特征点, SIFT 特征描述符为 128 维特征向量,为精确提

取同名点对,本文采用 Kd_Tree^[12]方法建立 SIFT 特征向量数据结构,采用计算强度图像与彩色图像特征点之间的欧式距离 $S(D_i, C_i)$ 作为特征向量相似性判定的依据,即以彩色图像的某一特征点为基准,利用 Kd_Tree 方法在强度图像中遍历与彩色图像特征点最近邻特征点与次近邻特征点,并计算二者比值,根据文献[13],确定阈值为 0.65,若比值小于阈值 0.65,即为内点,定义为特征点对。

$$S(D_i, C_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^{128} (d_{ij} - c_{ij})^2} \quad (9)$$

$$\frac{S(D_i, C_i)}{S(D_i, C_k)} < \varepsilon \quad (10)$$

式中 d, c ——强度图像和彩色图像中特征描述算子 128 维特征向量中的一维

$S(D_i, C_k)$ ——强度图像特征点 D_i 与彩色图像中次近邻点 C_k 的距离

ε ——设定的阈值

对于重复匹配和误匹配的特征点对,采用优化的 RANSAC 算法^[14]对其进行提纯,能够有效克服传统 RANSAC 算法在面对图像矩阵大数据量前提下的计算量增大、效率降低的弊端。改进后的 RANSAC 原理是:按照置信度对特征点对进行排序,即对原始的特征点数据集进行了有序排列,从置信度高的特征点对子集中抽取样本,进而减少抽样次数及时间。具体步骤如下:

(1) 记录特征点对集合中每一对特征点对的行列坐标,并求其行标距离及列标距离,分别存放于距离数组 $D(d_{x_i}, d_{y_j})$ 中,并统计每类距离的数量。

(2) 遍历集合所有特征点对,按步骤(1)求行列坐标距离,若其值在原有距离数组中,则将其对应类别的数值加 1,否则,列为新的一类距离。

(3) 将每类距离按照数量的多少排序,并将对应特征点对划分为 n 个集合: n_1, n_2, \dots, n_n , 并将其继续划分为 m 个子集和,即 $\{n_1\}, \{n_1, n_2\}, \dots, \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$, 设置 m 个错误比率,并计算出 m 个错误比率下的不同子集和的抽样次数 M_{mi} 。

(4) 从子集和 $\{n_i\}$ 中随机选取 4 对特征点对,计算模型参数,抽样次数记作 M_i ,当 $M_i > M_{mi}$ 时,从下一个子集和中抽样,否则,执行步骤(5)。

(5) 计算模型参数在第 i 子集和中的内点比例 k 及欧式距离 d ,设定内点比例阈值为 t_1 ,欧式距离和阈值为 t_2 ,若 $k < t_1$,并且 $d > t_2$,则返回步骤(4),否则执行步骤(6)。

(6) 对模型参数进行全局检验,设定全局内点比例阈值为 T_1 ,全局欧式距离和阈值为 T_2 ,若 $k < T_1$,并且 $d > T_2$,则返回步骤(4),否则执行步骤(7)。

(7) 利用以上步骤优选的模型参数,得出模型的所有内点。

2.4 空间映射模型

建立异源图像精确的空间映射关系,对于重建具有颜色特征的苹果树冠层三维结构具有重要意义。其关键在于选取合适的空间关系映射模型。仿射变换^[9]被广泛应用于同源图像的配准研究中,对于异源图像,由于双摄像机成像原理不同,其空间映射关系有待于进一步研究。由于苹果树冠层器官(尤其是果实)具有三维空间属性,且空间分布复杂,而异构摄像机获取到的异源图像虽具有距离信息,但成像效果依然为二维图像,很难表达相同冠层区域的成像差别,因此本文选取 4×8 标准棋盘图(图4)作为观察异源图像成像差别的模板图像。从图4中可以看出,彩色图像中的棋盘格保持原有的正方形形状,而在PMD强度图像中,棋盘格的正方形边缘区域发生变化,产生了轻微透视失真效果,尤其是棋盘底边呈现出曲线趋势,因此,异源图像间的空间变换关系严格意义上不满足仿射变换(线性变换),而应该用非线性关系求解。本文采用双线性映射变换^[15]求解异源图像的空间变换关系,其表达式为

