

基于图像矩的室内喷雾机器人自动对靶研究

赵栋杰^{1,2} 张宾¹ 王学雷¹ 郭洪红^{1,3} 徐松兵¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 聊城大学机械与汽车工程学院, 聊城 252000;

3. 北京联合大学机电学院, 北京 100020)

摘要: 针对间距较大作物的精准喷雾作业要求,提出了一种基于图像矩的喷雾机器人自动对靶方法。该方法采用单目场景/单目(多目)手眼混合视觉结构。场景相机用于作物目标的预定位,研究了基于其图像的作物形心三维定位算法。手眼相机用于目标的跟踪对靶,提出了一种基于图像矩的视觉跟踪方法,并就矩特征组选取、图像雅可比矩阵计算以及目标深度实时估算等问题进行了研究。仿真结果表明,该视觉跟踪方法能够完成对靶任务,且可达到较高的控制精度。为进一步验证所提自动对靶方法的可行性,搭建了一个具有一个喷雾机械臂的简化样机并进行了室内对靶实验,实验测得样机移动速度在150~200 mm/s时,喷头 X 、 Y 、 Z 向定位误差均小于等于6.5 mm。

关键词: 喷雾机器人; 图像矩; 自动对靶; 视觉伺服

中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)12-0022-08

Automatic Target of Indoor Spray Robot Based on Image Moments

Zhao Dongjie^{1,2} Zhang Bin¹ Wang Xuelei¹ Guo Honghong^{1,3} Xu Songbing¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. School of Mechanical and Automobile Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China

3. School of Mechatronics, Beijing Union University, Beijing 100020, China)

Abstract: Automatic target is a key technology in the field of target spray robot. In order to meet the requirements of precision spraying operation for large spacing crops, an automatic target method based on visual feedback was proposed. A hybrid vision structure, including single scene camera and single (or multi) eye-in-hand camera was adopted. The scene camera mounted in the front of robot body was used to pre-locate target crop and estimate robot's moving speed, and algorithm about location of target crop's centroid and estimating of robot's moving speed was studied. The eye-in-hand camera mounted at the end of spray mechanical arm with nozzle was used to track and aim at target crop. A visual tracking method which used image moments as image features was presented, and some important issues, such as moment features selection, image Jacobian calculation and real-time estimation of target depth were studied, and using real-time estimation of target depth would obtain better tracking trajectory than commonly used fixed depth in Cartesian space and image space. Simulation results showed that the visual tracking method can fulfill the target task and had high control precision. In order to further verify the feasibility of the automatic target method, a simplified prototype containing one spray mechanical arm was built and target experiments were carried out in laboratory. The results showed that the position error of nozzle in X , Y and Z directions was less than or equal to 6.5 mm with vehicle speed of 150~200 mm/s. This study can provide reference for the development of target spray robot.

Key words: spray robot; image moment; automatic target; visual servoing

收稿日期: 2016-06-26 修回日期: 2016-09-20

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120008110046)和山东省自然科学基金项目(ZR2012CQ026)

作者简介: 赵栋杰(1977—),男,博士生,聊城大学副教授,主要从事农业机器人技术研究,E-mail: zhaodongjie@lccu.edu.cn

通信作者: 张宾(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事农业智能装备和农业机器人技术研究,E-mail: zhangbin64@cau.edu.cn

引言

对靶喷雾对提高药液利用率、保护环境具有重要意义,在农林业的作物施肥及病虫害防治领域具有很好的应用前景^[1]。目前,靶标信息的检测主要依靠超声波、激光雷达、微波、红外及视觉等传感器^[2-5],其中,视觉传感器信息量大,更适于在农业环境中使用。GILES 等^[6]研究了以作物行中心线为靶标的对靶喷雾技术。TIAN 等^[7-8]研制的杂草喷雾系统可实现 $0.508\text{ m} \times 0.61\text{ m}$ 区域的单元对靶变量喷雾。张俊雄等^[9-10]研制的温室桁架式病虫害对靶喷雾机器人,可实现对黄瓜植株 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 区域单元的对靶喷雾。由于作物形态、种植方式及喷施目标的多样性,上述各类对靶技术的适用范围均受到一定限制,难以有效应用到间距较大作物(如定植初期的葫芦、生菜、甜菜、甘蓝等幼苗)的对靶喷雾作业中。

基于图像的视觉伺服技术 (IBVS) 相比基于位置的视觉伺服技术 (PBVS),具有模型精度要求低、对噪声和标定误差不敏感以及控制精度高等优点,但需要求解较复杂的图像雅可比矩阵。目前,基于局部几何特性(如点、线、圆、夹角等)的 IBVS 研究较成熟,但这些特征的可靠抽取依赖于目标的形状及周围环境,且易受到噪声、遮挡和光照条件等的影响,在农田非结构环境中的应用效果不理想。图像矩特征是一种全局特征描述子,相比局部几何特征,基于图像矩的 IBVS 通常具有更好的通用性和鲁棒性^[11-14]。文献[12-13]研究了点和图像区域矩的雅可比矩阵形式,并针对平面对象提出了一种基于图像矩的六自由度机械臂视觉伺服方法;文献[14]提出一种基于图像矩与神经网络的机器人 4 自由度视觉伺服方法。目前针对图像矩的研究多用于确定目标的视觉跟踪,目标在整个过程中不更换且期望信息已知,不适用于作业目标不断更换的对靶喷雾过程。

