

# 荔枝采摘机器人双目视觉的动态定位误差分析

叶 敏, 邹湘军<sup>\*</sup>, 罗陆锋, 刘 念, 莫宇达, 陈明猷, 王成琳

(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

**摘 要:** 扰动引起的随机误差成为采摘机器人视觉定位的难题。为了探索荔枝采摘机器人视觉定位误差, 首先用双目视觉系统和模拟扰动的震动平台对荔枝结果母枝采摘点的三维坐标进行定位试验, 检测其实际位置, 获得误差数据; 然后, 提出了一种动态定位误差分析方法, 根据误差变化规律将动态定位误差划分为系统误差和随机误差; 最后, 用统计方法对 2 类误差分别进行定量分析和评价。结果表明, 定位距离为 600~1 000 mm 时, 系统误差与动态定位误差的变化趋势基本一致, 视觉深度方向、水平方向最大动态定位误差分别为 58.8 和 17.3 mm。系统误差置信区间较窄, 视觉深度方向系统误差与定位距离呈较强的线性相关性, 水平方向则表现为非线性。扰动下的随机定位误差服从正态分布, 视觉深度方向、水平方向间的随机误差相关性较弱。视觉深度方向受扰动的影响较大, 随机误差远大于水平方向, 且不确定度较高。研究结果为荔枝采摘机器人视觉定位系统校准和动态定位方案设计提供依据, 为机构容错纠错提供理论依据和实践指导。

**关键词:** 收获; 机器人; 容错; 误差; 荔枝; 动态环境; 定位

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.007

中图分类号: S24; TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-05-0050-07

叶 敏, 邹湘军, 罗陆锋, 刘 念, 莫宇达, 陈明猷, 王成琳. 荔枝采摘机器人双目视觉的动态定位误差分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 50—56. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.007 http://www.tcsae.org

Ye Min, Zou Xiangjun, Luo Lufeng, Liu Nian, Mo Yuda, Chen Mingyou, Wang Chengling. Error analysis of dynamic localization tests based on binocular stereo vision on litchi harvesting manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(5): 50 — 56. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.007 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

双目视觉技术是采摘机器人定位目标水果最常用的手段<sup>[1-4]</sup>。人们通过改进识别定位算法<sup>[5-6]</sup>和多传感器协同定位<sup>[7-8]</sup>等手段减小定位误差, 但机器人在复杂动态环境中工作, 其定位精度还受到机械结构变化(磨损、变形等)和测量环境扰动(风吹、随机振动等)影响<sup>[9-10]</sup>, 易形成大的随机误差。该误差在变化幅值和方向上的不确定性, 导致采摘点的精确定位成为难题。

随机误差是采摘机器人定位、收获失败的主要原因。视觉系统应满足扰动下的定位要求, 为机器人提供目标在 3 个空间方向上的准确位置信息。目前对视觉误差的研究主要集中在提高静态目标识别率<sup>[11-16]</sup>和视觉深度方向总误差方面<sup>[17-24]</sup>, 较少讨论扰动对定位精度的影响和各方向上误差分布。同时, 由于随机误差的动态、多分布特性, 静态测试理论已经无法满足需要。因此, 有必要对误差进行分类, 根据变化规律评价其精确的空间分

布与峰值特征, 构建误差变量与末端机构的映射关系, 使得视觉系统能在扰动下与末端机构协调采摘水果。

本文从荔枝采摘机器人的视觉定位误差入手, 先测量扰动下采摘点的定位误差, 然后提出一种动态定位误差分析方法, 根据误差变化规律进行分类, 最后使用统计方法对系统误差和随机误差进行定量分析, 获得视觉定位能力和采摘安全裕度, 以期能为机器人理解不确定性信息提供支持及末端机构容错设计提供依据。

## 1 设备和材料

使用机构与视觉定位试验平台(图 1)和震动平台(图 2)在实验室内测量动态定位误差。定义 Z 方向为视觉深度方向, X、Y 方向分别为水平和竖直方向。

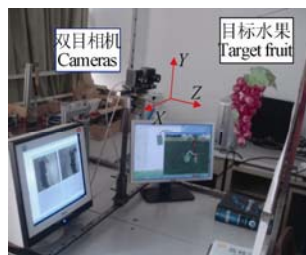


图 1 机构与视觉定位试验平台  
Fig.1 Mechanism and vision positioning experimental platform

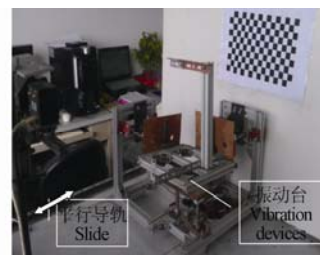


图 2 震动平台  
Fig.2 Vibration devices

收稿日期: 2015-09-25 修订日期: 2016-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31571568; 31171457)

