

# 番茄收获机械手避障运动规划<sup>\*</sup>

梁喜凤 王永维 苗香雯

**【摘要】** 基于伪距离避障法,以机械手可操作度作为优化指标,采用性能优化与正运动学迭代相结合的方法,进行了番茄收获机械手连杆避障运动规划与仿真。试验结果表明,机械手臂能够沿预定路径成功避开障碍物到达目标位置,并能保证良好的可操作性性能,各关节位置变化连续、平滑,无关节越限现象,末端执行器位置绝对误差为0.87 mm,运动速度为0.18 m/s,机械手能够满足番茄收获的精度和生产率要求。

**关键词:** 番茄 收获机器人 机械手 运动规划 避障 优化

**中图分类号:** S225; TP242.6

**文献标识码:** A

## Motion Planning of a Tomato Harvesting Manipulator for Obstacle Avoidance

Liang Xifeng Wang Yongwei Miao Xiangwen  
(Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

### Abstract

Free-obstacle motion planning of a tomato harvesting manipulator was studied based on a pseudo-distance approach. An optimization technique and alternative approach using a forward kinematics was applied to solve the path planning, which was modeled with consideration of manipulability measure maximization and obstacle avoidance for links of the manipulator. The simulation results show that the tomato harvesting manipulator can avoid obstacles successfully and reach the objective position along a specified geometric trajectory with optimal manipulability. The joints displacement varies smoothly within their limits. The position absolute error and moving rate of the end-effector are 0.87 mm and 0.18 m/s respectively. the harvesting manipulators can fulfill the accuracy of tomato picking with well working efficiency.

**Key words** Tomato, Harvesting robot, Manipulators, Motion planning, Obstacle avoidance, Optimization

### 引言

番茄收获机械手运动规划能力是衡量其智能化程度的重要指标之一。由于非结构化的复杂农业生产环境,番茄收获机械手工作过程中,植物茎、叶和未成熟果实不可避免将成为障碍物,给机器人工作带来不便。目前, Gilbert、Perdereau、封岸松等对工业机械手避障方法进行了研究<sup>[1~4]</sup>。存在的主要

问题是由于障碍物形状复杂,避障数学模型建立困难,控制实时在线性差,尤其不适于机械手臂的避障控制;由于避障导致机械手工作空间减少,降低了工作性能等。有关收获机械手的避障研究较少,主要通过增加冗余空间大小进行避障能力衡量<sup>[5]</sup>。因此研究适于番茄收获机械手手臂和末端执行器避障运动规划的方法,保证机械手跟踪预定路径,避开障碍物而正常工作,同时满足一定的性能要求具有

收稿日期: 2008-01-23

<sup>\*</sup> 浙江省高校青年教师资助计划项目

梁喜凤 浙江大学生物系统工程与食品科学学院 博士生 副教授(中国计量学院), 310029 杭州市

王永维 浙江大学生物系统工程与食品科学学院 讲师 博士 通讯作者

苗香雯 浙江大学生物系统工程与食品科学学院 教授 博士生导师

重要意义。本文基于伪距离避障法,采用优化与迭代相结合的方法,对番茄收获机械手避障运动规划进行研究。

### 1 番茄收获机械手机构

番茄收获机械手是由5个转动关节与2个移动关节组成的冗余度机械手,机构简图及用 Denavit - Hartenberg方法设定的固联坐标系前置模型,如图1所示<sup>[6~9]</sup>。