$$G(x, y) = F(ax + by + cx + d, ex + fy + gxy + h) \quad (11)$$

式中 G, F ——彩色图像、强度图像

a, b, \dots, h ——待求解系数

随机选取4对同名点对坐标,依据式(11)构建具有8个未知数的4组方程,求解 a, b, \dots, h 8个空间变换系数,以此建立异源图像空间映射关系。

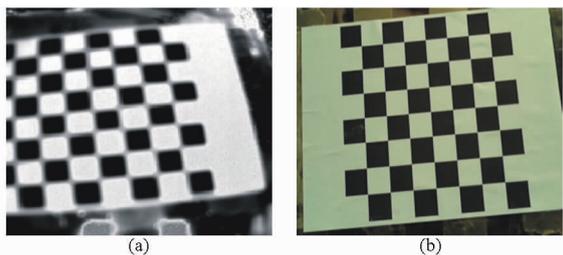


图4 双摄像机获取的棋盘图

Fig.4 Chessboard area captured by two cameras

(a) PMD 强度棋盘图 (b) 彩色棋盘图

3 冠层器官异源图像配准及有效性验证

3.1 异源图像配准试验

为了验证SIFT算法的稳定性,获取成熟期苹果树部分冠层在晴天顺光、晴天逆光及阴天环境下的异源图像作为配准对象。在图像的预处理过程中,为提高同名点检测效率,剪裁彩色图像尺寸,较大程度保留二者共同的图像区域,使其大小与强度图像

大小相同,即 $200 \text{ 像素} \times 200 \text{ 像素}$ 。PMD摄像机获取的深度图与幅度图像虽然能够较好地表现景物图像随距离衰减的程度,但缺少颜色信息,不适合作为配准图像,而强度图像很好地保留了景物图像的灰度特征。因此本文采用PMD摄像机获取的强度图像与彩色图像作为配准试验对象,用于完成成熟期苹果树冠层器官异源图像的配准。

在异源图像的特征点检测环节,恰当的特征点数量^[16]有利于同名点对的精确提取,特征点过少会导致有效特征丢失,特征点太多会影响算法速度。通过大量实验发现,高斯核尺寸直接影响特征点提取数量及高斯金字塔尺度特征空间构建时间,从表1中可以看出,高斯金字塔尺度特征空间的建立时间及匹配的特征点对随高斯核尺寸的增大而增加,但当核尺寸到达 11×11 时,特征点对数量逐渐减少,因此,核尺寸 11×11 为临界值,实验中选择高斯核尺寸为 11×11 ,以此有效保证获得较多同名点对用于建立异源图像的空间映射关系。

表1 高斯核尺寸对SIFT算法的影响

Tab.1 Influence of Gauss kernel on SIFT algorithm

高斯核尺寸	特征空间构建时间/s	特征点对
5×5	0.37	3
7×7	0.42	5
9×9	0.49	8
11×11	0.52	10
13×13	0.60	10
15×15	0.71	7

在果园3种不同自然环境下,利用SIFT算法检测到的冠层异源图像特征点如图5a、5b、6a、6b、7a、7b所示。通过计算强度图像与彩色图像特征点之间的欧式距离获得的同名点粗匹配效果如图5c、6c、7c所示,并采用文中改进后RANSAC算法剔除误匹配的同名点对,提纯后的同名点对如图5d、6d、7d所示。

3.2 异源图像配准实验有效性验证

为验证本文提出的配准算法的有效性,即同名点检测的准确性,在果树采摘机器人试验示范基地开展成熟期苹果树冠层器官异源图像配准有效性验证实验。利用PVC管自制矩形框作为异源图像获取环节的感兴趣区域(Region of interesting, RoI),实验场景如图8a所示。

