

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.031

# 番茄采摘机器人机械臂避障路径规划\*

尹建军<sup>1</sup> 武传宇<sup>2</sup> Yang Simon X<sup>3</sup> Gauri S Mittal<sup>3</sup> 毛罕平<sup>1</sup>

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013;

2. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 3. 圭尔夫大学工程系, 加拿大 圭尔夫 N1G 2W1)

**【摘要】** 以关节型机械臂避开垂直茎秆或撑杆采摘番茄为研究对象,提出了一种基于构形空间的关节型机械臂避障路径规划方法。利用空间映射原理,将关节型机械臂工作空间的三维避障问题转换为平面  $R-R$  机械臂避开障碍圆的问题,用临界碰撞关节角建立  $C$ -障碍空间的映射计算模型,将工作空间的位置避障转换为构形空间连杆关节角的计算。以能量最优函数优选避障规划的关节终点角度,利用  $A^*$  算法计算平面  $R-R$  机械臂的避障关节角路径,获得一系列表示空间连杆位置的相交竖直面,并在竖直面内进行其余关节角的规划。避障采摘番茄的试验表明,机械臂带动夹持器能成功绕过直线状障碍物,引导夹持器到达果实目标位置,证明对平面  $R-R$  机械臂的空间映射建模是正确的,验证了提出的避障路径规划方法是可行的,可以应用于番茄的自动收获。

**关键词:** 番茄 采摘机器人 关节型机械臂 路径规划 避障

**中图分类号:** TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)12-0171-05

## Obstacle-avoidance Path Planning of Robot Arm for Tomato-picking Robot

Yin Jianjun<sup>1</sup> Wu Chuanyu<sup>2</sup> Yang Simon X<sup>3</sup> Gauri S Mittal<sup>3</sup> Mao Hanping<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education,

Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

3. School of Engineering, University of Guelph, Guelph N1G 2W1, Canada)

### Abstract

It is chosen as research object that joint robot arm avoids erect stem or strut to pick tomatoes, and a kind of obstacle-avoidance path planning method based on configuration space of joint robot arm was presented. Space mapping principle was used to transform obstacle-avoidance problem of joint robot arm in 3-D workspace into avoiding obstacle circle problem of planar  $R-R$  robot arm. Critical collision joint angle was used to build up mapping computation models of configuration obstacle space of planar  $R-R$  robot arm, and obstacle-avoidance position computation of joint robot arm in 3-D workspace was transformed into joint angles computation of linkages in configuration space. After terminal joint angles of obstacle-avoidance path planning were optimized according to optimal energy function, the obstacle-avoidance joint angle path of planar  $R-R$  robot arm based on  $A^*$  arithmetic was computed. A series of intersectant erect planes described space link position were obtained and the planning of other joint was carried out in the intersectant erect planes. The test of avoiding erect obstacle to pick tomatoes showed that joint robot arm carried with the gripper can move round linear obstacle and guide the gripper to reach object position. The test proved that mapping computation models of configuration obstacle space of planar  $R-R$  robot arm were correct. It validated that the obstacle-avoidance path planning method was feasible and may be applied into automatic harvesting of tomato.

**Key words** Tomato, Picking robot, Joint robot arm, Path planning, Obstacle-avoidance

收稿日期: 2011-12-21 修回日期: 2012-02-03

\* 国家自然科学基金资助项目(50805067,50905076)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏财教[2011]8号)和浙江省自然科学基金资助项目(R1110502)

作者简介: 尹建军,副教授,博士,主要从事农业机器人技术、现代农业机械集成设计研究, E-mail: yinjianjun@ujs.edu.cn

## 引言

果实收获机器人在非结构化的复杂自然环境下作业,植株茎秆或支撑杆(架)以及未成熟果实如同障碍物分布在成熟果实周围,都给末端执行器采摘果实带来困难。实时规划出一条可行的机械臂运动路径,导引夹持器避开障碍物到达目标位置实施采摘,成为收获机器人路径规划中的重要研究问题。当前,果实采摘的避障路径规划面临的难题可以概括为:空间位姿各异的障碍物形状复杂,难以用数学模型准确描述;机械臂避障模型建立困难,不易将障碍空间转换为构形空间。为此,不少学者进行了机械臂的避障研究。文献[1~3]利用边界特征点和临界碰撞关节角来确定障碍物在构型空间( $C$ -空间)下的障碍域,文献[4]利用规则体的包络对障碍物近似建模。文献[5]将空间障碍物等效为可以用数学描述的圆柱扇环,提出了一种茄子收获机器人机械臂在笛卡尔空间的避障方法。文献[6]基于伪距离避障法进行具有冗余度番茄收获机械手的连杆避障运动规划与仿真。文献[7]采用概率地图进行路径规划。文献[8]应用改进的分解运动速度控制算法(RMRC)进行机械臂的三维避障操作。