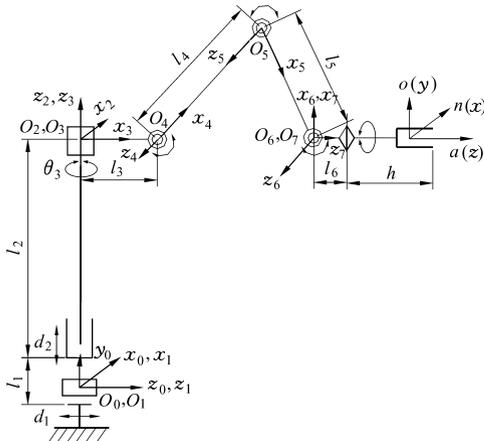


图1 番茄收获机械手机构及其杆件坐标系

Fig.1 Mechanism and links coordinates of a tomato harvesting manipulator

### 2 番茄收获机械手避障模型

#### 2.1 伪距离法避障原理

伪距离用来评价机械手上任意一点与障碍物之间的位置关系,基本思想是用解析函数来描述障碍物表面(对于不规则物体用多面体将其包络起来),然后将检测到的表面点与机械手位置关系表示为函数形式<sup>[1]</sup>。为减小由于避障对工作空间的影响,将复杂形状的障碍物用椭球体包络,使障碍物规则化,通过调整椭球半轴的长度,来近似多种形状和大小的障碍物。将障碍物放置在笛卡尔坐标系  $Oxyz$  中,障碍物与机械手连杆  $i$  在  $Oxy$  平面的投影如图2所示。

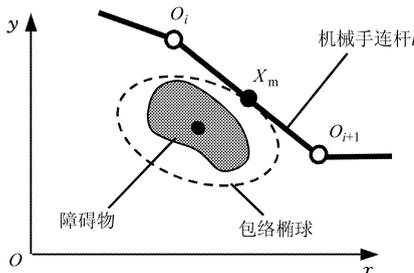


图2 机械手连杆  $i$  与障碍物的伪距离及障碍物椭球示意图

Fig.2 Pseudo-distance between link  $i$  of manipulator and an obstacle with ellipsoidal shape

若椭球体的表面方程表示为  $S(X)=0$ ,对于空间任意一点  $X_0$ ,则满足性质:若  $S(X_0)<0$ ,则点  $X_0$  在椭球体内部;若  $S(X_0)=0$ ,则点  $X_0$  在椭球体表面;若  $S(X_0)>0$ ,则点  $X_0$  在椭球体外部。

因此,  $S(X_0)$ 描述了障碍物与机械手之间的接近程度,只要保证  $S(X_0)>0$  即可实现避障。

#### 2.2 避障模型建立

设包络障碍的椭球体表面方程为

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2} = 1 \quad (1)$$

式中  $x_0, y_0, z_0$ ——椭球体球心的  $x, y, z$  坐标

$a, b, c$ ——椭球体的  $x, y, z$  半轴长度

用向量形式表示为

$$\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{B}^T \mathbf{X} + \mathbf{C} = 0 \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{X} = [x, y, z]^T$$

$$\mathbf{Q} = \text{diag}[1/a^2, 1/b^2, 1/c^2]$$

$$\mathbf{B} = [-2x_0/a^2, -2y_0/b^2, -2z_0/c^2]^T$$

$$\mathbf{C} = x_0^2/a^2 + y_0^2/b^2 + z_0^2/c^2 - 1$$

由式(2)可知,  $\mathbf{Q}, \mathbf{B}$  和  $\mathbf{C}$  均为常量。

机械手连杆  $i$  上任一点  $X$  可用向量表示为

$$\mathbf{M} = \mathbf{N} + \lambda \mathbf{U} \quad (3)$$

式中  $\mathbf{M}$ —— $O$  到  $X$  的向量

$\mathbf{N}$ —— $O$  到  $O_i$  的向量

$\mathbf{U}$ —— $O_i$  到  $O_{i+1}$  的向量

$\lambda$ ——常数( $0 \leq \lambda \leq 1$ )

机械手连杆上任意一点  $X_0$  与障碍物之间的伪距离为

$$S(\mathbf{X}_0) = \mathbf{X}_0^T \mathbf{Q} \mathbf{X}_0 + \mathbf{B}^T \mathbf{X}_0 + \mathbf{C} \quad (4)$$

采用向量形式表示,式(4)伪距离可表示为  $\lambda$  的函数  $V(\lambda)$ ,即

$$\mathbf{V}(\lambda) = (\mathbf{N} + \lambda \mathbf{U})^T \mathbf{Q} (\mathbf{N} + \lambda \mathbf{U}) + \mathbf{B}^T (\mathbf{N} + \lambda \mathbf{U}) + \mathbf{C} = \lambda^2 + \lambda \mathbf{U}^T \mathbf{\Delta}_1 + \mathbf{W}_1 \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{\Delta}_1 = 2\mathbf{Q} \mathbf{N} + \mathbf{B}$$

$$\mathbf{W}_1 = \mathbf{N}^T \mathbf{Q} \mathbf{N} + \mathbf{B}^T \mathbf{N} + \mathbf{C}$$

