

融合 Harris 与 SIFT 算法的荔枝采摘点计算与立体匹配*

郭艾侠¹ 熊俊涛¹ 肖德琴¹ 邹湘军²

(1. 华南农业大学数学与信息学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 为了满足荔枝收获机器人对整串果实采摘作业的需求,提出一种融合 Harris 与 SIFT 算法的荔枝采摘点计算与立体匹配方案。首先在已识别的荔枝结果母枝部位进行 Harris 角点检测,结合提取已识别荔枝果实区域质心与最小外接矩形等特征信息,进行采摘点二维像素坐标的计算。然后通过对比分析,提出对计算采摘点采用带约束条件基于余弦相似度的 SIFT 双目立体匹配,最后进行采摘点计算与双目立体匹配实验验证。结果表明,计算采摘点的匹配成功率可达 89.55%,且该方法更能满足在结构复杂的结果母枝上采摘点计算的精度需求。

关键词: 荔枝收获机器人 立体匹配 Harris 算法 SIFT 算法

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0011-07

Computation of Picking Point of Litchi and Its Binocular Stereo Matching Based on Combined Algorithms of Harris and SIFT

Guo Aixia¹ Xiong Juntao¹ Xiao Deqin¹ Zou Xiangjun²

(1. College of Mathematics and Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: A vision-based fruit-vegetable picking robot helps to improve picking efficiency by making full use of the information by which the target of harvest can be recognized and located. For harvesting robots, it is important and difficult to calculate and locate the picking point from the recognized main fruit bearing branch of litchi. Hence, calculation of picking point and its stereo match become the research focuses. To meet the needs of picking the whole litchi cluster for litchi picking robot, a scheme of combined algorithms of Harris and improved SIFT to compute picking point of litchi and achieve its stereo matching was proposed. Firstly, corner extraction from the main fruit bearing branch of litchi was carried out by Harris method, and the whole identified area of litchi fruits was taken as a big fruit, the feature information on “centroid” and the maximal vertical coordinate vertex of the MBR (Minimum bounding rectangle) of the big fruit (denoted by Y) were then attained. Then, taking each Harris corner whose vertical coordinates were bigger than Y as the center of circle, all possible circles were computed and the center of circle whose circle area was the maximum was chosen as the pixel coordinate of picking point in original collected litchi image. Furthermore, the computed picking point was described with a characteristic vector of SIFT with 128 dimensions, and its binocular stereo matching based on cosine distance similarity of SIFT was also proposed. Theoretical analysis and experimental results show that the proposed scheme can satisfy the need of vision of litchi picking robot with successful matching rate of 89.55%, which means that the scheme can improve the computation precision of picking point from main fruit-bearing branch with complex construction.

Key words: Litchi harvesting robots Stereo matching Harris algorithm SIFT algorithm

收稿日期: 2015-10-10 修回日期: 2015-10-27

* 广东省自然科学基金博士科研启动项目(2014A030310275、S2013040015381)、国家星火计划资助项目(2014GA780057)和广东省科技计划“三区”人才资助项目(2015A020224034)

作者简介: 郭艾侠, 讲师, 主要从事农业机器人视觉信息处理研究, E-mail: guoaixia@scau.edu.cn

引言

双目立体视觉系统中的图像匹配是在存有视点差异、几何和灰度畸变以及噪声干扰的图像之间寻找同一空间景物像素间对应关系的技术。立体匹配是三维重建的关键技术之一,也是难点之一。由于采摘目标在不同视角下的成像图像会有较大差异,光照条件、微风扰动、摄像头畸变等诸多干扰因素仅被综合成单一的图像像素值。因此,要准确地实现对存在诸多干扰因素的图像进行无歧义匹配是比较困难的。