作者简介: 叶 敏, 男, 汉族, 湖北武汉人, 博士生, 主要从事农业机器人、智能设计与制造研究。广州 华南农业大学工程学院, 510642。

Email: yemin\_scau@163.com

※通信作者: 邹湘军, 女, 汉族, 湖南衡阳人, 教授, 博士, 主要从事农业机器人、智能设计与制造研究。广州 华南农业大学工程学院, 510642。

Email: xjzou1@163.com. 中国农业工程学会会员: 邹湘军(E042100031M)

机构与视觉定位试验平台包括直线导轨、支架和计算机(PC: Haier H5-b011)。相机安装在横向导轨支架上, 型号为 DH-HV3100FC, 使用 IEEE-1394 线与计算机连接。相机分辨率为  $2048 \times 1536$  pixel, 像素尺寸为  $3.2 \mu\text{m} \times 3.2 \mu\text{m}$ 。摄像头焦距为  $8.2 \text{ mm}$ , 2 个摄像头基线距离  $120 \text{ mm}$ 。通过标定确定相机参数。荔枝采摘机器人视觉系统设置与其相同。

震动平台放置在相机前方, 它是一个可实现三向扰动的装置。通过户外试验确定运行参数为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向振幅  $10 \text{ mm}$ 、激振频率  $4 \text{ Hz}$  时, 荔枝串做类单摆运动, 与受到自然风等外力干扰的运动情况相近<sup>[10]</sup>。此时, 目标采摘点在水平、竖直方向的振幅约  $15$  和  $10 \text{ mm}$ 。

被测荔枝通过手工从果园采摘获得, 保留完整的果串和枝叶。为了提高作业效率, 机器人主要对相机正前方的荔枝进行定位、采摘。因此, 本文重点讨论相机正前方不同深度处的采摘点定位误差。以采摘点为定位目标, 获取目标图像后, 根据相机内外部参数对图像校正; 然后, 选取 YCbCr 颜色模型分析荔枝颜色和灰度特征; 最后, 针对果实特点提取果实、母枝, 利用三角测距原理计算采摘点, 该方法的识别成功率为  $95\%$ <sup>[25-26]</sup>。

采摘点坐标计算的算法流程如下: 1) 获取荔枝图像; 2) 对荔枝图像进行粗分割, 得到背景和非背景图像; 3) 对非背景图像进行细分割, 得到荔枝母枝和果实图像; 4) 求果实图像区域的质心  $C_p$ , 对母枝图像区域所在的像素点做曲线拟合; 5) 求果实图像区域的边缘像素点与点  $C_p$  的最长距离  $L_c$ ; 根据经验公式以  $1.25L_c$  为半径, 点  $C_p$  为圆心做圆; 求圆和母枝曲线的交点, 该点即为采摘点  $P$ ; 6) 对采摘点进行立体匹配与三维重建, 确定采摘点空间坐标。图 3 为图像处理结果。



注:  $P$  为采摘点;  $C_p$  为果实图像区域的质心。  
Note: Point  $P$  is picking point; point  $C_p$  is centroid location.

图 3 图像处理结果

Fig.3 Fruit segmentation results

## 2 误差测量与分析方法

### 2.1 定位误差分析方法

动态定位误差与整个系统有关, 包括视觉硬件、软

件和测量环境, 主要由系统误差和随机误差组成。

系统误差由多项具有确定性变化规律的误差因素共同组成<sup>[17]</sup>。由于组成参数间存在多次转换关系, 计算叠加会导致不可靠结果。因此, 当不考虑随机定位误差时, 静态条件下的视觉定位误差可以看作系统误差。

随机误差主要受到测量环境影响, 具有偶然性, 其结果应包括被测对象的动态特性。动态定位数据不能用明确的数学关系表示, 只能用概率统计特征量来描述。

根据本课题组研发的采摘机器人及末端执行器的工作形式<sup>[27]</sup>,  $Z$  为视觉深度方向,  $X$  为夹指张开方向,  $Z$ 、 $X$  方向误差影响定位和采摘失效。农艺对母枝在  $Y$  方向的预留长度精度要求不高, 可为自由公差, 因此不考虑  $Y$  方向的定位误差。