为求得最小伪距离,将式(5)对  $\lambda$  求导并令其等于零,即

$$\frac{d\mathbf{V}(\lambda)}{d\lambda} = 2\lambda \mathbf{U}^T \mathbf{Q} \mathbf{U} + \mathbf{U}^T \mathbf{\Delta}_1 = 0 \quad (6)$$

$$\text{得 } \lambda = \lambda_m = -\frac{1}{2} \frac{\mathbf{U}^T \mathbf{\Delta}_1}{\mathbf{U}^T \mathbf{Q} \mathbf{U}} \quad (7)$$

如图2所示,此时点  $X_m$  为机械手连杆上离障碍物最近的点,于是  $X_m$  表示为向量形式

$$\mathbf{X}_m = \mathbf{N} + \lambda_m \mathbf{U} \quad (8)$$

式中  $\mathbf{X}_m$ —— $O$  到点  $X_m$  的向量

当  $\lambda_m < 0$  时,则令  $\lambda_m = 0$ ,即  $X_m$  位于点  $O_i$  处;

当  $\lambda_m > 1$  时,则令  $\lambda_m = 1$ ,即  $X_m$  位于点  $O_{i+1}$  处。

将  $X_m$  表示为机械手关节变量  $q$  的函数, 于是机械手连杆  $i$  与障碍物之间的最小伪距离为

$$H_0(q) = S(\mathbf{X}_m(q)) = \mathbf{X}_m^T(q) \mathbf{Q} \mathbf{X}_m(q) + \mathbf{B}^T \mathbf{X}_m(q) + \mathbf{C} \quad (9)$$

为满足避障要求, 最小伪距离应大于障碍物安全区边界与障碍物间的设定距离  $d_s$ , 则将式(9)表示为不等式形式的避障约束条件, 为

$$-S(\mathbf{X}_m(q)) + d_s^2 \leq 0 \quad (10)$$

### 3 避障运动规划

#### 3.1 运动学建模原理

如果机械手的自由度为  $n$ , 工作空间维数为  $m$ , 且  $r \in \mathbf{R}^m$ ,  $q \in \mathbf{R}^n$ , 分别为任务空间变量和关节空间变量, 则在  $t$  时刻机械手正运动学方程可表示为

$$\mathbf{r}(t) = \begin{bmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \\ \vdots \\ r_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)) \\ f_2(q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)) \\ \vdots \\ f_m(q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(11)是一个以  $q_i(t)$  为输入、以  $r_i(t)$  为输出的多输入多输出系统, 若  $q_i(t)$  在  $t + \Delta t$  时刻的关节变量表示为

$$q_i(t + \Delta t) = q_i(t) + \Delta q_i(t) \quad (12)$$

则  $t + \Delta t$  时刻的运动学方程为

$$\mathbf{r}(t + \Delta t) = \begin{bmatrix} r_1(t + \Delta t) \\ r_2(t + \Delta t) \\ \vdots \\ r_m(t + \Delta t) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} f_1(q_1(t) + \Delta q_1(t), q_2(t) + \Delta q_2(t), \dots, q_n(t) + \Delta q_n(t)) \\ f_2(q_1(t) + \Delta q_1(t), q_2(t) + \Delta q_2(t), \dots, q_n(t) + \Delta q_n(t)) \\ \vdots \\ f_m(q_1(t) + \Delta q_1(t), q_2(t) + \Delta q_2(t), \dots, q_n(t) + \Delta q_n(t)) \end{bmatrix} \quad (13)$$

设  $t$  时刻预定的末端执行器参考位置在笛卡尔坐标系中表示为  $\mathbf{r}_{\text{ref}}(t)$  ( $t = 1, 2, \dots, N$ ), 若机械手初始位置已知, 运动规划要解决的关键问题是求解  $\Delta q_i(t)$ , 使得  $\mathbf{r}(t + \Delta t)$  满足所期望的末端执行器位置  $\mathbf{r}_{\text{ref}}(t + \Delta t)$ 。为提高末端执行器在  $t$  时刻的运动精度, 限定各关节  $\Delta q_i(t)$  的最大变化范围, 并规定末端执行器的规划误差允许范围, 同时保证各关节在其极限范围内运动。依据上述运动学要求, 采用迭代与优化相结合的方法, 进行番茄收获机械手 PTP(点到点)运动规划。