现有的立体匹配算法大致可以分为基于区域、基于相位和基于特征的3种立体匹配方法^[1]。其中基于区域灰度相似的匹配方法通常以基准图的特征匹配点为中心创建一个固定大小的邻域窗口,然后在待匹配图像中创建一个同样大小的窗口,依据这2个窗口的像素分布是否满足一定的阈值为匹配条件进行匹配。但该方法的计算量很大,对噪声很敏感,且局部窗口的大小难以选择,对无纹理或存有遮挡等不利条件图像的匹配并不适用^[2-3]。基于相位的立体匹配则是通过傅里叶变换把空间图像转换为频域图像,然后通过提取频域图像不同频段的相位信息进行立体匹配,虽然对含有各种噪声干扰因素的图像鲁棒性高^[4-5],但由于此方法是以匹配对应点之间的局部相位相等为假设条件,如果出现相位奇点,即对应点局部相位相等的假设不成立,该方法就会失去有效性。而基于特征的立体匹配则是通过提取识别目标(如质心、线段或边缘等)图像特征,并利用该特征信息在左右成像的图像对中寻找其对应关系^[6],因其定位准确、检测和描述容易、重建精度高,被广泛应用。特别是在如西红柿、柑橘和苹果等圆形单果类目标识别定位的立体匹配中,应用尤为广泛。

荔枝是串型果蔬类,不能直接采用类似圆形单果的质心或边缘为特征进行立体匹配。文献[7-8]利用荔枝彩色图像中景物的色调信息具有恒常性的特点,采用了基于色调空间的区域立体匹配方法,对荔枝采摘点进行了立体匹配研究。该方法计算量大,而且仅在结果母枝为规则直线型荔枝图像的采摘点计算与匹配研究上有较好效果。本文结合常用的 Harris 算法在纹理丰富的区域能够快速有效地提取出大量有用特征点^[9],及 SIFT (Scale invariant feature transform)^[10-11]特征匹配算法具有尺度不变、匹配能力强等特性,且能够在稀疏纹理区域检测出较多特征点的各自优势,提出基于 Harris 与带外极线约束 SIFT 算法融合的荔枝采摘点计算及其立

体匹配方法,拟解决复杂结构的荔枝结果母枝上采摘点的计算与立体匹配问题,为获取采摘点的三维坐标信息奠定基础。

1 融合 Harris 与 SIFT 算法的荔枝采摘点计算与立体匹配方案

荔枝果实生长的生物特性比较适合成串采摘的作业方式,机器人视觉获取的采摘点位置通常处于荔枝串中结果母枝的某个分叉点上。该点不仅在梯度方向上有变化,而且其邻域内像素点的个数也较多。因此,可首先采用 Harris 角点检测的方法,找出结果母枝上所有有梯度变化的角点;然后以各点为圆心作阈值半径为 R 的圆邻域,即为各 Harris 检测点的邻域。再利用数组中获取最大值的算法,获得各角点邻域值为最大的邻域(即该邻域内像素点最多),并将此最大邻域的圆心坐标定义为该串荔枝果的计算采摘点;最后对此计算采摘点进行基于极线约束与余弦相似的 SIFT 立体匹配。本文研究方案的详细步骤描述如下:①在双目立体视觉实验平台^[12]下对同一荔枝串进行左右图像的采集,并对采集图像进行平滑去噪等预处理。②对左幅图像依次进行荔枝串、荔枝果与结果母枝图像分类识别。③提取左幅图像中已识别的荔枝果区域的质心、最小外接矩形等特征信息。④采用 Harris 算法提取左幅图像中结果母枝部位各角点,结合步骤③提取的信息进行采摘点的计算。⑤将步骤④计算的采摘点表示为 SIFT 向量描述子的形式^[10-11],在右幅图像上进行带极线约束与余弦相似匹配策略的 SIFT 立体匹配,获取左幅图像中的计算采摘点在右幅图像的对应成像位置。⑥利用双目视觉系统的成像模型对采摘点的三维坐标进行计算,为机械手采摘作业提供运动参数。

2 荔枝图像的分类识别与采摘点计算

2.1 荔枝图像的分类识别

成熟荔枝串是荔枝采摘机器人的作业目标,每一荔枝串中含有多个荔枝果和一个主杆的结果母枝、叶子及其他背景噪声。为实现精确计算出采摘点并进行视觉立体匹配的目标,对采集荔枝图像中的荔枝串、荔枝果和结果母枝的分类识别尤为关键。在对采集的原始图像进行中值滤波平滑去噪预处理后,采用阈值与 FCM (Fuzzy c-mean) 融合的方法可分类识别出荔枝串、荔枝果与结果母枝各部位图像。详细方案参照文献[13-14],采集荔枝图像及其中的荔枝串、荔枝果与结果母枝各部位如图1所示。