#### 2.1.1 系统误差评价模型

系统误差均值和方差的真值分别为  $\mu$  和  $\sigma^2$ , 静态试验结果可看作是使用随机方法测量其误差参数得到的子样。统计理论证明,  $\bar{x}$  是  $\mu$  的无偏估计量, 即  $E[\bar{x}] = \mu$ 。为了便于计算, 定义

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (1)$$

则有  $E[s^2] = \sigma^2$ , 于是  $s^2$  是  $\sigma^2$  的无偏估计量。

式中  $n$  为在重复性条件下独立重复观察次数;  $x_i$  为测量值;  $\bar{x}$  为  $x_i$  的算数平均值。

为了避免由于样本重复次数较小导致误差估计偏差, 使用置信区间表述系统误差界限。定义安全系数  $k_1$ 、置信度  $\gamma$ , 将  $[\bar{x} - k_1 s, \bar{x} + k_1 s]$  作为  $\mu$  的置信区间, 则有

$$P(\bar{x} - k_1 s \leq \mu \leq \bar{x} + k_1 s) = \gamma. \quad (2)$$

通过式 (2) 可得在置信度  $\gamma$  下  $\mu$  的置信区间。系统误差可采用适当方法进行补偿、修正或消除, 但修正值本身也包含一定误差。

#### 2.1.2 随机误差评价模型

在处理随机误差时, 首先应该知道它服从哪种概率密度分布, 然后确定对应的处理方法。大多数随机误差都服从正态分布<sup>[28]</sup>, 使用夏皮罗-威尔克检验法<sup>[29]</sup>对误差数据进行假设检验。同时, 为了反映随机过程在不同空间位置的关系, 在确定位置记录误差值, 将  $Z$ 、 $X$  方向的随机误差视为动态定位质量指标并作为二维随机变量, 近似对定位空间内误差变化进行表示。二维变量间的相关系数定义为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (3)$$

其中,  $(x_m, y_n)$  为二维随机变量的随机误差测量值,

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i.$$

最后, 使用算术平均值表示测量结果的最佳估计, 运用灰色系统理论表示测量结果的动态不确定度, 该方

法适用于解决“小样本的不确定性问题”<sup>[30]</sup>。其简要计算流程如下:

将某距离处的测量数据作为原始数据序列  $\{x^{(0)}(i)\}(i=1,2,\dots,n)$ , 经一次累加生成新序列

$$x^{(1)}(t) = \sum_{j=1}^k x^{(0)}(j), \quad k=1,2,\dots,n. \quad (4)$$

GM(1,1)模型相应的微分方程为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + a \cdot x^{(1)} = u. \quad (5)$$

式中  $a$  是发展灰度;  $u$  是内生控制灰度。利用最小二乘法解得

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = [B^T B]^{-1} B^T Y_n. \quad (6)$$

其中,  $\hat{a}$  为待估参数向量;

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1)+x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2)+x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1)+x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix};$$

$$Y_n = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T.$$

求解式(5)可得灰色模型及其预测公式, 则随机变量的函数可表示为

$$g(t) = d_t = \left[ x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-at} [1 - e^a]. \quad (7)$$

根据随机变量函数方差的性质, 其动态不确定度为

$$F(K) = \sqrt{\frac{m^2}{2a \cdot K} [1 - e^{-2aK}] - \frac{m^2}{a^2 \cdot K^2} [1 - e^{-aK}]^2}, \quad (8)$$

其中,  $m = \left[ x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] [1 - e^a]$ ,  $K$  为序列编号。

## 2.2 采摘点坐标测量方法

将目标水果悬挂在震动台支架上。平移横向导轨调整相机与荔枝间距离。从相机前方的 600~1 000 mm 处, 每隔 100 mm 依次对 10 个目标进行定位, 获得 50 组目标图像对, 分别在静止和扰动状态进行定位和位置测量。定位静态目标时, 震动平台不动作; 定位动态目标时, 使用震动平台模拟自然环境下的扰动。

采摘点  $Z$  方向的真实值使用激光测距仪 (型号 GLM250VF, 精度  $\pm 1$  mm) 测得。测量时将相机与激光测距仪对齐, 在激光测距仪与导轨平行的条件下, 将激光点打在标定板上。标定板与采摘点处于同一竖直面,