现有图像配准技术中,较多地针对于同源图像的配准,由于摄像机成像机理相同,因此同源图像的空间映射满足仿射变换,而异源图像的空间映射则不能应用仿射变换求解,通过2.4节的分析可知,本文中异源图像的空间变换为非线性变换,因此若应

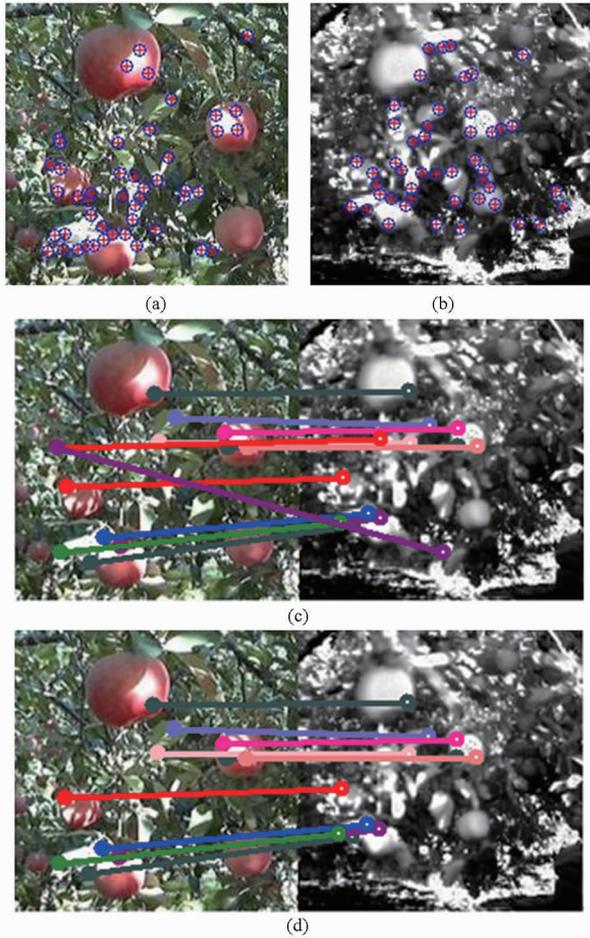


图5 晴天顺光环境下的配准效果

Fig. 5 Registration under a sunny day with frontlighting environment

(a) 彩色图像特征点检测 (b) 强度图像特征点检测
(c) 同名点粗匹配 (d) 同名点提纯

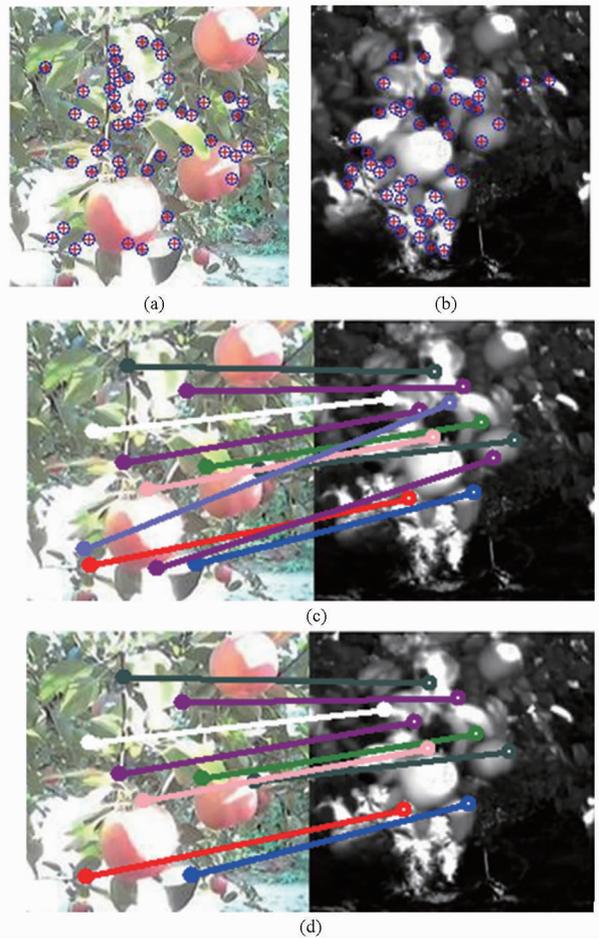


图6 晴天逆光环境下的配准效果

Fig. 6 Registration under a sunny day with backlighting environment

(a) 彩色图像特征点检测 (b) 强度图像特征点检测
(c) 同名点粗匹配 (d) 同名点提纯

用仿射变换求解空间关系,势必会造成配准程度低的弊端,这将严重影响冠层三维重建的精确性。采用标准均方差计算图 8b 彩色图像中 RoI 区域 4 个特征点经双线性空间映射模型(SXX)与仿射变换模型(FS)映射后的坐标与 PMD 强度图像中相对应同名点坐标的距离偏差及均方差,以此判别两种空间映射模型在求解异源图像空间关系的准确程度。

$$E = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{m_1} \sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2} \quad (12)$$