本文以关节型机械臂避开垂直茎秆或撑杆采摘番茄为研究对象,提出一种基于构形空间的关节型机械臂避障路径规划方法,进行采摘番茄避障试验。

## 1 避障计算模型

### 1.1 构形空间描述

选择 Motoman SV3X 型机械臂为避障执行部件,6个关节均为旋转关节,采用固联坐标系前置模型来设置机械臂  $D-H$  坐标系,如图1所示。机械

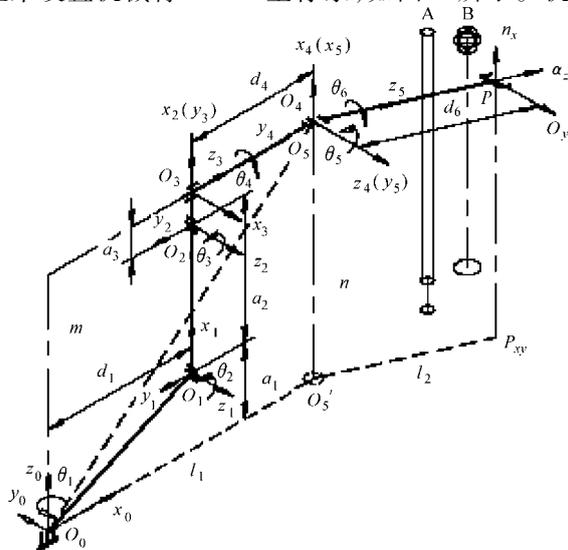


图1 关节型机械臂坐标系及其简化模型

Fig.1 Coordinate system of joint robot arm and its simplified model

臂各连杆参数如表1所示, $\alpha_i$ 为绕  $x_i$ 轴按右手规则由  $z_{i-1}$ 轴转向  $z_i$ 轴的偏角, $\theta_i$ 为绕  $z_{i-1}$ 轴按右手规则由  $x_{i-1}$ 轴向  $x_i$ 轴的关节角。

根据关节型机械手的构型特点,不管  $\theta_1$ 如何转动,连杆1、2、3和4共面,图1标记为面  $m$ ,连杆6所在的面标记为  $n$ 。 $\theta_4$ 和  $\theta_5$ 的关节轴线垂直相交,连杆5的实际长度为零。由于  $\theta_6$ 直接驱动夹持器绕自身轴线作旋转运动,其运动方式对机械臂避障不产生影响,因此避障规划主要是对连杆1到连杆5的关节角规划。

表1 Motoman SV3X 型机械臂的连杆参数

Tab.1 Link parameters of Motoman SV3X robot arm

连杆 $i$	偏角 $\alpha_i / (^\circ)$	杆距 $a_i / \text{mm}$	杆距 $d_i / \text{mm}$	$\theta_i / (^\circ)$	
				初始值	范围
1	90	150	300	0	-170 ~ 170
2	0	260	0	90	-45 ~ 150
3	90	60	0	0	-70 ~ 190
4	-90	0	260	0	-180 ~ 180
5	90	0	0	0	-135 ~ 135
6	0	0	380	0	-350 ~ 350

### 1.2 空间映射建模

为避免直接在3-D空间规划的复杂性,降低规划难度和计算量,通常将机械手和障碍物由三维空间映射到二维平面内进行避障路径规划<sup>[1-5]</sup>。

如图1所示,对线形障碍物A垂直于基准坐标平面  $x_0O_0y_0$ 的情况,线形障碍物A投影为多边形,取其最大外接圆代替一般情况的投影多边形。由于关节型空间机械臂在任意时刻均处于垂直于基准坐标平面  $x_0O_0y_0$ 的2个面  $m$ 和  $n$ 内,将其投影到基准坐标平面上,可简化为平面  $R-R$ 型两杆机械臂。关节  $O_1$ 和  $O_5$ 为新杆1和新杆2的转动副,可调杆长分别为  $l_1$ 和  $l_2$ ,宽度分别为  $w_1$ 和  $w_2$ ,如图2所示。这样,将原避障问题转换为在水平面内的两杆机械臂避开障碍圆的问题,通过计算简化的机械臂与障碍临界碰撞的关节角<sup>[1-3]</sup>,将在工作空间的避障转换到构形空间各连杆关节角的计算。