并与两相机所在平面平行。 $X$  方向的真实值为采摘点在图像中位置的坐标值, 以图像中标定板 (棋盘格大小 30 mm×30 mm, 精度  $\pm 0.2$  mm) 上已知距离的像素个数作为参考来估量目标在  $X$  方向的尺寸<sup>[31]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 误差变化规律分析

不同图像采集距离处静、动态目标的定位误差分布如图 4 所示。

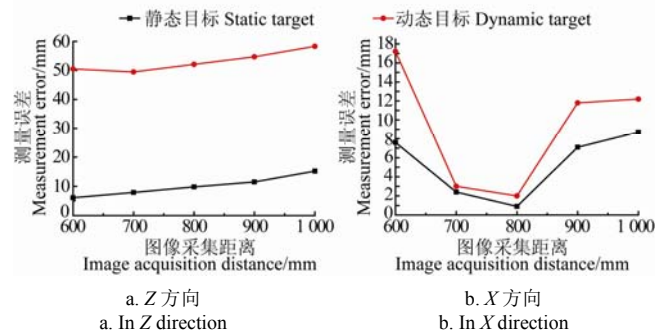


图 4 定位误差分布

Fig.4 Distribution of position errors

$Z$ 、 $X$  方向系统误差最大值分别为 14.9 与 8.7 mm, 动态定位误差最大值分别为 58.8 与 17.3 mm。系统误差与动态定位误差的变化趋势基本一致。 $Z$  方向定位误差远大于  $X$  方向, 静、动态误差值均随图像采集距离增加呈线性增长, 但增长缓慢, 变化范围约 10 mm。这是由于随着定位距离增加摄像头获取图像分辨率下降, 像素视差区分深度差异的能力降低。当距离为 1 000 mm 时, 误差值最大。 $X$  方向定位精度较高, 该方向表现出较明显的随机性。误差值与图像采集距离呈非线性关系, 波动较大。定位距离为 800 mm 左右时精度最高。从 600~800 mm 处, 误差逐渐减小; 距离大于 800 mm 后误差增大, 其递减与递增趋势稍有差异。这是由于相机的焦距为定值, 图像质量受到焦距影响。当目标在焦点距离附近时, 图像成像质量较好, 定位精度较高; 当采集距离偏离该距离时, 图像像素分辨率降低, 定位精度下降。

### 3.2 系统误差分析

#### 3.2.1 置信区间

取置信度为 90%, 查表得  $k_1$  的值为 0.5796, 系统误差的置信区间如表 1 所示。

表 1 系统误差测量值、随机误差正态性和二维相关检验

Table 1 Systematic error detection, normality and correlation analysis of random positioning errors

Z 方向 Z direction/mm					X 方向 X direction/mm				Z、X 方向随机误差相关系数 Correlation coefficient of random positioning error between Z and X direction
图像采集距离 Distance/mm	测量均值 Average	相对误差 Relative error/%	置信区间 Confidence interval	夏皮罗-威尔克检验 Shapiro-Wilk test results	测量均值 Average	相对误差 Relative error/%	置信区间 Confidence interval	夏皮罗-威尔克检验 Shapiro-Wilk test results	
600	6.5	1.08	[5.57,7.39]	0.94	7.8	1.30	[7.38,8.11]	0.96	0.40



700	7.9	1.13	[7.08,8.21]	0.95	2.5	0.36	[2.22,2.84]	0.98	-0.96
800	10.0	1.25	[8.55,11.45]	0.86	1.0	0.13	[0.69,1.33]	0.97	-0.31
900	11.5	1.28	[10.29,13.84]	0.93	6.9	0.77	[6.39,7.47]	0.96	0.97
1000	14.9	1.49	[13.41,16.37]	0.97	8.7	0.87	[8.21,9.19]	0.96	0.13

总体来说，Z 方向置信区间宽度比 X 方向略大，但 2 个方向上置信区间宽度接近，均稳定在 1 mm 左右；不同定位距离下的定位相对误差较小，均低于 1.5%。结果表明，系统定位性能稳定、精度较高。