为满足间距较大的温室作物冠层的对靶喷雾作业要求,本文提出一种基于图像矩的室内喷雾机器人自动对靶方法,并研究相应的目标定位及跟踪对靶算法,最后通过仿真及样机实验验证方法的可行性。

1 喷雾机器人自动对靶方案

1.1 系统构成及对靶原理

目前,视觉伺服系统多采用单目手眼结构,这种方式可避免视野遮挡、并可观测到目标的局部细节,工作精度高,适合定位、跟踪任务,但同时也存在视

野范围小、伺服空间有限的缺点;与之相反,场景相机视野范围大,但工作精度低。结合喷雾机器人工作范围大、目标定位精度与实时性要求较高的特点,设计了一种基于单目场景/单目(多目)手眼混合视觉结构的对靶喷雾机器人方案(图 1)。其中,场景相机倾斜向下固定在喷雾机器人前部上方,其采集的图像信息经上位机(工控机)处理后获得各待喷作物在机器人参考系中的位置。手眼相机与喷头均安装于喷雾机械臂末端,其采集的图像信息经下位机(DSP)处理后获得目标作物的精确信息,用于作物对靶喷雾。上位机根据场景相机图像信息及下位机反馈的各工作部件(喷雾机械臂、喷头等)的状态信息产生控制指令,通过交换器传递给下位机;下位机依据上位机指令、手眼相机图像信息以及各传感器信息,控制喷雾机械臂和喷头动作。由于垂直向下的喷雾方式能够满足绝大多数作物的冠层喷雾要求,喷雾机械臂选用 3 自由度平动形式,以实现喷头与手眼相机在 X 、 Y 、 Z 方向的移动,并且可根据需要布置 1 组或多组喷雾机械臂(图 1 布置了 3 组),每组各负责一垄作物。

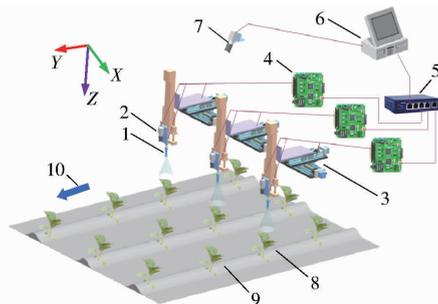


图 1 对靶喷雾机器人系统示意图

Fig. 1 Schematic of target spraying robot system

1. 喷头 2. 手眼相机 3. 喷雾机械臂 4. DSP 5. 交换器 6. 工控机 7. 场景相机 8. 目标作物 9. 待喷作物 10. 机器人移动方向

喷雾机械臂引导喷头完成对靶喷雾的过程可分为预移动、对靶、悬停喷雾 3 个阶段。在预移动阶段,控制系统依据场景相机提供的待喷作物位置信息,控制喷雾机械臂预运动,使各待喷作物顺利进入手眼相机视野;在对靶与悬停喷雾阶段,控制系统依据手眼相机提供的目标作物精确信息,控制喷雾机械臂运动,使喷头快速逼近喷雾位置,并尽量保证喷雾过程中喷头与目标作物的相对位置不变。

视觉伺服控制系统的结构如图 2 所示。对场景相机图像进行背景分割后提取各待喷作物的形心点特征,并按 1.2 节所述方法求出其在机器人参考系中的位置,即可根据该位置控制喷雾机械臂的预移动。当目标作物进入手眼相机视野后,控制系统即可按第 2 节提供的视觉跟踪方法进行对靶和悬停喷

雾。控制量选择器用于决定哪路控制量输入机械臂运动控制器。

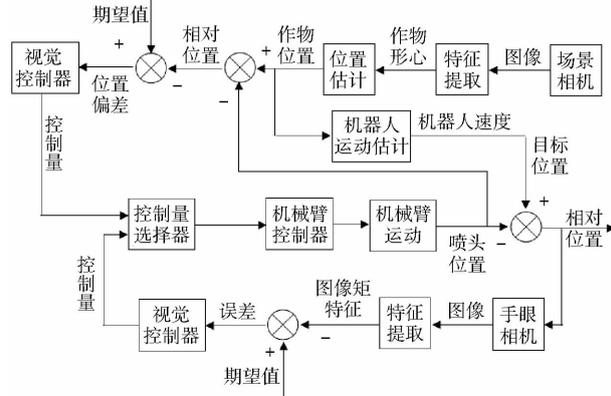


图2 视觉伺服系统结构

Fig. 2 Structure diagram of visual servoing system

1.2 基于场景相机的作物位置及机器人速度估算

场景相机固定在喷雾机器人上,故其参考系相对于机器人参考系的变换矩阵 rM_c 固定不变,该矩阵可通过标定法^[15]求得,此处不再赘述。设求得

$${}^rM_c = \begin{bmatrix} {}^rR_c & {}^rT_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

则场景相机参考系原点 O_c 在机器人参考系中的坐标为 $[O_{cx} \ O_{cy} \ O_{cz} \ 1]^T = [{}^rT_c \ 1]^T$ 。

假设田中作物等高,其冠层均在机器人参考系中 $Z=h$ 的平面内,设 Q 为某株作物的冠层形心点,其在场景相机中的投影点 q 的图像坐标为 $[u \ v]^T$,若 f 表示场景相机焦距,则 q 点在场景相机参考系的齐次坐标为 $[u \ v \ f \ 1]^T$,在机器人参考系的齐次坐标为 $[q_x \ q_y \ q_z \ 1]^T = {}^rM_c [u \ v \ f \ 1]^T$ 。