#### 3.2 优化模型

为降低约束条件的限定, 减小障碍物对机械手灵活性等工作性能的影响, 选取机械手可操作度指标作为运动规划优化模型的目标函数, 建立避障运动规划优化模型为

$$\begin{cases} \max_{\Delta q(t)} \Phi = H_w(q) = \sqrt{\det(\mathbf{J}(q) \mathbf{J}^T(q))} \\ \mathbf{r}(t + \Delta t) = \mathbf{f}(q_i(t + \Delta t)) = \mathbf{f}(q_i(t) + \Delta q_i(t)) \\ |\mathbf{r}_{\text{ref}}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t + \Delta t)| \leq \rho \\ S(\mathbf{X}_m(q)) + d_s^2 \leq 0 \\ |\Delta q_i(t)| \leq M_i \\ L_i \leq q_i(t) + \Delta q_i(t) \leq U_i \end{cases} \quad (14)$$

式中  $\Phi$ ——机械手可操作度

$\mathbf{J}(q)$ ——机械手雅可比矩阵

$\rho$ ——末端执行器运动精度

$L_i, U_i$ ——各关节运动上、下限

设工作环境中有一障碍物, 用椭球体包络, 如图 3 所示。工作过程中, 机械手臂与末端执行器均需要避障, 本文以机械手连杆 5 为例说明避障运动规划过程。

#### 3.3 仿真试验

番茄收获机械手工作时, 垂直平面内为主要工作区, 为简化计算, 突出问题重点, 取关节  $\theta_3$  为定值, 只描述机械手垂直平面内的运动轨迹, 此时末端执行器位置只是关节 1、2、4、5、6 的函数(机械手手腕关节 7 对位置无影响)。依据机械手实际尺寸与极限位置,  $y$  与  $z$  方向仿真空间边界分别设定为  $(0, 1.505)$  和  $(0, 1.385)$ 。取关节  $\theta_3 = \pi/2$ ,  $\theta_7 = 0$ , 根据 Denavit - Hartenberg 坐标系, 通过齐次变换法建立 7 自由度番茄收获机械手的正运动学方程为

$$\begin{cases} r_1(t) = x = 0 \\ r_2(t) = y = -(l_6 + h) \cos(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - l_5 \sin(\theta_4 + \theta_5) + l_4 \sin \theta_4 + d_2 + l_2 \\ r_3(t) = z = (l_6 + h) \sin(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + l_5 \cos(\theta_4 + \theta_5) + l_4 \cos \theta_4 + l_3 + d_1 \end{cases}$$

设末端执行器初始位置为  $\mathbf{r}_0 = [x_0, y_0, z_0] = [0, 0.70339, 0.87248]$ , 目标位置为  $\mathbf{r}_d = [x_d, y_d, z_d] = [0, 0.5, 0.7]$ 。如果设定末端执行器运动轨迹为一直线, 在初始位置至目标位置间的运动参考点数选为  $N$ , 则表示在直角坐标系中的轨迹点为

$$\mathbf{r}_{\text{ref}}(t) = \mathbf{r}_0 + k(\mathbf{r}_d - \mathbf{r}_0)/N \quad (k = 1, 2, \dots, N)$$

运动规划优化模型(式(14))中的初始参数设定如下: 番茄收获机械手关节初始值为  $[d_1, d_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7] = [0.1, 0.1, \pi/2, \pi/3, -\pi/2, \pi/4 +$

$\pi/2, 0], \rho = [0.002, 0.002]$ , 取  $d_s = 0.44$  m, 障碍物的中心位置  $(x_0, y_0) = (0.45, 0.65)$ , 障碍物包络椭圆的长轴和短轴分别为  $a = 0.05$  m,  $b = 0.04$  m。