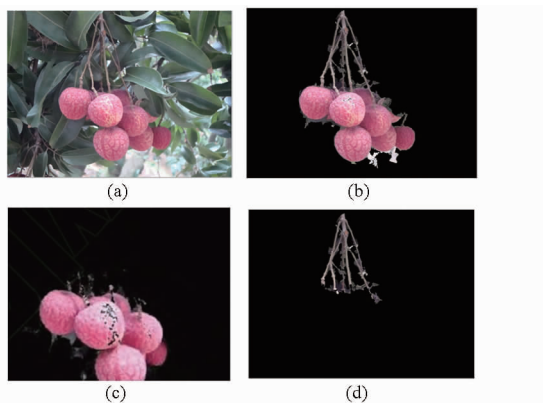


图 1 自然环境下采集荔枝图像各部位

Fig. 1 All parts of litchi image collected in nature environment

(a) 原图 (b) 荔枝串 (c) 荔枝果 (d) 结果母枝

2.2 识别荔枝果区域的特征提取

将已识别的荔枝果区域用最小外接矩形标识出来,当作一个大“果实”。如荔枝果的二值图像区域用 R 表示, (x, y) 为图像 R 中某个像素点坐标,其二值图像值 $f(x, y)$ 为 1 (0 为背景, 1 为荔枝果目标), R 的区域面积 A 的计算公式为

$$A = \sum_{(x,y) \in R} f(x, y) \quad (1)$$

区域重心坐标 $(\bar{x}, \bar{y})$ 的计算公式为

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{A} \sum_{(x,y) \in R} x \\ \bar{y} = \frac{1}{A} \sum_{(x,y) \in R} y \end{cases} \quad (2)$$

2.3 采摘点的计算

提取出已识别果实区域的质心与最小外接矩形等特征信息后,对结果母枝进行基于 Harris 算法的角点检测,最后计算出采摘点的二维图像坐标。为实现此过程,需定义以下 2 个函数:

定义 1: 圆函数 $W_i(x_i, y_i) = \{(x, y) \mid \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} = R\}$, 其中 (x_i, y_i) 为检测的各个 Harris 角点坐标。因荔枝结果母枝形状多变,该阈值半径需手动设置,不能统一。

定义 2: 圆面积函数 $E = \sum_{P_i \in W_i} |P_i W_i|$, 其中 P_i 的像素坐标为 (α_i, β_i) , $\sum_{P_i \in W_i} |P_i W_i|$ 为所有满足 $\sqrt{(\alpha_i - x_i)^2 + (\beta_i - y_i)^2} \leq R$ 条件的点的个数。

利用 Harris 算法,结合上述的 2 个定义函数,本文提出的采摘点计算过程详细描述如下:提取已识别果实区域的最小外接矩形,得出外接矩形 4 个顶点坐标,记录顶点纵坐标最大值 Y ;提取已识别果实区域的质心坐标,用 $O(x_c, y_c)$ 表示;利用 Harris 算法在已识别的结果母枝部位进行各角点的检测,各检测角坐标为 (x_i, y_i) ,以 $y_i > Y$ 的各角点(表明采

摘点的位置在果实区域的上方)为中心,按定义 1 要求计算各 $W_i(x_i, y_i)$,并按定义 2 统计各圆面积函数 E_i ;利用求极值算法思想获得圆面积函数为最大的圆(即为某检测角点邻域面积最大的圆),此圆圆心坐标 $W_i(x_i, y_i)$ (Harris 的一个角点)即为计算采摘点的二维像素坐标。

3 计算采摘点基于余弦距离匹配策略的 SIFT 匹配方法

3.1 SIFT 算法的特征提取

SIFT 算法可用于局部特征的提取,是一种基于尺度空间的匹配算法,在图像缩放、旋转、亮度变化下都具有稳定的匹配能力^[10-11,15]。基于双目立体视觉系统的 SIFT 特征匹配算法的原理是:首先,分别在 2 幅图像的尺度空间进行特征检测并定位关键点(Keypoints)的位置以及关键点的尺度。然后,计算关键点的梯度值和梯度方向,确定关键点的主方向,并将关键点的特征描述符用向量的形式表示。最后,以 2 幅图像关键点特征向量的欧氏距离最小为匹配依据,进行双目立体视觉系统下图像特征点的立体匹配。