3.2.2 定位误差回归方程

为了减小各采集距离处的定位误差，以图像采集距离为自变量、定位误差值为应变量，分别对 Z、X 方向的误差值进行回归处理。

Z 方向的误差近似呈线性关系，得到该方向的回归方程

$$E_{sz} = 0.022z_c - 7.48。 \tag{9}$$

式中  $E_{sz}$  为 Z 方向的系统误差值，mm； $z_c$  为图像采集距离，mm；回归方程的拟合优度为 0.969。

为了提高 X 方向的拟合效果，进行分段回归。由图 4b 可知，在图像采集距离 800 mm 处的定位精度最高，该点前后的误差值呈现明显规律。故以该点为区间分界点，对其前后数据采用不同曲线分别进行非线性回归，得到分段非线性回归方程

$$E_{sx} = \begin{cases} e^{-6.462+5105.331/z_c} & z_c \in [600,800] \\ -140.206+0.226z_c-7.67\times10^{-8}z_c^3 & z_c \in (800,1000] \end{cases}。 \tag{10}$$

式中  $E_{sx}$  为 X 方向的系统误差值，mm。回归方程的拟合优度为 0.999 与 0.975。

通过建立误差预测模型，可以消去系统误差的主要成分。由于本文将荔枝形状、大小等因素对定位的综合影响划分为系统误差，在开放式环境下，考虑到植物生长的随机性和光照条件变化，该系统误差将增大，但总体变化规律与所得回归模型相近。

3.3 随机误差分析

3.3.1 正态性检验

对不同图像采集距离处的随机误差分别进行检验，给定危险率为 10%，查表得到  $W(10,10\%)=0.869$ 。Z、X 方向上的计算结果均满足  $W>W(10,10\%)$ ，表明扰动造成的随机误差服从正态分布（表 1）。

3.3.2 二维随机变量

如表 1 所示，两变量间相关系数较低，随距离的改变，其系数变化规律较复杂，表明两方向间随机误差的相关关系不强。这主要是由于图像在动态采集过程中，目标摆动的方向、幅度随机性较强，且左右相机拍摄时刻存在时滞，导致采摘点匹配出现误差。因此，不能通过跟踪 Z 方向的测量误差变化确定 X 方向误差变化区间。

3.3.3 不确定度

由表 2 可知，受环境扰动的影响，在 600~1 000 mm 的定位区间内，Z 方向随机误差为 40 mm 左右，X 方向最大约为 10 mm。动态定位精度较低，随机误差在动态定位误差中占较大比例，随机误差是造成定位不准确的主要原因。

表 2 不同图像采集距离下 X 和 Z 方向上的随机误差和动态误差

Table 2 Random and dynamic positioning error in Z and X direction under different image acquisition distance

图像采集距离 Image acquisition distance/mm	Z 方向 Error in Z direction					X 方向 Error in X direction				
	随机误差		动态误差		随机误差/ 动态误差 Ratio of random error to dynamic error/%	随机误差		动态误差		随机误差/ 动态误差 Ratio of random error to dynamic error/%
	Random error/mm		Dynamic error/mm			Random error/mm		Dynamic error/mm		
	误差平均值	动态	误差平	动态		误差	动态不	误差	动态	
	Average value	不确定度 Dynamic uncertainty	均值	不确定度 Dynamic uncertainty		平均值	确定度 Dynamic uncertainty	平均值	不确定度 Dynamic uncertainty	
600	44.6	0.4	51.1	1.2	87.37	9.6	0.0	17.3	0.3	55.40
700	42.5	3.2	50.1	2.9	84.55	0.5	0.1	3.0	0.2	17.38
800	43.1	3.3	53.1	2.9	80.88	1.1	0.0	2.1	0.3	55.51
900	44.4	5.0	56.5	5.9	78.53	5.1	1.5	12.1	0.8	40.89
1 000	44.0	0.5	58.8	1.2	74.76	3.8	0.3	12.5	0.8	30.40

随距离增大 Z 方向误差值变化不大，但定位不确定度增大。对比其静、动态定位误差可以看出其波动幅值主要受到扰动强度的影响。X 方向不确定度较小，受到扰动的影响小。通过观察该方向随机误差变化规律，其大小可能与相机焦距有关。综上可知，X 方向在静、动态下的定位性能较稳定，定位误差主要在 Z 方向上，须提高 Z 方向的抗扰动性。

为了纠正动态误差，将每一个测量看作是在空间延伸的并相对其标称位置偏移了的误差椭圆体，偏移距离由不确定度确定。然后，通过公差限向外扩张某一尺寸作为安全裕度，通过容错设计进行补偿。对于末端夹持

机构<sup>[27]</sup>来说，Z、X 方向的定位误差分别影响夹指长度和开口大小，根据试验结果设计夹指长度和开口大小分别为 60 与 20 mm。使用自行研制的荔枝采摘机器人<sup>[27]</sup>在扰动环境下进行采摘点定位夹持试验（图 5），成功率在 90%以上。在随机误差存在的情况下，根据视觉定位特性测量值确定末端构形的允许幅值和相角，实现了视觉系统与末端协调采摘水果。