已知障碍物在  $x_0O_0y_0$ 平面的投影中心  $A(x_A, y_A)$ ,半径为  $r_1$ 。平面  $R-R$ 型两杆机械臂的工作空间是以原点  $O_1$ 为中心的圆环,当两杆共线时随杆1旋转形成外边界,当杆2处于最大极限转角  $\theta_{2\max}$ 时随杆1旋转形成内边界。设障碍圆极径  $\rho$ 位于区间  $(l_1 - l_2, l_1 + l_2)$ 内,目标质心投影点  $B$ 位于障碍圆中心点  $A$ 附近,且在工作空间内。为了避碰障碍圆,两杆机械臂先从初始位置构形1变化到下极限构形2,然后依序过渡到构形3、4、5,直到上极限构形6。同样,再从6依序经过7、8、9,回到下极限构形2,再重新回到初始位

置 1(图 2)。上、下极限构形决定的新杆( $\theta_1, \theta_5$ )点对, 形成该两杆机械臂的避障关节角空间。

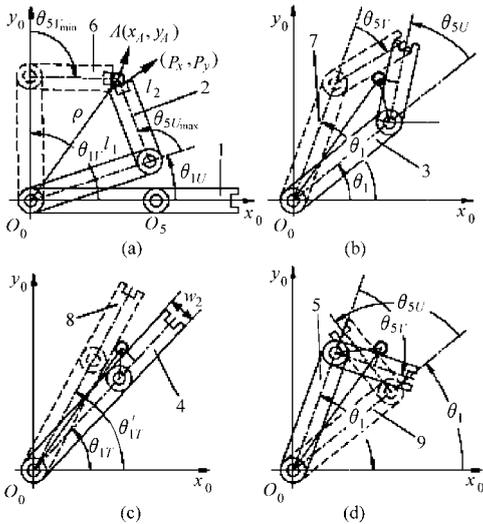


图 2 平面 R-R 机械臂的避障建模

Fig. 2 Obstacle-avoidance model of planar R-R robot arm

当杆 1 和杆 2 由初始共线位置 1 随同杆 1 旋转到使杆 2 与障碍圆刚好发生接触的位置, 如图 2c 中实线构形 4 所示。此时, 新杆 2 的  $\theta_5 = 0$ , 有

$$\theta_{1T} = \arctan \frac{y_A}{x_A} - \arcsin \frac{r_1 + \frac{w_2}{2}}{\rho} \quad (1)$$

其中  $\rho = \sqrt{x_A^2 + y_A^2}$

1.2.1  $\theta_1 \leq \theta_{1T}$  时的临界碰撞关节角

如图 2b 中的实线构形 3 所示, 新杆 2 相对新杆 1 逆时针旋转的临界碰撞关节角为

$$\theta_{5U} = \arctan \frac{y_{O5} - y_A}{x_{O5} - x_A} - \arcsin \frac{r_1 + \frac{w_2}{2}}{s} - \theta_1$$

其中  $s = \sqrt{(x_A - x_{O5})^2 + (y_A - y_{O5})^2}$   
 式中  $x_{O5}, y_{O5}$ ——关节 5 在  $x_0 O_0 y_0$  面的投影位置坐标, 由矩阵  $T$  变换求得<sup>[9]</sup>

$s$ ——新杆 2 回转中心  $O_5$  到障碍投影中心  $A$  之间的距离

新杆的长度  $l_1$  和  $l_2$  分别为

$$l_1 = \sqrt{x_{O5}^2 + y_{O5}^2}$$

$$l_2 = \sqrt{(P_x - x_{O5})^2 + (P_y - y_{O5})^2}$$

其中  $(P_x, P_y)$  为夹持器中心  $P$  在  $x_0 O_0 y_0$  面的投影位置坐标, 由矩阵  $T$  变换求得<sup>[9]</sup>。

当新杆 2 与障碍圆半径共线时,  $\theta_{5U}$  达到极大值  $\theta_{5Umax}$ , 如图 2a 中实线构形 2 所示。

$$\theta_{5Umax} = \arccos \frac{l_1^2 + \rho^2 - (r_1 + l_2)^2}{2l_1\rho} + \arccos \frac{\rho^2 + (r_1 + l_2)^2 - l_1^2}{2\rho(r_1 + l_2)}$$

$$\text{此时 } \theta_{1U} = \arctan \frac{y_A}{x_A} - \arccos \frac{l_1^2 + \rho^2 - (r_1 + l_2)^2}{2l_1\rho}$$