机器人双目视觉系统若要成功实现立体匹配,特征点的提取是关键。如何提取有效合理的特征点是立体匹配得以成功进行的重要保障。SIFT 算法的特征提取主要包括尺度空间构造及其极值检测、关键特征点的定位、关键特征点方向确定、用 128 维归一化特征向量表示关键特征点的描述子等 4 个步骤^[10-11]。

3.2 基于余弦距离的立体匹配策略

“欧氏距离”测量标准常被用来作为匹配准则对 SIFT 特征点进行匹配研究,并取得了良好的实验结果^[16-17]。但该方法特征利用率不是特别高,耗时较长,存在着匹配错误或重复等问题。而基于余弦距离的匹配策略,则可通过有效减少匹配错误或重复的关键特征点来提高匹配效率,并成为近期研究热点^[18]。

余弦相似度即余弦距离,用空间两向量夹角的余弦表示 2 个空间向量的相似程度^[15]。向量 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ 的余弦相似度计算公式^[18]为

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{x} \cdot \mathbf{y}}{|\mathbf{x}| |\mathbf{y}|} \quad (3)$$

其中,向量 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ 的维数必须相同。由式(3)可得

$$\cos \theta = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (4)$$

由 3.1 节得知, SIFT 检测的关键特征点均表示为 128 维的归一化特征向量形式, 因此式(4)中 $n = 128$ 。2 个特征向量的余弦值越大, 即 2 者的夹角越小, 说明向量相似度越大, 2 者匹配的可能性也就越大。因此, 提取的 SIFT 关键特征点基于余弦距离的立体匹配策略主要分为以下 2 个步骤:

(1) 取基准图像(左幅图像或者右幅)的每个关键特征点向量与待匹配图像中所有行向量进行余弦距离计算并取反余弦后得最小角 α_1 与次小角 α_2 , 若满足 $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} < d_{r1}$ ($d_{r1} < 1$ 为判断阈值), 则认为满足第一匹配规则, 获得第 1 对初次匹配对。反之则不能匹配。如此类推, 直到基准图像所有行向量依次完成与待匹配图像中所有行向量的余弦计算及余弦夹角的比较后, 获得初次匹配 j 对, 完成第 1 次匹配。

(2) 第 2 次匹配: 由步骤(1)获得初次匹配关键特征点 j 对, 用 B 矩阵表示为

$$B = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \cdots & b_{1,128} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \cdots & b_{2,128} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{j,1} & b_{j,2} & \cdots & b_{j,128} \end{bmatrix} \quad (5)$$

将 B 的所有关键特征点的特征向量依次与左幅基准图像关键特征点进行向量的余弦距离计算并取反余弦后得最小角 α_3 与次小角 α_4 , 若同时满足

$$\begin{cases} \Delta = \alpha_1 - \alpha_3 < d \\ \frac{\alpha_3}{\alpha_4} < d_{r2} \end{cases} \quad (6)$$

则认为满足第 2 次匹配规则, 反之则不能匹配。从而最终获得匹配关键特征点 k 对 ($k \leq j$), 完成整个图像的立体匹配过程。基于 Matlab 数据格式, 实验中 d 取 0.000 1, $d_{r1} < 1$ 和 $d_{r2} < 1$ 为判断阈值。

3.3 荔枝计算采摘点基于余弦距离准则的 SIFT 匹配方法

直接采用 SIFT 算法对荔枝结果母枝进行关键特征点的提取, 提取的关键特征点位置并非适合荔枝采摘机械手的夹持作业。因此将 2.2 节所获取的计算采摘点采用 SIFT 关键特征点描述子进行表示(即 128 维的归一化特征向量), 然后对该计算采摘点进行余弦距离准则的匹配。为避免结果母枝的分割效果对荔枝计算采摘点的匹配影响, 在获取采摘点二维像素坐标后, 在待匹配原彩色荔枝图像上对计算出的采摘点进行 SIFT 向量搜索的余弦距离的立体匹配。