由投影几何关系, Q 点为 O_c 点与 q 点连线的延长线与 $Z=h$ 平面的交点,故 Q 点在机器人参考系的坐标为

$$\begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} q_x - O_{cx} \\ q_y - O_{cy} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_{cx} \\ O_{cy} \\ h \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$k = \frac{h - O_{cz}}{q_z - O_{cz}}$$

该坐标即可表示目标作物在机器人参考系的位置。

此外,若设 T 为采用周期, Q 点在 kT 时刻及 $(k+1)T$ 时刻在机器人参考系的坐标分别为 Q_k 和 Q_{k+1} ,则机器人移动速度可近似表示为

$$v_h = \frac{Q_k - Q_{k+1}}{T} \quad (2)$$

实际估算机器人的移动速度时,可选择多株作物并记录下其形心点在多个历史时刻的坐标,然后

利用最小二乘法计算以提高估算精度。

2 基于图像矩的视觉跟踪

2.1 方法描述

视觉伺服控制系统的目标是使误差函数趋向于零,即

$$e(t) = s - s^*$$

式中 s ——采用的图像特征

s^* ——图像特征的期望值

若采用速度控制器,可建立图像特征速度 \dot{s} 与相机相对于目标作物运动速度 v 间的关系,即

$$\dot{s} = L_s v \quad (3)$$

式中 L_s ——图像雅可比矩阵

对于静止的目标($\dot{e}(t) = \dot{s}(t)$),为保证误差函数 $e(t)$ 能以指数收敛,可使

$$\dot{e}(t) = -\lambda e(t) \quad (4)$$

式中 λ ——衰减系数

将式(4)代入式(3),可得

$$v = -\lambda L_s^{-1} (s - s^*) \quad (5)$$

式中 L_s^{-1} —— L_s 的逆矩阵

显然,设计速度控制器的关键问题是选取合适的图像特征并计算 L_s 。由于喷雾机械臂为3自由度平动机构,因此,可选用3个解耦的矩特征用于喷雾机械臂的控制。

2.2 矩特征的选取

一幅尺寸为 $M \times N$ 的二值图像,其 $i+j$ 阶几何矩和中心矩可分别定义为

$$m_{ij} = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M x^i y^j I(x, y)$$

$$\mu_{ij} = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M (x - \bar{x})^i (y - \bar{y})^j I(x, y)$$

其中 $\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}$ $\bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}}$

式中 x, y ——图像像素的坐标

$I(x, y)$ ——像素点 (x, y) 的强度(0或1)

\bar{x}, \bar{y} ——目标的质心位置

当相机与目标之间出现平行于相机平面的相对平移运动时(X, Y 方向),其运动可反映为一阶矩 m_{10}, m_{01} 或质心位置 \bar{x}, \bar{y} 的变化;当两者间出现垂直于相机平面的相对平移运动时(Z 方向),其运动可反映为零阶矩 m_{00} 的变化。因此,文献[16-17]分别选取矩特征集合 $\{m_{10}, m_{01}, m_{00}\}$ 、 $\{\bar{x}, \bar{y}, m_{00}\}$ 来控制机械臂的3个平动自由度。但 m_{00} 的变化相对于 v_z (机械臂 Z 方向速度)的动态关系与 m_{10}, m_{01} 相对于 v_x, v_y (机械臂 X, Y 方向速度)的关系不同,为获得更好的控制效果,文献[13]选取了3个归一化矩

$\{a_n\bar{x}, a_n\bar{y}, a_n\}$ 控制 3 个平动自由度, 其中, $a_n = Z^* \sqrt{\frac{a^*}{a}}$, $a = \mu_{20} + \mu_{02}$, Z^* 和 a^* 分别为 Z 、 a 的期望值。但上述矩特征集合主要针对已知目标的视觉跟踪问题, 当目标不同, 矩特征的期望值也不同, 因此均不适用于目标作物不断更换的对靶喷雾过程。为此, 选取 3 个期望值不随作业目标更换而变化的矩特征作为伺服特征, 以实现的对靶喷雾过程中的视觉跟踪。

当采用实心锥喷头进行垂直向下喷雾作业时, 液滴覆盖面近似为圆形, 其实际覆盖面的直径可近似表示为

$$d_0 = \xi h \tan \frac{\alpha}{2} \quad (6)$$

式中 h ——喷雾高度 α ——喷射角
 ξ ——药液实际覆盖面直径相对于理论覆盖面直径的比例系数, 与药液粘度、温度、表明张力等有关

假设目标作物冠层表面为一平面, 且平行于图像平面, 则可以以冠层的质心为圆心构建一冠层二维最小包围圆 (MEC)。为满足对靶喷雾要求, 可以使液滴实际覆盖面与 MEC 吻合, 此时, 可由冠层质心决定喷头的 X 、 Y 向喷雾位置, MEC 的直径 d_1 决定喷雾高度 h , 由式 (6) 可知

$$h = \frac{d_1}{\xi \tan \frac{\alpha}{2}} \quad (7)$$

根据小孔成像模型 (图 3), MEC 在图像平面投影的直径

$$d_2 = d_1 f / h_1 \quad (8)$$

式中 h_1 ——相机与作物冠层间距

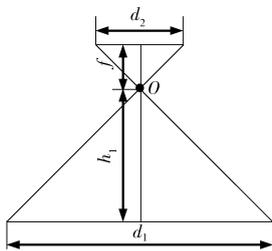


图 3 目标成像几何

Fig. 3 Imaging geometry of target

若手眼相机和喷头的安装高度一致 ($h_1 = h$), 则将式 (7) 代入式 (8), 可得

$$d_2 = \xi f \tan \frac{\alpha}{2} \quad (9)$$

式中, ξ 、 f 和 α 均可视为常量, 故 d_2 也为常量。即在上述条件下, 对于不同的作业目标, 其 MEC 在期望喷雾位置处的图像投影的直径 d_2 为定值, 因此, 可