新杆 1 可在区间  $(\theta_{1min}, \theta_{1U})$  自由旋转, 新杆 2 可在区间  $(-\theta_{5max}, \theta_{5Umax})$  自由旋转, 新杆 2 的避障关节角区间为  $(\theta_{5Umax}, \theta_{5U})$ 。

1.2.2  $\theta_1 > \theta_{1T}$  时的临界碰撞关节角

新杆 2 相对新杆 1 顺时针旋转的临界角为  $\theta_{5V} = -\theta_{5U}$ 。当新杆 2 与障碍圆半径共线时,  $\theta_{5V}$  达到极小值  $\theta_{5Vmin}$ , 如图 2a 中虚线构形 6 所示,  $\theta_{5Vmin} = -\theta_{5Umax}$ 。此时

$$\theta_{1V} = \arctan \frac{y_A}{x_A} + \arccos \frac{l_1^2 + \rho^2 - (r_1 + l_2)^2}{2l_1\rho}$$

新杆 1 可在区间  $(\theta_{1U}, \theta_{1max})$  内自由旋转, 新杆 2 可在区间  $(-\theta_{5Vmin}, \theta_{5Vmin})$  内自由旋转, 新杆 2 的避障关节角区间为  $(\theta_{5Vmin}, \theta_{5V})$ 。

根据上述模型, 当障碍物 A 处于  $(500, 0)$  时的  $C$ -障碍空间, 如图 3 所示。 $C$ -障碍空间的形状和位置, 主要由障碍圆半径及其中心的投影位置、变长连杆长度和宽度决定。相比文献 [3] 的计算方法而言, 上述临界碰撞关节角计算模型更适合解析计算, 可获得封闭平滑的障碍域, 几何意义更加明显。

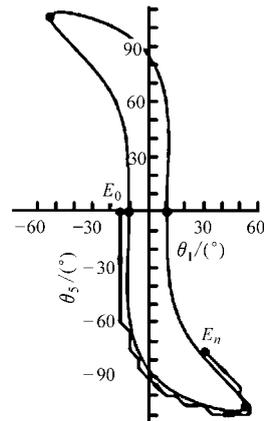


图 3 平面 R-R 机械臂的 C-障碍空间

Fig. 3 C-obstacle space of planar R-R robot arm

2 避障路径规划

避障规划的任务是: 在避碰障碍圆的约束下, 求取机械臂各连杆从初始关节角变化到终点关节角时的一系列中间关节角。

2.1 优选终点关节角

已知机械臂在初始位置时的各关节角 (表 1) 和目标点  $B$  的空间位置  $(x_B, y_B, z_B)$ , 设定夹持器的期望姿态为接近矢量方向  $\alpha_z$  绕  $z_5$  轴在  $(-30^\circ, 30^\circ)$  内偏转, 以  $5^\circ$  间隔获得不同的末端姿态。确定夹持器到达目标点位置时机械臂的终点关节角, 由以下几

步完成:

(1) 根据目标点  $B$  的空间位置和设定的夹持器期望姿态角,利用多关节运动学逆解获得各关节终点角<sup>[9]</sup>,结果为多解。

(2) 由 1.2 节的空间映射模型,计算两杆机械臂的  $C$ -障碍空间(图 3)。

(3) 进行终点关节角的取舍,去除在关节转角范围之外的解和  $(\theta_1, \theta_2)$  在  $C$ -障碍空间内的解。

(4) 按照能量最优函数,选取  $J$  决定的解作为机械臂避障规划的最优终点关节角。

假设有  $K$  组可行解,  $\theta_i^{(n)}$  为各连杆终点关节角,  $\theta_i^{(0)}$  为各连杆初始关节角,  $\omega_i$  为各连杆电动机驱动功率所占总功率的比重,定义能量最优函数  $J$  为

$$J = \min J_k \quad (k = 1, 2, \dots, K)$$

$$J_k = \sum_{i=1}^6 \omega_i |\theta_i^{(n)} - \theta_i^{(0)}| \quad \sum_{i=1}^6 \omega_i = 1$$

$\omega_i$  的值为 0.4、0.2、0.1、0.1、0.1、0.1 ( $i = 1, 2, \dots, 6$ )。

## 2.2 避障规划

当夹持器  $P$  点和目标点  $B$  均位于圆心与障碍圆  $A$  连线的异侧,如图 4 所示,其  $C$ -障碍空间如图 3 所示。新杆 2 在新杆 1 的带动下绕过障碍圆  $A$  后,使夹持器  $P$  点沿着某一轨迹到达目标点  $B$ , 如图 4 所示。