式中 n_1 ——特征点数

(x_i, y_i) ——彩色图像特征点对经空间变换后对应的同名点坐标

(x'_i, y'_i) ——PMD 强度图像中特征点坐标

E ——均方差

手动选取图 8b 彩色图像中的 4 个特征点的坐标,分别采用仿射变换模型及双线性映射模型计算对应 PMD 强度图像中同名点坐标,从表 2 中可以看出,经双线性映射变换后的同名点对之间的水平变

动量、垂直变动量、角度变动量及均方差均小于对应的仿射变换。因此,双线性映射模型更适合于求解异源图像的空间关系,对于精确重建冠层三维形态具有重要的意义。

表 2 空间映射模型对比

Tab. 2 Comparison between two kinds of spatial mapping models

模型	水平变动量	垂直变动量	角度变动量	均方差
FS	0.034 9	1.577 8	1.548 6	0.653 5
SXX	0.005 2	0.003 9	0.643 5	0.287 2

将图 8b 中一组矩形 RoI 区域的 4 对顶点作为同名点对,手动获取其坐标,同时应用本文提出的配准算法精确提取同名点对,并随机选取 4 对同名点对,分别应用式(11)建立双线性空间坐标映射方程,求得异源图像空间变换系数 a, b, \dots, h 依次为 0.736 2, 0.044 8, -0.000 2, -41.019 6, 0.006 1, 0.713 6, -0.000 1, 18.166 7;应用手动选点方式求得的空间变换系数 a, b, \dots, h 依次为 0.737 1,