根据目标作物冠层图像投影的质心坐标以及 MEC 的投影直径来确定喷头位置, 实现对靶喷雾。在此, 选择矩特征集合 $\left(\frac{m_{10}}{m_{00}}, \frac{m_{01}}{m_{00}}, k \sqrt{\frac{\mu_{20} + \mu_{02}}{m_{00}}}\right)$ 来控制机械臂的 3 个平动自由度。 $\sqrt{\frac{\mu_{20} + \mu_{02}}{m_{00}}}$ 为目标作物冠层图像投影的惯性半径, 其与 MEC 投影直径间的比例系数 k 可用统计的方法估算。同时, 由于 $\frac{m_{10}}{m_{00}}$ 仅与 X 向平移有关、 $\frac{m_{01}}{m_{00}}$ 仅与 Y 向平移有关、 $\sqrt{\frac{\mu_{20} + \mu_{02}}{m_{00}}}$ 仅与 Z 向平移有关, 故可实现 X 、 Y 、 Z 方向平移运动的解耦。

2.3 图像雅可比矩阵

喷雾机械臂的运动引起手眼相机的运动, 设其末端移动速度为 $\mathbf{v}_c = (v_{cx}, v_{cy}, v_{cz})$, 机器人的移动速度为 $\mathbf{v}_h = (v_{hx}, v_{hy}, v_{hz})$, 则手眼相机相对于目标的移动速度 $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z) = \mathbf{v}_c + \mathbf{v}_h$, 矩特征集 $\mathbf{S} = \left(\frac{m_{10}}{m_{00}}, \frac{m_{01}}{m_{00}}, k \sqrt{\frac{\mu_{20} + \mu_{02}}{m_{00}}}\right)$ 对时间的变化率 $\dot{\mathbf{S}}$ 与移动速度 \mathbf{v} 间的关系可表示为

$$\dot{\mathbf{S}} = \mathbf{L}_s \mathbf{v}$$

式中 \mathbf{L}_s ——与 \mathbf{S} 相关的图像雅可比矩阵

假设目标作物冠层为平面, 且平行于图像平面, 则根据文献 [12] 提供的计算方法, 经一系列推导, 可得

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Z} & 0 & \frac{m_{10}}{Z m_{00}} \\ 0 & -\frac{1}{Z} & \frac{m_{01}}{Z m_{00}} \\ 0 & 0 & \frac{k}{Z} \sqrt{\frac{\mu_{20} + \mu_{02}}{m}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Z 为目标作物冠层在手眼相机参考系下的深度, 需要实时计算, 目前比较常用的方法是用期望位置处的深度 Z^* 作为其估计值 [17], 将其视为常数, 但当伺服空间较大时, 这种简化会对规划的运动轨迹造成不利的影响。本文利用作物冠层成像尺寸随成像深度的变化关系来实时计算深度 Z 。

根据小孔成像模型 (图 3), 目标作物冠层的成像尺寸与相机沿光轴 (Z 向) 方向的移动有关, 而与其沿 X 、 Y 向的移动基本无关。设作物冠层的实际面积为 A , 在 t_1 、 t_2 时刻的成像面积分别为 m_{00}^1 、 m_{00}^2 , t_2 时刻相对于 t_1 时刻相机沿 Z 向的位移为 d_z , 则作物冠层在 t_1 、 t_2 时刻的深度 Z_1 、 Z_2 可分别表示为

$$\begin{cases} Z_1 = f \frac{\sqrt{A}}{\sqrt{m_{00}^1}} \\ Z_2 = f \frac{\sqrt{A}}{\sqrt{m_{00}^2}} \\ d_z = Z_2 - Z_1 \end{cases}$$

联立求解,可得

$$Z_2 = \frac{d_z \sqrt{m_{00}^1}}{\sqrt{m_{00}^1} - \sqrt{m_{00}^2}} \quad (11)$$

可知, Z_2 即为当前位置(即 t_2 时刻)目标作物冠层在手眼相机参考系下的深度。

3 实验验证

3.1 仿真实验

在 Matlab 下通过仿真验证上述基于图像矩的视觉跟踪方法。相机采用透视投影模型,焦距设为 10 mm,伺服对象为一平行于相机平面的作物图像,该图像二值化后在期望位置和投影位置处的投影如图 4 所示。设机器人的移动速度为 $v_{hx} = 0.05$ m/s、 $v_{hy} = 1$ m/s、 $v_{hz} = 0$ m/s,在期望位置处目标的深度 $Z^* = 0.5$ m、矩特征 $S^* = (493, 304, 268)$ 。控制增益矩阵在对靶阶段取为 $\lambda = \text{diag}[0.01 \ 0.005 \ 1]$,在悬停喷雾取为 $\lambda = \text{diag}[0.01 \ 0.15 \ 1]$ 。