图5 机器人定位夹持荔枝试验照片

Fig.5 Photo of end-effector positioning and grasping litchi experiment

当扰动目标的实际位置偏离视觉计算坐标过大时, 机器人放弃对当前目标进行采摘。由于深度方向的定位误差对视觉定位的影响最大, 依据该方向的定位偏差值来判断。具体方案如下:

在末端执行器上安装激光测距传感器, 传感器的空间坐标可依据机器人运动学理论求得。当末端靠近目标后, 使用传感器测量与目标间距离  $z_{\text{laser}}$ , 当前位置与视觉计算坐标间距离为  $z_{\text{stereo}}$ 。由于激光传感器的精度较高, 将其测量值作为参考, 采摘判断标准为

$$\lambda = |z_{\text{stereo}} - z_{\text{laser}}| / \text{夹指长度}, \quad \lambda = \begin{cases} \geq 1, & \text{放弃} \\ < 1, & \text{采摘} \end{cases} \quad (11)$$

## 4 结 论

1) 在自有试验平台上对 600~1 000 mm 内的目标进行视觉定位及位置测量, 根据误差变化规律将动态定位误差分离得到系统误差和随机误差。系统误差与动态定位误差的变化趋势基本一致。

2) 系统误差在不同定位距离下的置信区间均为 1 mm 左右 (置信度 90%), 相对误差均低于 1.5%。Z 方向系统误差与定位距离呈较强的线性相关性, X 方向则表现为非线性, 所建立的误差预测模型可对荔枝采摘机器人的视觉控制进行补偿。

3) 随机误差服从正态分布, Z、X 方向间误差的相关性较弱。试验结果表明, Z 方向的随机误差为 40 mm 左右, X 方向最大约为 10 mm。扰动环境下视觉定位精度较低, 随机误差占动态定位误差的 50% 以上, 大的随机误差是造成定位不准确的主要原因。

4) 通过对荔枝采摘点动态定位误差分析, 应用不确定度原理将某位置的误差信息表示为一定的概率分布。在视觉误差与夹指尺寸映射关系的基础上, 提出容错设计的补偿方法并进行了定位夹持试验, 成功率在 90% 以上, 实现了视觉系统与末端协调采摘水果。

本文对自主开发的机器人双目视觉系统进行研究, 以荔枝为试验对象, 分析了目标采摘点在小扰动下的定位误差。后期可对柑橘、葡萄等水果的定位进行试验, 建立多种水果的视觉与结构设计关联模型, 对采摘机构进行优化, 提高实用性。

## [参 考 文 献]

- [1] 冯青春, 袁挺, 纪超, 等. 黄瓜采摘机器人远近景组合闭环定位方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 154—157. Feng Qingchun, Yuan Ting, Ji Chao, et al. Feedback locating control based on close scene for cucumber harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 154—157. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张瑞合, 姬长英, 沈明霞, 等. 计算机视觉技术在番茄收获中的应用[J]. 农业机械学报, 2001, 32(5): 50—52. Zhang Ruihe, Ji Zhangying, Shen Mingxia, et al. Application of computer vision to tomato harvesting[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2001, 32(5): 50—52. (in Chinese with English abstract)
- [3] Font D, Pallejà T, Tresanchez M, et al. A proposal for automatic fruit harvesting by combining a low cost stereovision camera and a robotic arm[J]. Sensors, 2014, 14(7): 11557—11579.
- [4] Kohan Armin, Borghae A, Yazdi Mehran, et al. Robotics harvesting of Rosa Damascena using stereoscopic machine vision[J]. World Applied Sciences Journal, 2011, 12(2): 231—237.
- [5] 熊俊涛, 邹湘军, 彭红星, 等. 荔枝采摘机械手视觉定位系统设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊 1): 250—255. Xiong Juntao, Zou Xiangjun, Peng Hongxing, et al. Design of visual position system for litchi picking manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.1): 250—255. (in Chinese with English abstract)
- [6] 周俊, 刘锐, 张高阳. 基于立体视觉的水果采摘机器人系统设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 158—162. Zhou Jun, Liu Rui, Zhang Gaoyang. Design of fruit harvesting robot based on stereo vision[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 158—162. (in Chinese with English abstract)
- [7] Kitt B, Geiger A, Lategahn H. Visual odometry based on stereo image sequences with ransac-based outlier rejection scheme[C]. Intelligent Vehicles Symposium (IV), Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010: 486—492.
- [8] 张凯良, 杨丽, 张铁中. 草莓采摘位置机器视觉与激光辅助定位方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 151—156. Zhang Kailiang, Yang Li, Zhang Tiezhong. Object locating method of laser-assisted machine vision for strawberry-harvesting[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 151—156. (in Chinese with English abstract)
- [9] 阎勤劳, 高迟, 查光兴, 等. 耕作机器人双三点定位及其目标图拟合控制[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 171—174. Yan Qinlao, Gao Chi, Cha Guangxing, et al. Double