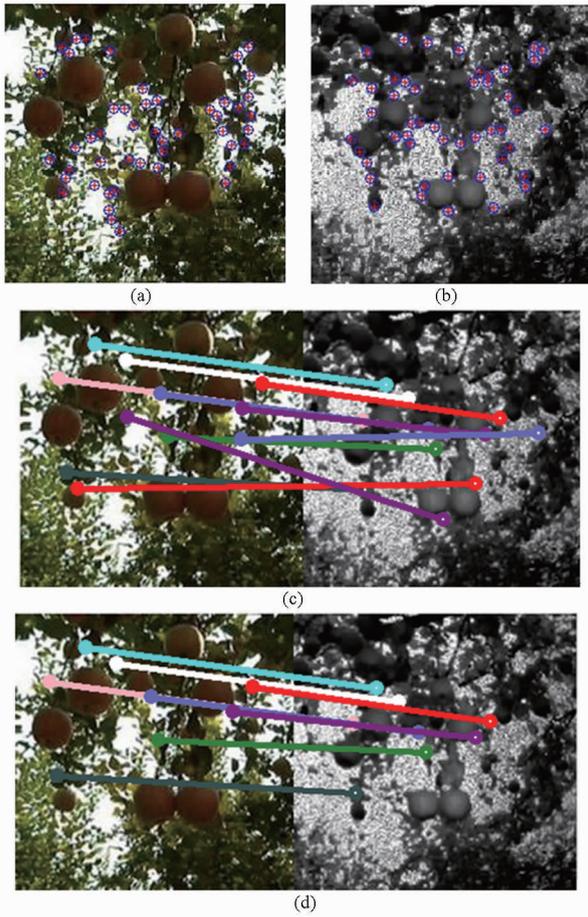


图 7 阴天环境下的配准效果

Fig. 7 Registration under a cloudy day environment

(a) 彩色图像特征点检测 (b) 强度图像特征点检测
(c) 同名点粗匹配 (d) 同名点提纯

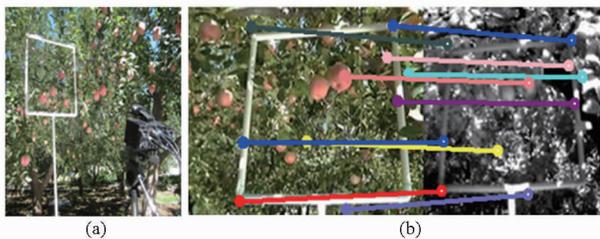


图 8 RoI 区域获取的实验场景

Fig. 8 Test scene for acquisition of RoI area

(a) 实验场景 (b) 同名点提纯

0.040 2, -0.000 1, -41.005 1, 0.009 3, 0.711 3, -0.000 1, 18.165 3。

将手动精确选取矩形区域顶点的 4 对同名点对作为标准点对,并将应用随机选取的 4 对同名点对求解的空间变换系数与之比较,在保留 4 位有效数字的前提下,最大偏差绝对值为 0.014 5;在保留 2 位有效数字的前提下,最大偏差绝对值为零,由此可见,采用本文方法提取的同名点对,能够准确地表达异源图像的空间映射关系,充分体现了本文异源图像配准方法的稳健性。

将系数 a, b, \dots, h 代入式(11),即确定了每一组异源图像的空间映射模型。将彩色图像的每一像素点坐标代入系数确定的空间映射方程,求解对应深度(距离)坐标,从而实现彩色图像与深度图像的精确配准。

为进一步验证本文异源图像配准方法的准确性和普适性,选取果园自然场景下的成熟期冠层异源图像 60 组(晴天顺光、晴天逆光、阴天各 20 组),将本文配准方法与基于 Harris^[17]特征点与 Susan^[18]特征点检测的配准方法进行了对比分析,从表 3 中可以看出,本文方法的平均粗匹配同名点对数低于前两者,说明了文中高斯核尺寸选取的有效性和同名点检测的准确性。在晴天顺光、晴天逆光及阴天 3 种自然环境下,本文方法的正确配准率分别为 88.2%、84.2%、72.7%,而基于 Harris 方法的正确配准率分别为 70.8%、67.9%、57.1%;基于 Susan 方法的正确配准率分别为 75.0%、68.2%、58.3%。说明本文方法对于自然光影响具有较好的鲁棒性,算法较稳定,且平均用时 1.7 s,足以满足后续三维重建实时性的要求。

经分析,影响正确配准率的因素主要有 3 个:①是否有风对异源图像成像效果有很大影响,进而导致有效特征点检测的数量及正确配准率,因此实验工作最好保证在无风环境下进行。②本文采用异构摄像机获取冠层图像,虽然 PMD 摄像机成像能够

表 3 不同环境下的算法效率对比

Tab. 3 Contrast between different algorithms under different environments

配准方法	平均用时/s	晴天顺光			晴天逆光			阴天		
		平均粗匹配同名点对	平均精匹配同名点对	正确配准率/%	平均粗匹配同名点对	平均精匹配同名点对	正确配准率/%	平均粗匹配同名点对	平均精匹配同名点对	正确配准率/%
Harris	2.9	24	17	70.8	28	19	67.9	14	8	57.1
Susan	2.2	20	15	75.0	22	15	68.2	12	7	58.3
SIFT	1.7	17	15	88.2	19	16	84.2	11	8	72.7