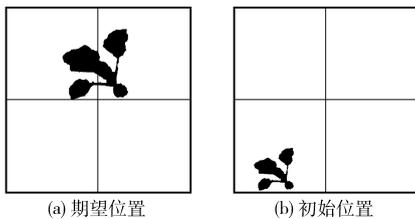


图 4 仿真图像

Fig. 4 Images used for simulation

仿真结果如图 5 所示。其中,图 5a 为各矩特征跟踪曲线,可见,各矩特征误差均可稳定收敛,因机器人在 X 、 Y 方向平移运动速度的影响,矩特征 $\frac{m_{10}}{m_{00}}$ 、 $\frac{m_{01}}{m_{00}}$ 的收敛误差分别为 2 像素和 9 像素,在期望位置处反映为位置误差 1 mm 和 4.5 mm,矩特征 $k \sqrt{\frac{\mu_{20} + \mu_{02}}{m_{00}}}$ 的收敛误差为 0 像素。图 5b 为喷雾机械臂各方向速度曲线, X 、 Y 和 Z 向速度分别稳定收敛于 -0.05 、 -1 、 0 m/s,该速度与机器人运动的合速度为零,保证了悬停喷雾阶段的对靶精度。

为验证前述实时计算图像雅可比矩阵中目标成像深度 Z 的效果,与同种条件下应用 Z^* 作为 Z 估计值的情况进行了对比。仿真结果表明,第 2 种情

况下,各矩特征误差和喷雾机械臂各方向速度虽然也可稳定收敛,但收敛速度较慢,且喷雾机械臂在图像空间中的运动轨迹(图 5c)以及在笛卡尔空间的运动轨迹(图 5d)均劣于第 1 种情况。

更换多种不同形状的作物图像进行上述仿真实验,结果显示均可取得较高的控制精度,证明该方法具有较强的适应性。

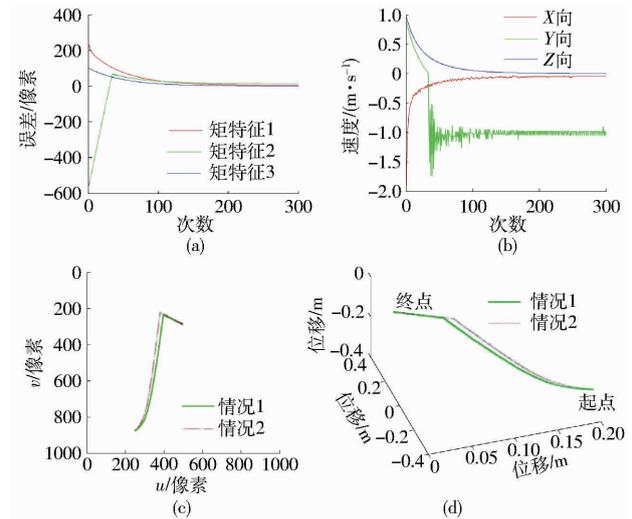


图 5 仿真结果

Fig. 5 Simulation results

3.2 样机实验

搭建了一台具有一组喷雾机械臂的简易样机(图 6)对所提自动对靶方法的可行性进行验证。实验对象选为定植初期的葫芦苗,其株距一般为 0.4 ~ 0.6 m,当长至 4 ~ 6 片真叶时,需对叶面喷施 2 ~ 3 次乙烯利,以加速雌花形成,提高产量。

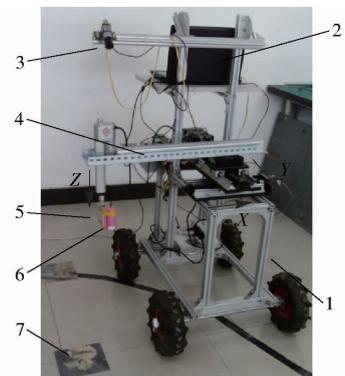


图 6 实验样机

Fig. 6 Experimental prototype

1. 车体 2. 计算机 3. 场景相机 4. 自由度机械臂 5. 镭射灯
6. 手眼相机 7. 作物图片

图 7a 为温室环境下使用场景相机采集的葫芦苗图像。图像中各作物冠层形心的提取过程为:先采用超绿减超红算子($3G - 2.4R - B$)对彩色图像进行灰度化,再利用最大类间方差法(Otsu)对获得的灰度图像进行阈值分割,一般情况下,分割后的二值

图像中会存在杂草、随机噪声、作物叶片分离等缺陷,可先通过形态学闭运算提高图像连通性,再应用 2 次扫描法对连通区域进行标记,并采用面积滤波法去除杂草、随机噪声和较远处作物等离散小区域,进而计算各连通区域的像素坐标平均值作为各作物冠层形心坐标^[18-21]。处理结果如图 7b 所示,其中,十字标记处为各作物形心位置。此外,应用该方法对采集的多种光照条件下的图像进行处理,均取得理想效果,说明该方法可以满足场景相机图像中作物图像坐标信息提取的需要。进一步地,可根据本文 1.2 节所述方法计算各作物在机器人参考系的位置以及机器人的移动速度。