- three-point fix and objective diagram fitting controlling of farming robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 171—174. (in Chinese with English abstract)
- [10] Zou Xiangjun, Zou Haixin, Lu Jun. Virtual manipulator-based binocular stereo vision positioning system and errors modelling[J]. Machine Vision and Applications, 2012, 23(1): 43—63.
- [11] Chen Zhongju. Sensor modeling realization based on fruit fly optimization algorithm[J]. Sensors & Transducers, 2013, 158(11): 379.
- [12] Lü Xiaolian, Lü Xiaorong, Lu Bingfu. Identification and location of picking tomatoes based on machine vision[C]// Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2011 International Conference on. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011, 2: 101—107.
- [13] Bakhshipour A, Jafari A, Hosseini M. Recognition of pomegranate on tree and stereoscopic locating of the fruit[J]. American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences, 2012, 12(10): 1288—1294.
- [14] Fernández R, Salinas C, Montes H, et al. Multisensory system for fruit harvesting robots: Experimental testing in natural scenarios and with different kinds of crops[J]. Sensors, 2014, 14(12): 23885—23904.
- [15] Chen Zhongju. Sensor modeling realization based on fruit fly optimization algorithm[J]. Sensors & Transducers, 2013, 158(11): 379—383.
- [16] 罗陆锋, 邹湘军, 熊俊涛, 等. 自然环境下葡萄采摘机器人采摘点的自动定位[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 14—21.
- Luo Lufeng, Zou Xiangjun, Xiong Juntao, et al. Automatic positioning for picking point of grape picking robot in natural environment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(2): 14—21. (in Chinese with English abstract)
- [17] 项荣, 应义斌, 蒋焕煜, 等. 基于双目立体视觉的番茄定位[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 161—167.
- Xiang Rong, Ying Yibin, Jiang Huanyu, et al. Localization of tomatoes based on binocular stereo vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 161—167. (in Chinese with English abstract)
- [18] 司永胜, 乔军, 刘刚, 等. 苹果采摘机器人果实识别与定位方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 148—153.
- Si Yongsheng, Qiao Jun, Liu Gang, et al. Recognition and location of fruits for apple harvesting robot[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 148—153. (in Chinese with English abstract)
- [19] 熊俊涛, 邹湘军, 陈丽娟, 等. 采摘机械手对扰动荔枝的视觉定位[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 36—41.
- Xiong Juntao, Zou Xiangjun, Chen Lijuan, et al. Visual position of picking manipulator for disturbed litchi[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2012, 28(14): 36—41. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李理, 殷国富, 刘柯岐. 田间果蔬采摘机器人视觉传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 152—157.
- Li Li, Yin Guofu, Liu Keqi. Design and experiments of vision sensor for harvesting robots in field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 152—157. (in Chinese with English abstract)
- [21] Li Jian, Cui Shujuan, Zhang Chengyan, et al. Research on localization of apples based on binocular stereo vision marked by cancrroids matching[C]. Digital Manufacturing and Automation (ICDMA), Third International Conference on Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012: 683—686.
- [22] Deng Jizhong, Li Jiao, Zou Xiangjun, et al. A test system of binocular vision of picking robot[C]. Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), International Conference on Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010, 1: 369—372.
- [23] Chen Yan, Cai Weiliang, Zou Xiangjun, et al. A Research of Stereo Vision Positioning under Vibration[C]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 44: 1315—1319.
- [24] Xiang Rong, Jiang Huanyu, Ying Yibin. Measurement Error Correction of y Coordinate in Three Dimensional Localization of Tomatoes Using Binocular Stereo Vision[C]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 610: 209—215.
- [25] 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, 33(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, 33(1): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [26] 陈科尹, 邹湘军, 熊俊涛, 等. 基于视觉显著性改进的水果图像模糊聚类分割算法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 157—165.
- Chen Keyin, Zou Xiangjun, Xiong Juntao, et al. Improved fruit fuzzy clustering image segmentation algorithm based on visual saliency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(6): 157—165. (in Chinese with English abstract)
- [27] 叶敏, 邹湘军, 杨洲, 等. 荔枝采摘机器人拟人指受力分析与夹持试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 1—8.
- Ye Min, Zou Xiangjun, Yang Zhou, et al. Clamping experiment on humanoid fingers of litchi harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 1—8. (in Chinese with English abstract)