精确地获取目标物体的距离信息,但是彩色摄像机成像受光照影响较大,致使晴天逆光和阴天环境下

获取的彩色图像出现过饱和及明暗度对比较低的现象,影响了有效特征点的数量,导致其正确配准率低

于晴天顺光环境下的配准率。③算法本身的性能也是限制正确配准率的因素之一,例如在应用 SIFT 算法计算特征向量时存在同一个点有多个特征方向的问题,导致出现了冗余同名点对的弊端。

4 结论

(1) 将 PMD 摄像机与彩色摄像机相结合,分别获取目标图像的 PMD 图像与彩色图像,深度图像锁定了目标图像距离信息,幅度图像简化了背景图像干扰,强度图像表征了目标图像灰度变换,三者为 PMD 摄像机在同一视角下捕捉的异源图像。实验

中,采用强度图像实现与彩色图像的配准。

(2) 将 SIFT 算法应用于果园异源图像的配准中,在充分分析异源图像成效效果基础上,提出了应用双线性映射模型求解异源图像空间映射关系,避免了采用仿射变换近似求解空间关系的误差。空间映射系数求解精度在 99% 以上,体现了同名点配准的准确性。在果园多种自然场景下进行实验验证的结果表明:本文混合算法适合于不同环境下的异源图像配准。将本文算法与基于 Harris 和 Susan 的特征点检测方法相比较,本文提出的方法在耗时和同名点正确配准率方面,均呈现出较大优势。

参 考 文 献

- 1 马少锋,孟云,孙建设,等.矮砧和乔砧密植红富士苹果树冠层特性比较研究[J].安徽农业科学,2012,40(24):11974-11976.
- 2 Xu Jie, Qi Dawei. The research of tree growth based on image vision theory[C]//2011 International Conference on Image Analysis and Signal Processing,2011;244-247.
- 3 Nielsen M, Slaughter D C, Gliever C. Vision-based 3D peach tree reconstruction for automated blossom thinning[C]//IEEE Transactions on Industrial Informatics,2012,8(1):188-196.
- 4 Mao Shitao, Liu Zaiwen, Lian Xiaofeng, et al. A three-dimensional reconstruction system based on panoramic vision and two-dimensional ranging laser[C]//2011 International Conference on Electrical and Control Engineering,2011:3796-3799.
- 5 Binney J, Sukhatme G S. 3D tree reconstruction from laser range data[C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation,2009:3183-3188.
- 6 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:西北农林科技大学,2012.
- 7 Watanabe T, Hanan J S, Room P M. 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.
- 8 Zhu J J, Wang L, Yang R G, et al. Reliability fusion of time-of-flight depth and stereo geometry for high quality depth maps[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2011,33(7):1400-1414.
- 9 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.
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. (in Chinese)
- 10 高爽,肖扬.两种基于灰度相似性测度的超声波图像配准方法的比较[J].中国图象图形学报,2006,11(3):337-341.
Gao Shuang, Xiao Yang. A comparison of two similarity measures in intensity-based ultrasound image registration[J]. Journal of Image and Graphics,2006,11(3):337-341. (in Chinese)
- 11 李彦虎.亚像素噪声图像配准方法研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- 12 卢贺齐.基于 OpenCL 的实时 KD-Tree 与动态场景光线跟踪[D].杭州:浙江大学,2011.
- 13 周博,郑加强,周宏平.树木图像拼接系统特征点匹配[J].农业机械学报,2010,41(10):195-198.
Zhou Bo, Zheng Jiaqiang, Zhou Hongping. Tree image mosaicing system based on featured area matching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(10):195-198. (in Chinese)
- 14 黄梅.基于改进 RANSAC 算法的图像拼接技术[J].海南大学学报:自然科学版,2011,29(2):172-177.
Huang Mei. Image mosaic method based on improved RANSAC[J]. Natural Science Journal of Hainan University,2011,29(2):172-177. (in Chinese)
- 15 关海鸥,马晓丹.植物叶面积无损测量预处理技术研究[J].农机化研究,2010(3):171-173.
Guan Haiou, Ma Xiaodan. Study on the non-loss measurement pre-processing technology of plant leaf area[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2010(3):171-173. (in Chinese)
- 16 魏晓敏.图像配准算法研究与系统设计实现[D].南京:南京航空航天大学,2010.
- 17 杨蜀秦,宁纪锋,何东健.基于 Harris 算子的籽粒尖端识别方法[J].农业机械学报,2011,42(3):166-169.
Yang Shuqin, Ning Jifeng, He Dongjian. Identification of tipcap of agricultural kernel based on Harris algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(3):166-169. (in Chinese)
- 18 周亚男,程熙,骆剑承,等.改进 GVF 的自动 Snakes 模型[J].中国图象图形学报,2012,17(2):256-262.
Zhou Ya'nan, Cheng Xi, Luo Jiancheng, et al. Automatic Snakes model based on modified GVF[J]. Journal of Image and Graphics,2012,17(2):256-262. (in Chinese)