### 3.4 仿真结果分析

在相同初始条件下, 番茄收获机械手避障和无障碍运动规划仿真结果如图3和图4所示。避障运动规划中各关节位移曲线与运动误差如图5和图6所示。

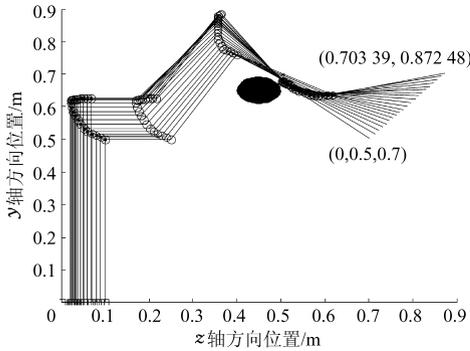


图3 机械手避障运动规划位姿图

Fig. 3 Successive configurations of motion planning with obstacles

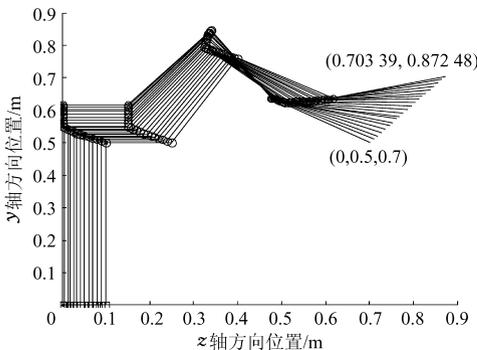


图4 机械手无障碍运动规划位姿图

Fig. 4 Successive configurations of motion planning without obstacles

由图3和图4知, 以番茄收获机械手可操作度最大化为目标函数, 采用伪距离避障法进行运动规划, 能够实现机械手由初始位置沿预定路径运动到目标位置, 且机械手手臂成功避障, 但由于障碍物的存在, 无障碍与避障运动规划中各关节变化量不同。

由图5知, 机械手各关节位置变化连续平滑, 未出现关节越限现象。由图6知, 运动规划中最大绝对误差位于规划点13处, 为2.18 mm, 是由于此时关节2到达极限位置而致。规划中采用番茄收获机械手可操作度作为优化目标, 因此在奇异位置即规

划点1处误差并未出现突然增大现象, 该方法对提高工作性能具有优化作用。机械手到达目标位置时, 末端执行器绝对误差为0.87 mm, 而番茄果实如小番茄(圣女果)纵、横向直径分别是32~37 mm和25~29 mm<sup>[10]</sup>, 相对于番茄果实而言误差较小, 可见该番茄收获机械手能够满足番茄采摘的精度要求。避障运动规划时间消耗为  $t = 1.496$  s, 即末端执行器运动速度为0.18 m/s, 机械手具有较高的生产率。

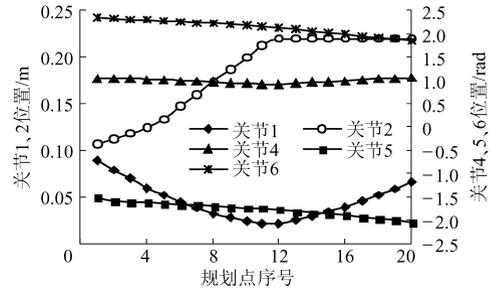


图5 番茄收获机械手各关节位移曲线

Fig. 5 Joints position of the manipulator in motion planning with obstacles

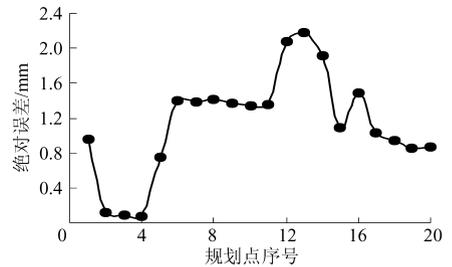


图6 末端执行器绝对位置误差曲线

Fig. 6 Tracking errors of the end-effector in motion planning with obstacles

## 4 结束语

以番茄收获机械手可操作度最大化为目标函数, 采用伪距离避障法和迭代法相结合的方法能够使番茄收获机械手在保证良好工作性能的前提下实现避障运动规划, 机械手由初始位置沿预定路径运动至目标位置, 并成功避开障碍物。避障运动规划过程中, 番茄收获机械手各关节变量变化连续、平滑, 无关节越限现象, 系统运行平稳, 机械手末端执行器位置绝对误差为0.87 mm, 运动速度为0.18 m/s, 满足番茄采摘的精度要求, 生产率较高, 该避障运动规划方法可行。

### 参 考 文 献

- 1 Perdereau V, Passi C, Drouin M. Real-time control of redundant robotic manipulators for mobile obstacle avoidance[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2002, 41(1): 41~59.
- 2 Chih-Jer Lin. Motion planning of redundant robots by perturbation method[J]. Mechatronics, 2004, 14(3): 281~297.