为减少对采摘点的误匹配、缩小匹配搜索空间, 还需要在采摘点的立体匹配过程中设定唯一性、保序性及外极线约束等约束条件^[19]。所谓的外极线

约束定义为^[19]: 任意空间物点和 2 个摄像机光心的 2 条连线在 2 个成像平面的投影称为一对极线, 该物点在 2 个成像平面上的像点在这一对极线上。根据此结论, 就可以把匹配的搜索范围从二维降低到一维。对于平行放置的双目立体视觉系统, 2 条极线是平行的, 也就是在搜索匹配点时只要在待匹配图像的同一行中搜索即可, 明显提高了匹配速度。

4 实验结果与分析

匹配图像的采集是基于实验室环境下进行的, 两摄像头型号相同, 均为中国恒大有限公司 DH-HV3100FC 型号, 摄像头安装并调试为相对平行状态。用于处理与分析图像的计算机 CPU 为 Intel(R) Core(TM) 2 Quad, 主频为 2.67 GHz, 内存为 2.0 GB, 操作系统为 Win 7, 软件版本为 R2009a 的 Matlab 应用软件。实验图像的分辨率均处理为 640 像素 $\times$ 480 像素, 其中图 2 为同一荔枝串在左、右摄像头的成像情况。



图 2 同一荔枝串在左、右摄像头的成像图片

Fig. 2 Images of the same litchi cluster in left and right cameras

(a) 左摄像头成像 (b) 右摄像头成像

4.1 融合 Harris 与改进 SIFT 算法的采摘点计算与匹配实验

(1) 识别图 2a 的荔枝串、荔枝果与结果母枝, 提取图 2a 的荔枝果区域质心与最小外接矩形特征信息。因拍摄角度不同, 左右图像存在差异, 其结果母枝部位的分割效果也有所不同。在匹配采摘点的计算上, 选择结果母枝分割效果较为理想的图像作为采摘点计算图像。本实验选择图 2a 进行采摘点的计算, 所得整个荔枝果区域质心坐标为 (323, 297)。通过计算最小外接矩形 4 个顶点坐标并画出外接矩形, 效果如图 3 所示。

(2) 采用 Harris 算法提取结果母枝上的角点, 共检测到 12 个角点, 各角点坐标如表 1 所示。提取的角点用红色的“+”符号在结果母枝上显示, 效果如图 4 所示。

(3) 统计各个角点的邻域圆面积函数值, 获得圆面积函数值最大的圆为 $W_9(x_9, y_9)$ 。其圆心坐标(是 Harris 的一个角点)为 (332, 151), 该点为结果



图 3 荔枝果特征

Fig.3 Features of litchi fruits

表 1 结果母枝的 Harris 角点坐标

Tab.1 Pixel coordinate of Harris corner points of litchi main fruit bearing branch

圆心坐标	Harris 各角点定义圆的序号											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
x	229	317	325	325	327	329	330	331	332	334	336	344
y	198	180	102	108	125	122	166	146	151	180	160	182