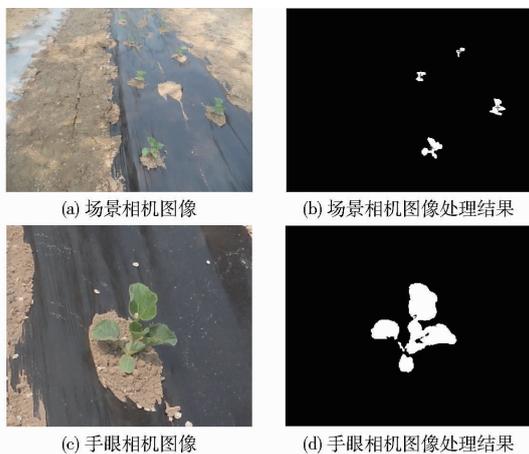


图 7 温室葫芦苗图像与图像处理结果

Fig. 7 Gourd seeding image and image processing result

手眼相机场景中通常仅包含一株作物,对其图像(图 7c)采用与场景相机图像处理过程类似的灰度化、阈值分割、形态学闭运算及面积滤波处理,可得到分割效果较好的二值图像(图 7d),该分割方法的鲁棒性也通过对多种光照条件下图像的处理得以验证。进一步地,可根据 2.2、2.3 节所述方法计算 3 个矩特征值及雅可比矩阵。

温室内路面状况较好,其凹凸不平引起的样机随机振动较小,且由于喷头与手眼相机相对位置固定,随机振动对于两者与目标作物间相对位姿的影响相同,因而可进一步弱化随机振动对对靶精度的影响。为便于在实验过程中准确测量对靶误差,忽略温室路面状况及室外光照的影响,选择在实验室可控环境下进行样机实验,并且,将喷头采用可发出红色光束的可控激光镭射灯替代,将实验对象采用 5 幅打印的葫芦苗图片替代,并在图片上标记以作物形心为圆心的最小包围圆 MEC 和以形心为原点、分度值 1 mm 的标尺和网格线(图 8)。

实验中,5 幅作物图片按 X 向间隔 30 ~ 50 mm、 Y 向间隔 400 ~ 550 mm 方式随机放置,车速 150 ~ 200 mm/s,喷雾时间 0.8 s。喷头 X 、 Y 方向的期望位

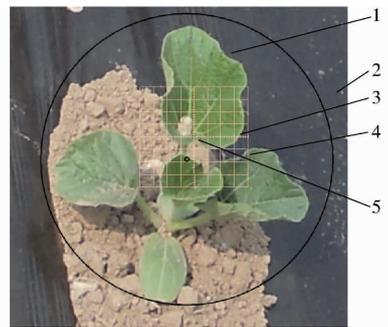


图 8 打印的作物图片

Fig. 8 Printed crop picture

1. 作物 2. MEC 3. 标尺 4. 网格 5. 形心

置为作物形心,其实际值通过测量落在作物图片上的光点获得。 Z 向期望位置根据式(7)确定,这里取 $Z^* = 3.21d_1$ (设 $\xi = 0.75$, $\alpha = 45^\circ$),其实际值由喷雾机械臂的位置传感器提供。手动控制喷雾机械臂使喷头依次对准 5 张作物图片的期望喷雾位置,并记录对准时手眼相机(分辨率 800 像素 \times 600 像素)图像的矩特征集 $S = \left(\frac{m_{10}}{m_{00}}, \frac{m_{01}}{m_{00}}, k \sqrt{\frac{\mu_{20} + \mu_{02}}{m_{00}}} \right)$ 的取值,重复测量 2 次,并取矩特征集的平均值作为其期望值,这里, S 的期望值取为 $S^* = (296, 242, 212)$ 。

对靶精度测试实验重复进行了 10 次,结果如图 9 所示。喷雾过程中,喷头 X 、 Y 、 Z 向位置均有一定波动,将波动范围的中心作为其实测值,图 9a 显示了该实测值相对于期望值的偏差,可见,喷头 X 向定位精度约为 ± 3.4 mm, Y 向定位精度约为 ± 6.5 mm, Z 向定位精度范围为 ± 3.9 mm。图 9b 显示了喷雾过程中喷头 X 、 Y 、 Z 向位置的波动量,由于样机移动速度的影响, Y 向的波动量明显大于 X 与 Z 向,并且随着移动速度的增大, Y 向的波动量也趋于增大。图 9c 显示了 X 、 Y 向平均喷雾位置与其期望位置,图 9d 显示了 Z 向平均喷雾位置与期望位置,可见 X 向平均喷雾位置的偏差为 $-0.4 \sim 0.9$ mm, Y 向为 $-2.2 \sim 1.2$ mm, Z 向为 $-1.1 \sim 1.3$ mm。

4 结论

(1) 提出了一种适用于间距较大作物冠层喷雾作业的喷雾机器人自动对靶方法。该方法采用单目场景/单目(多目)手眼混合视觉结构,场景相机用于目标预定位及机器人移动速度的估算,手眼相机用于目标的跟踪对靶。样机实验证明,该方法能较好地满足工作范围大、对靶精度较高、实时性较强的对靶喷雾作业要求。