- [28] 梁晋文, 陈林才, 何贡. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 中国计量出版社, 1989.
- [29] 张纪泉. 总体分布的正态性检验: 介绍夏皮罗-威尔克的 W 检验法[J]. 中国纤检, 1982(5): 34—40.
- [30] 李永祥, 杨建国, 李昱瑶, 等. 机床误差检测系统的动态不确定度研究[J]. 计量学报, 2008, 29(3): 289—292.
- Li Yongxiang, Yang Jianguo, Li Yuyao, et al. Study of dynamic uncertainty in error measurement system of machine tool[J]. Acta Metrologica Sinica, 2008, 29(3): 289—292. (in Chinese with English abstract)
- [31] Bac C W, Hemming J, van Henten E J. Stem localization of sweet-pepper plants using the support wire as a visual cue[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 105: 111—120.

## Error analysis of dynamic localization tests based on binocular stereo vision on litchi harvesting manipulator

Ye Min, Zou Xiangjun<sup>\*</sup>, Luo Lufeng, Liu Nian, Mo Yuda, Chen Mingyou, Wang Chengling

(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** The random error caused by disturbance is the bottleneck of vision positioning of harvesting manipulator. In order to improve the work-efficiency and positioning accuracy of litchi harvesting manipulator, the precise positioning of litchi picking point was studied. Firstly, a binocular stereo vision and an added vibration table to simulate external force disturbance were used to detect the picking point coordinates. The experiment was conducted using the mechanism and the vision-positioning experimental platform based on binocular vision in laboratory. The cameras used in the test and that on the manipulator were the same. The vibration table created perturbation in three coordinate directions. The corresponding perturbation was close to that when conducting outdoor work in a dynamic environment (such as mechanism vibration or wind). A calibration plate was used as a reference to detected positions in the horizontal direction, and a laser rangefinder was used to measure ground truth in the depth direction. The accuracy reported by the specs of calibration plate and laser rangefinder were  $\pm 0.2$  mm and  $\pm 1$  mm, respectively. After measuring the ground-truth position, the errors were calculated. Secondly, an error analysis scheme was proposed. The errors resulting from vision positioning system were divided into original positioning and random positioning errors according to the change rules. The positioning errors under static conditions were regarded as original positioning errors. Random positioning errors were resulted from the influence of unknown external forces. Finally, the quantitative analysis and evaluation of the errors were separately determined by statistical methods. The results showed that the variation trend of original positioning errors was basically consistent with random positioning errors in the distance of 600 to 1000 m. The maximum errors obtained were 58.8 in vision depth direction and 17.3 mm in horizontal direction. The positioning precision in horizontal direction was high. Errors in vision depth direction were considerably larger than errors in horizontal direction. The original error achieved a narrow confidence interval. The original positioning errors in vision depth direction and distances were linear, while the errors in horizontal direction were nonlinear. The random positioning errors under dynamic environment were normally distributed. The random positioning errors in vision depth direction had no obvious connection with errors in horizontal direction. The random positioning errors in vision depth direction, which were greatly influenced by the disturbance, showed a low positioning accuracy and were worse than the errors in horizontal direction. So the disturbance restraint in vision depth direction should be improved. The experiment results can be used to calibrate vision system and layout the vision positioning scheme under dynamic environment. Meanwhile, a mathematical model of error tolerance was established. As the existing end-effectors cannot conduct error tolerance for random error, it also provided a theoretical basis for error -tolerant design of fruit-picking end-effector. Indoor positioning and grasping experiments were conducted for litchi using the manipulator based on the binocular vision. The picking success rate was over 90%. The results verified the applicability of the error-tolerant design. In summary, a precise positioning measurement was proposed based on institutions and vision positioning, and random positioning error could be compensated for by the mechanism of error tolerance.

**Keywords:** harvesting; robots; fault tolerance; errors; litchi; dynamic environment; positioning