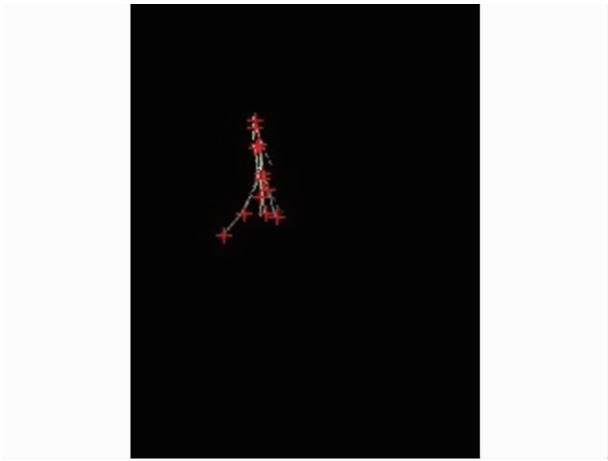


图 4 结果母枝的 Harris 角点

Fig.4 Harris corner points extracted from litchi main fruit bearing branch

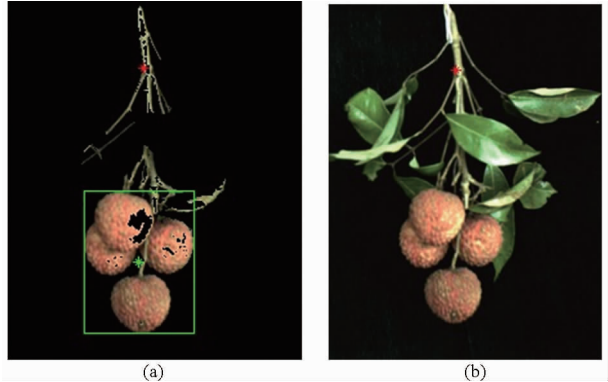


图 5 采摘点在荔枝串与原图的位置

Fig.5 Position of picking point in litchi cluster and its original image

- (a) 采摘点在识别荔枝串上用“*”标注
- (b) 采摘点在原采集图像上用“*”标注

图像对荔枝结果母枝的识别有一定影响,但在已识别荔枝结果母枝部位均可成功计算采摘点。相对采

母枝上的计算采摘点。采摘点在分割后荔枝串及原图的效果如图 5 所示。

(4)将计算采摘点表示为 128 维度的 SIFT 特征点描述子形式。基于外极线和唯一性约束条件,在右幅荔枝原图中搜索与计算采摘点 SIFT 向量按 3.2 节余弦相似原理计算匹配点的像素坐标,该点坐标为(156,152)。对采集的 81 幅图像进行采摘点计算与立体匹配实验,实验结果如表 2 所示。

4.2 实验结果讨论与分析

从表 2 可以得出:虽然在不同光照条件下采集

表 2 融合 Harris 与 SIFT 算法的采摘点计算与立体匹配数据

Tab.2 Data of computed picking point and its stereo matching by combined algorithms of Harris and SIFT

光照条件	图像总数	识别结果 母枝的图 像数目	计算采摘 点的图像 数目	采摘点匹 配的图像 数目
强光	27	23	23	20
正常光	28	24	24	23
逆光	26	20	20	17

集实验图像总数,采摘点计算成功率平均为 82.72%;对能够获取采摘点的图像,进行基于余弦距离匹配准则的 SIFT 立体匹配,匹配成功率可达 89.55%,基本能够满足荔枝采摘机器人视觉定位的精度需求。且从立体匹配效果来看(图 6),带约束条件的 SIFT 向量搜索立体匹配方法对计算采摘点的匹配效果较好,匹配点纵坐标平均相差 2 个像素点。匹配点连线几乎呈水平方向,也基本符合外极线约束条件。

除此之外,本文提出的采摘点计算方法对结构复杂的结果母枝也有效可行。若采用文献[7-8]方法对图 7 进行采摘点计算,获取坐标为(478,55)。而采用本文方法获得计算采摘点坐标为(415,72),与手工检测其合理采摘点的坐标(410,76)的误差较小,更适合荔枝采摘需求。

在系统运行的实时性方面:以 Harris 算法能够检测结果母枝上的角点个数 37 个为例,采摘点计算与立体匹配平均耗时为 15.673 3 s。其中立体匹配的时间相对较少,平均为 5.356 7 s;而计算采摘点平均耗时为 10.316 6 s。角点个数越多,耗时也会越

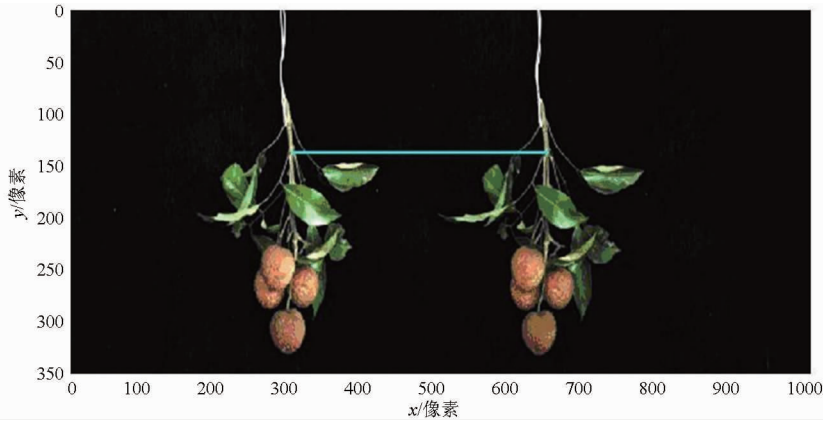


图 6 基于余弦相似的 SIFT 向量搜索的荔枝采摘点的立体匹配

Fig. 6 Stereo matching of litchi picking point based on cosine distance similarity of SIFT vector search