(2) 选取了一组期望值不随作业目标更换而变化的矩特征作为伺服特征,实现了对靶喷雾过程中

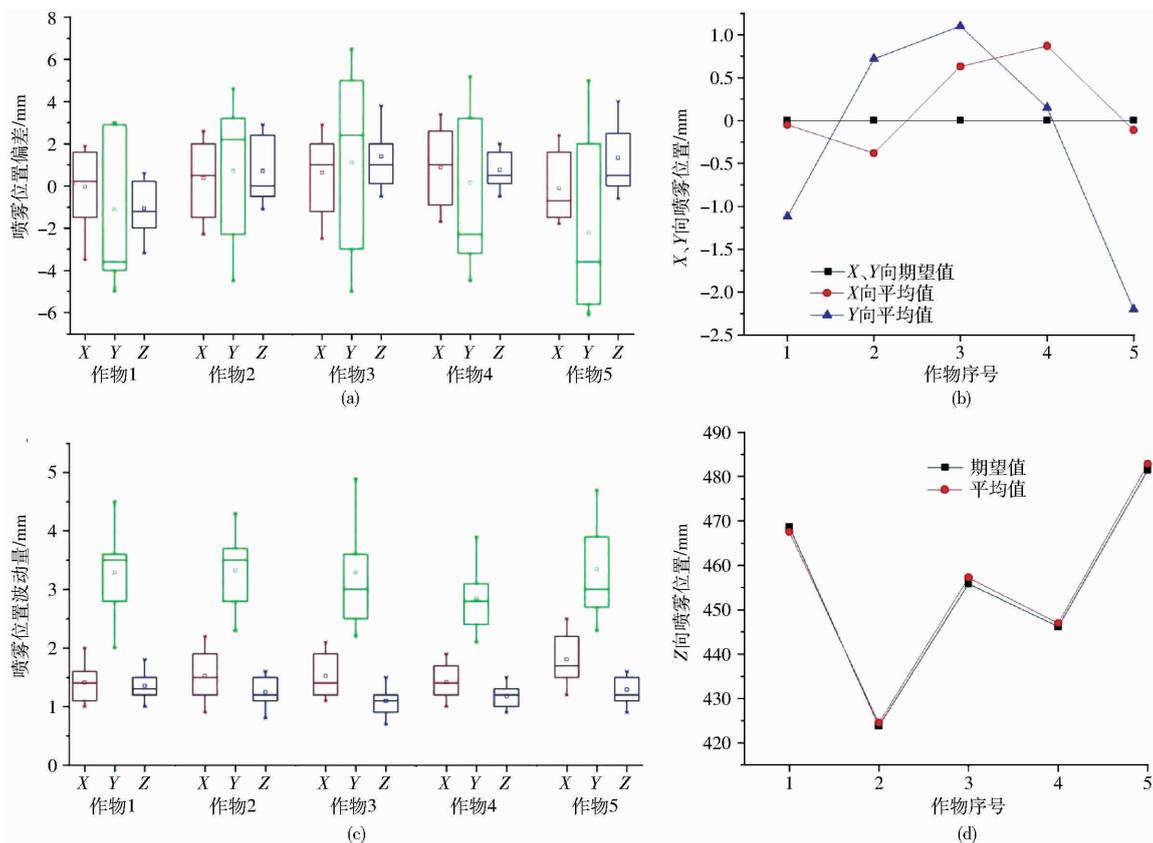


图9 实验结果

Fig.9 Experimental results

的视觉跟踪。研究了矩特征变化量与相对位姿变化量间的关系矩阵,即图像雅可比矩阵,并针对雅可比矩阵中的目标深度,提出了一种实时估算法。仿

真结果表明,基于该图像矩特征的视觉跟踪方法可以稳定收敛,控制精度较高,且采用实时估算深度法比常用的固定深度法效果更优。

参 考 文 献

- 邱白晶,闫润,马靖,等. 变量喷雾技术研究进展分析[J]. 农业机械学报,2015,46(3):59-72.
QIU Baijing, YAN Run, MA Jing, et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(3):59-72. (in Chinese)
- 赵建柱,宗玉峰,王枫辰,等. 雷达识别狼毒草喷药灭除装置[J]. 农业机械学报,2014,45(增刊):68-72.
ZHAO Jianzhu, ZONG Yufeng, WANG Fengchen, et al. Spraying and removal device for *Stellera chamaejasme* identified by radar[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(Supp.):68-72. (in Chinese)
- 刘雪美,李扬,李明,等. 喷杆喷雾机精确对靶施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(3):37-44.
LIU Xuemei, LI Yang, LI Ming, et al. Design and test of smart-targeting spraying system on boom sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(3):37-44. (in Chinese)
- 邓巍,何雄奎,张录达,等. 自动对靶喷雾靶标红外探测研究[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(10):2285-2289.
DENG Wei, HE Xiongkui, ZHANG Luda, et al. Target infrared detection in target spray[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008,28(10):2285-2289. (in Chinese)
- 尹东富,陈树人,毛罕平,等. 基于模糊控制的棉田变量对靶喷药除草系统设计[J]. 农业机械学报,2011,42(4):179-183.
YIN Dongfu, CHEN Shuren, MAO Hanping, et al. Weed control system for variable target spraying based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(4):179-183. (in Chinese)
- GILES D K, SLAUGHTER D C. Precision band spraying with machine-vision guidance and adjustable yaw nozzles [J]. Transactions of ASAE, 1997,40(1):29-36.
- TIAN L, REID J F, HUMMEL J W. Development of a precision sprayer for site-specific weed management [J]. Transactions of ASAE, 1999,42(4):893-900.
- TIAN L. Development of a sensor-based precision herbicide application system [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002,36(23):133-149.
- 张俊雄,曹峥勇,耿长兴,等. 温室精准对靶喷雾机器人研制[J]. 农业工程学报,2009,25(增刊2):70-73.
ZHANG Junxiong, CAO Zhengyong, GENG Changxing, et al. Research on precision target spray robot in greenhouse [J].

- Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp. 2): 70 - 73. (in Chinese)
- 10 曹峥勇, 张俊雄, 耿长兴, 等. 温室对靶喷雾机器人控制系统[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 2): 228 - 233.
CAO Zhengyong, ZHANG Junxiong, GENG Changxing, et al. Control system of target spraying robot in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 2): 228 - 233. (in Chinese)
- 11 谷雨, 李平, 韩波. 一种适用于局部特征的混合视觉伺服方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(1): 43 - 47.
GU Yu, LI Ping, HAN Bo. Hybrid visual servoing scheme applicable for local features [J]. Control and Decision, 2010, 25(1): 43 - 47. (in Chinese)
- 12 CHAUMETTE F. Image moments: a general and useful set of features for visual servoing [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(4): 713 - 723.
- 13 TAHRI O, CHAUMETTE F. Point-based and region-based image moments for visual servoing of planar objects [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2005, 21(6): 1116 - 1127.
- 14 李优新, 毛宗源, 田联房. 基于图像矩与神经网络的机器人四自由度视觉伺服[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(10): 1162 - 1166.
LI Youxin, MAO Zongyuan, TIAN Lianfang. Visual servoing of 4DOF using image moments and neural network [J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(10): 1162 - 1166. (in Chinese)
- 15 ZHANG Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C] // Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision, 1999: 666 - 673.
- 16 林靖, 陈辉堂, 王月娟. 基于图像矩的机器人视觉伺服[J]. 同济大学学报, 2000, 28(4): 438 - 442.
LIN Jing, CHEN Huitang, WANG Yuejuan. Visual servoing using image moments [J]. Journal of Tongji University, 2000, 28(4): 438 - 442. (in Chinese)
- 17 董志丹, 刘士荣, 姜宏超. 基于图像矩和矢量积法的六自由度机械臂视觉伺服控制[J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(3): 221 - 226.
DONG Zhidan, LIU Shirong, JIANG Hongchao. Visual servoing control of a 6-DOF robot manipulator based on image moments and vector product [J]. University of Shanghai for Science and Technology, 2013, 35(3): 221 - 226. (in Chinese)
- 18 赵瑶池, 胡祝华. 基于对数相似度约束 Otsu 的自然场景病害果实图像分割[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 9 - 15.
ZHAO Yaochi, HU Zhuhua. Image segmentation of fruits with diseases in natural scenes based on logarithmic similarity constraint Otsu [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 9 - 15. (in Chinese)
- 19 崔永杰, 苏帅, 王霞霞, 等. 基于机器视觉的自然环境中猕猴桃识别与特征提取[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 247 - 252.
CUI Yongjie, SU Shuai, WANG Xiaxia, et al. Recognition and feature extraction of kiwifruit in natural environment based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 247 - 252. (in Chinese)
- 20 彭辉, 吴鹏飞, 翟瑞芳, 等. 基于视差图像的重叠果实图像分割算法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 167 - 173.
PENG Hui, WU Pengfei, ZHAI Ruifang, et al. Image segmentation algorithm for overlapping fruits based on disparity map [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 167 - 173. (in Chinese)
- 21 张志斌, 罗锡文, 臧英, 等. 基于颜色特征的绿色作物图像分割算法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 183 - 189.
ZHANG Zhibin, LUO Xiwen, ZANG Ying, et al. Segmentation algorithm based on color feature for green crop plants [J]. Transactions of the CASE, 2011, 27(7): 183 - 189. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 21 页)

- 22 郑小东, 赵杰文, 刘木华. 基于双目立体视觉的番茄识别与定位技术[J]. 计算机工程, 2004, 30(22): 115 - 116, 171.  
ZHENG Xiaodong, ZHAO Jiewen, LIU Muhua. Tomatoes recognition and location from nature background based on binocular stereo vision [J]. Computer Engineering, 2004, 30(22): 115 - 116, 171. (in Chinese)
- 23 田海波, 马宏伟, 魏娟. 串联机器人机械臂工作空间与结构参数研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 196 - 201.  
TIAN Haiibo, MA Hongwei, WEI Juan. Workspace and structural parameters analysis for manipulator of serial robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 196 - 201. (in Chinese)
- 24 刘志忠, 柳洪义, 罗忠, 等. 机器人工作空间求解的蒙特卡洛法改进[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 230 - 235.  
LIU Zhizhong, LIU Hongyi, LUO Zhong, et al. Improvement on Monte Carlo method for robot workspace determination [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 230 - 235. (in Chinese)
- 25 李瑞峰, 马国庆. 基于 Matlab 仿人机器人双臂运动特性分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(增刊): 343 - 347.  
LI Ruifeng, MA Guoqing. Dual-arm kinematic characteristics analysis of humanoid robot based on Matlab [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(Supp.): 343 - 347. (in Chinese)
- 26 李国利, 姬长英, 顾宝兴. 基于单目视觉与超声检测的振荡果实采摘识别与定位[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 1 - 8.  
LI Guoli, JI Changying, GU Baoxing. Recognition and location of oscillating fruit based on monocular vision and ultrasonic testing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 1 - 8. (in Chinese)