Engineering, 2009, 6(3): 280 - 289.

26 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 长春:吉林科学技术出版社,2001.

27 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京:北京科学技术出版社,1995.

Reduction of Soil Adhesion and Traction Resistance of Ridged Bionic Press Rollers

Tong Jin Zhang Qingzhu Chang Yuan Chen Donghui Dong Wenhua Zhang Leilei

(Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: The phenomenon of soil adhesion occurred widely when conventional press roller worked. To solve the problem, nine biomimetic press rollers with bionically ridged structures were designed learning from the geometric structure of the ventral surface of dung beetle (*Copris ochus* Motschulsky). Bionically ridged structures using ultra high molecular weight polyethylene material, which possessed good hydrophobic properties, were modeled on the surfaces of press rollers. Orthogonal tests of $L_9(3^4)$ were performed in an indoor soil bin with a moisture content (dry basis) of 20%. The effects of the bottom width of ridge section (W), ridge height to width ratio (R), roller loads (F) and the area ratio (K) on soil adhesion and traction resistance were determined. The results showed that under the identical conditions, all bionic rollers exhibited lower adhesion than a conventional roller against soil in a suitable compaction for corn, and the maximal adhesion reduction rate was 41.08%. The bionic roller with ridged structure with reasonable dimensions could reduce the traction force by 11.75% ~ 39.40% than conventional roller. The order and optimal levels of the experiment factors influencing soil adhesion and resistance were determined by range method. The impact of the different factors on the soil adhesion and resistance of press roller was discussed.

Key words: Bionic ridge Press roller Traction resistance Soil adhesion Soil compaction

(上接第 88 页)

Multi-source Image Registration for Canopy Organ of Apple Trees in Mature Period

Ma Xiaodan^{1,2} Liu Gang¹ Feng Juan³ Zhou Wei¹

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

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

3. College of Information Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

Abstract: In order to construct colorful 3-D spatial structure of canopy accurately, apple tree canopies of maturation period were set for research object, and a PMD camera and a color camera were used to acquire multi-source organ images of apple tree canopies, which aimed at studying registration of multi-source images. SIFT algorithm was used to extract characteristic points from multi-source images and RANSAC algorithm optimized by objective function was adopted to purify feature vectors, which overcame scale change and effect of light. Bilinear mapping algorithm was employed as spatial mapping between multi-source images to avoid inaccuracy of using affine transformation to solve space mapping. The registration test in orchards with different natural environment showed that the method proposed was suitable for registration of multi-source images of apple tree canopies, and the registration accuracy could be 88.2% in sunny day of light environment, 84.2% in sunny day of backlight environment, 72.7% in cloudy day. The research finding could provide maintenance assurance for picking and yielding links of apple orchard after 3-D reconstruction of canopies.

Key words: Canopy of apple trees Multi-source images Registration PMD camera Color camera