图 7 结果母枝形状复杂的采摘点计算

Fig. 7 Computation of picking point in litchi main fruit bearing branch with complex shape
(a) 带有结构复杂结果母枝的原采集图片
(b) 本文计算采摘点与文献[7-8]对比

长。产生此现象的主要原因为角点个数增多,寻求采摘点的循环次数也相应增加,故对整个方案运行会产生较多延迟。

5 结 论

(1)为实现荔枝果的成串采摘需求,提出在已

识别的结果母枝上进行基于 Harris 算法的角点检测,并结合荔枝果区域的质心与最小外接矩形等特征。利用定义函数计算出采摘点的二维像素坐标,并将该计算采摘点表示为 SIFT 特征关键点描述子形式进行基于余弦距离匹配策略的改进 SIFT 算法的双目立体匹配方案。

(2)对不同光照条件下所采集荔枝图像进行了带有约束条件的融合 Harris 与改进 SIFT 算法采摘点计算与立体匹配实验验证。实验结果显示,在已识别荔枝结果母枝部位均可成功计算采摘点,获取计算采摘点图像在各类图像中占 82.72%。而对所获取计算采摘点进行带约束条件的改进 SIFT 立体匹配的成功率为 89.55%。且该方法能够满足结构复杂的结果母枝上采摘点计算精度需求。

参 考 文 献

1 刘正东. 计算机视觉中立体匹配技术的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
Liu Zhengdong. Research on stereo matching of computer vision [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)

2 Okutomi M, Kanade T. A multiple-baseline stereo [C] // Proceedings CVPR'91 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1991: 63 - 69.

3 Rojas A, Calvo A, Munoz J. A dense disparity map of stereo images [J]. Pattern Recognition Letters, 1997,18(3):385 - 393.

4 Maitre H, Luo W. Using models to improve stereo reconstruction [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992,14(2):269 - 277.

5 徐奕, 周军, 周源华. 基于小波及动态规划的相位匹配[J]. 上海交通大学学报, 2003,37(3):388 - 392.
Xu Yi, Zhou Jun, Zhou Yuanhua. Phase matching based on wavelet transform and dynamic programming [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003,37(3):388 - 392. (in Chinese)

6 吕朝辉, 张兆杨, 安平. 一种用于立体匹配的边缘检测方法[J]. 上海大学学报:自然科学版, 2003,9(3):189 - 192.
Lü Chaohui, Zhang Zhaoyang, An Ping. An edge detection method for stereo matching[J]. Journal of Shanghai University: Natural Science Edition, 2003,9(3):189 - 192. (in Chinese)

7 熊俊涛, 邹湘军, 陈丽娟, 等. 荔枝采摘机械手果实识别与定位技术[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2012,23(1):1 - 5.
Xiong Juntao, Zou Xiangjun, Chen Lijuan, et al. Fruit recognition and positioning technology of litchi picking manipulator [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2012,23(1):1 - 5. (in Chinese)

8 熊俊涛. 复杂环境下荔枝采摘机械手的视觉定位研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2012.