- 3 封岸松, 戴炬. 冗余自由度机械手的避障控制[J]. 机器人, 2002, 24(3): 213~216.  
Feng Ansong, Dai Ju. Obstacle avoidance control about redundant manipulator[J]. Robot, 2002, 24(3): 213~216. (in Chinese)
- 4 Homayoun Seraji, Bruce Bon. Real-time collision avoidance for position-controlled manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(4): 670~677.
- 5 Kondo N, Ting K C. Robotics for bioproduction system[M]. Michigan: American Society of Agricultural Engineering Publisher, 1998.
- 6 梁喜凤, 苗香雯, 崔绍荣, 等. 番茄收获机械手运动学优化与仿真试验[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 96~100.  
Liang Xifeng, Miao Xiangwen, Cui Shaorong, et al. Optimization and simulation experiments on the kinematics of the tomato harvesting manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 96~100. (in Chinese)
- 7 梁喜凤, 王永维. 番茄收获机械手奇异性分析与处理[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 85~88.  
Liang Xifeng, Wang Yongwei. Analysis and treatment of singularity for a tomato harvesting manipulator[J]. Transactions of CSAE, 2006, 22(1): 85~88. (in Chinese)
- 8 梁喜凤. 番茄收获机械手机构分析与优化设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.  
Liang Xifeng. Mechanism analysis and optimization design on tomato harvesting manipulator[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- 9 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2003.
- 10 王荣, 焦群英, 魏德强. 葡萄与番茄宏观力学特性参数的确定[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 54~57.  
Wang Rong, Jiao Qunying, Wei Deqiang. Determination of macromechanic parameters of grapes and tomatoes[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 54~57. (in Chinese)
- 11 刘继展, 李萍萍, 李智国. 番茄采摘机器人末端执行器的硬件设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 109~112.  
Liu Jizhan, Li Pingping, Li Zhiguo. Hardware design of the end-effector for tomato-harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 109~112. (in Chinese)
- 12 陈树人, 戈志勇, 王新忠, 等. 番茄采摘机械手 C-空间障碍计算方法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 191~194.

~~~~~

(上接第 88 页)

- 4 Tijmen Bakker, Hendrik Wouters, Kees Van Asselt, et al. A vision based row detection system for sugar beet[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 87~95.
- 5 张红霞, 张铁中, 陈兵旗. 基于模式识别的农田目标定位线检测[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 107~111.  
Zhang Hongxia, Zhang Tiezhong, Chen Bingqi. Detection algorithm for orientation lines based on pattern recognition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 107~111. (in Chinese)
- 6 赵颖, 陈兵旗, 王书茂, 等. 基于机器视觉的耕作机器人行走目标直线检测[J]. 农业机械学报, 2006, 37(4): 83~86.  
Zhao Ying, Chen Bingqi, Wang Shumao, et al. Fast detection of furrows based on machine vision on autonomous mobile robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(4): 83~86. (in Chinese)
- 7 Fernandes L A F, Oliveira M M. Real-time line detection through an improved Hough transform voting scheme[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(1): 299~314.
- 8 Leemans V, Destain M F. Line cluster detection using a variant of the Hough transform for culture row localisation[J]. Image Vision Computing, 2006, 24(5): 541~550.
- 9 Kultanen P, Xu L, Oja E. Randomized Hough transform[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Pattern Recognition, Atlantic City, U. S. A., 1990: 631~635.
- 10 周俊, 姬长英, 刘成良. 农用轮式移动机器人视觉导航系统[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 90~95.  
Zhou Jun, Ji Changying, Liu Chengliang. Visual navigation system of agricultural wheeled-mobile robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 90~95. (in Chinese)
- 11 Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62~66.
- 12 Chen T C, Chung K L. A new randomized algorithm for detecting lines[J]. Real-Time Imaging, 2001, 7(6): 473~481.