- Xiong Juntao. Study on vision positon of litchi picking manipulator on complex environment [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 9 Mikolajczyk K, Schmid C. Scale & affine invariant interest point detectors[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(1): 63 – 68.
- 10 Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant feature[C] // Proceedings of the International Conference on Computer Vision, 1999: 1150 – 1157.
- 11 Lowe D G. Distinctive image feature from scale-invariant key points [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91 – 110.
- 12 邹湘军, 卢俊, 邓继忠, 等. 机械与视觉关联定位实验平台: 中国, 200810027369.6 [P]. 2008-04-11.
- 13 熊俊涛, 邹湘军, 陈丽娟, 等. 基于机器视觉的自然环境下成熟荔枝识别[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 162 – 166.
- Xiong Juntao, Zou Xiangjun, Chen Lijuan, et al. Recognition of mature litchi in natural environment based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 162 – 166. (in Chinese)
- 14 Guo Aixia, Xiao Deqin, Zou Xiangjun. Computation model on image segmentation threshold of litchi cluster based on exploratory analysis[J]. Journal of Fiber Bioengineering and Informatics, 2014, 7(3): 441 – 452.
- 15 汪松. 基于 SIFT 算法的图像立体匹配方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- Wang Song. Research on image matching algorithm base SIFT[D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
- 16 Anirban DasGupta. Asymptotic theory of statistics and probability [M]. New York: Springer, 2008.
- 17 姚志均, 刘俊涛, 周瑜, 等. 基于对称 KL 距离的相似性度量方法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(11): 1 – 4.
- Yao Zhijun, Liu Juntao, Zhou Yu, et al. Similarity measure method using symmetric KL divergence[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(11): 1 – 4. (in Chinese)
- 18 许钢, 林园胜, 江娟娟, 等. 改进型 SIFT 立体匹配算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(6): 134 – 138.
- Xu Gang, Lin Yuansheng, Jiang Juanjuan, et al. Research on improved SIFT stereo matching algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(6): 134 – 138. (in Chinese)
- 19 吴立德. 计算机视觉[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993: 209 – 228.
-

(上接第 10 页)

- 12 刘宁宁, 田捷. 基于区域特征的交互式图像分割方法及其应用[J]. 软件学报, 1999, 10(3): 235 – 240.
- Liu Ningning, Tian Jie. Region feature-based interactive segmentation method and its application in medical image analyzing[J]. Journal of Software, 1999, 10(3): 235 – 240. (in Chinese)
- 13 赵德安, 刘晓洋, 陈玉, 等. 苹果采摘机器人夜间识别方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 15 – 21.
- Zhao Dean, Liu Xiaoyang, Chen Yu, et al. Image recognition at night for apple picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 15 – 21. (in Chinese)
- 14 王书志, 张建华, 冯全, 等. 基于纹理和颜色特征的甜瓜缺陷识别[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 175 – 179.
- Wang Shuzhi, Zhang Jianhua, Feng Quan, et al. Defect detection of muskmelon based on texture features and color features[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 175 – 179. (in Chinese)
- 15 林宝全, 陈冲. 基于 Matlab 与 PLC 的实时控制系统[J]. 南昌大学学报, 2011, 33(3): 298 – 302.
- Lin Baoquan, Chen Chong. Real-time temperature control system based on Matlab and PLC[J]. Journal of Nanchang University, 2011, 33(3): 298 – 302. (in Chinese)
- 16 刘亿静, 苗长云, 杨彦利. 基于经纬映射的径向畸变快速校正算法的研究[J]. 激光杂志, 2015, 36(1): 1 – 4.
- Liu Yijing, Miao Changyun, Yang Yanli. Rapid radial distortion correction algorithm based on latitude and longitude of image mapping[J]. Laser Journal, 2015, 36(1): 1 – 4. (in Chinese)
- 17 盖钧镒. 试验统计方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 219 – 221.
- 18 秦筱械, 蔡超, 周成平. 一种有效的骨架毛刺去除算法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(12): 28 – 31.
- Qin Xiaowei, Cai Chao, Zhou Chengping. An algorithm for removing burr of skeleton[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science, 2004, 32(12): 28 – 31. (in Chinese)
- 19 Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. Digital image processing using Matlab [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 144 – 178, 252 – 282.
- 20 郭斯羽, 周乐前, 温和. 长叶柄轴对称植物叶片长度的图像测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6): 866 – 873.
- Guo Siyu, Zhou Leqian, Wen He. Image-based length measurement method of axially symmetric plant leaves with elongated petiole [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(6): 866 – 873. (in Chinese)
- 21 翟长远, 赵春江, 王秀, 等. 树型喷洒靶标外形轮廓探测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 173 – 177.
- Zhai Changyuan, Zhao Chunjiang, Wang Xiu, et al. Probing method of tree spray target profile[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 173 – 177. (in Chinese)