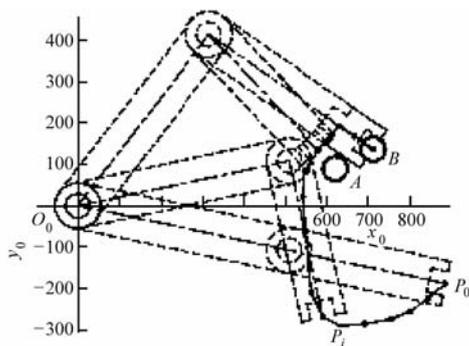


图 4 平面  $R-R$  机械臂的避障规划

Fig. 4 Obstacle-avoidance path planning of planar  $R-R$  robot arm

避障规划过程需要经过以下步骤来完成:

(1) 若  $l_1 + w_1/2 > \rho - r_1$ , 则调节  $\theta_2$ 、 $\theta_3$  和  $\theta_4$ , 使新杆  $l_1$  在水平面的投影长度满足  $l_1 + w_1/2 < \rho - r_1$ 。

(2) 用  $A^*$  算法<sup>[10]</sup> 在  $\theta_1$  和  $\theta_5$  决定的  $C$ -障碍空间内寻求最优路径:以  $5^\circ$  为步长,将  $C$ -障碍空间二维图栅格化,利用  $A^*$  算法搜索一条从初始点  $E_0(\theta_{10}, 0)$  到目标点  $E_n(\theta_{1F}, \theta_{5F})$  的最短路径,如图 3 所示,对应平面  $R-R$  机械臂末端  $P$  点的投影轨迹如图 4 所示,此时对应新杆 1 在各个转角位置均形成一系列无障碍垂直平面  $m$ 。

(3) 在每个  $\theta_1$  形成的无障碍垂直平面  $m$  内,令  $\theta_4$  为  $0^\circ$ , 先后调整  $\theta_2$  和  $\theta_3$  逐步到达终点角  $\theta_{2F}$  和  $\theta_{3F}$ 。

(4) 在每个  $\theta_5$  形成的无障碍垂直平面  $n$  内,调整  $\theta_4$  和  $\theta_5$ , 使连杆 6 始终平行于终点无障碍垂直面  $n$ , 最终使  $\theta_4$ 、 $\theta_5$  和  $\theta_6$  分别达到终点角  $\theta_{4F}$ 、 $\theta_{5F}$  和  $\theta_{6F}$ 。

## 3 避障试验

针对番茄生长环境中障碍物为垂直茎秆和撑杆的典型情况,抽取了带有普遍性的一个环境单元在实验室内重现,如图 5 所示。其中,茎秆垂直于  $x_0O_0y_0$  面,直径为 10 mm,圆心位置为  $(500, 0)$ ,目标番茄的直径为 60 mm。双目定位<sup>[11]</sup> 的番茄质心位置为  $(632.3, 100.6, 836.4)$ ,坐标误差为  $\pm 2$  mm,如图 6 所示。

机械臂各连杆初始关节角为  $(-0.2618, 1.5708, 0, 0, 0, 0)$ ,按 2.1 节所述求得若干组机械臂引导夹持器到达目标点时的各连杆终点关节角,表 2 列出的是部分计算结果。由于第 1 组解的  $J$  值最小,故选取  $(0.5398, 0.7808, 1.0199, -2.3100, -1.3248, 2.3100)$  作为避障规划的终点关节角。

表 2 机械臂终点关节角及  $J$  值  
Tab. 2 Terminal joint angles of robot arm and its value of  $J$

组别	$\theta_{1F}$	$\theta_{2F}$	$\theta_{3F}$	$\theta_{4F}$	$\theta_{5F}$	$\theta_{6F}$	$J$
1	0.5398	0.7808	1.0199	-2.3100	-1.3248	2.3100	1.1751
2	0.5523	0.7642	1.0833	-2.2692	-1.3041	2.2692	1.1795
3	0.5877	0.7199	1.2844	-2.1268	-1.2195	2.1268	1.1857
4	0.5896	0.6735	1.3440	-2.1372	-1.2847	2.1372	1.2103
5	0.5960	0.6782	1.3440	-2.1227	-1.2713	2.1227	1.2077

机械手避障试验过程如图 5 所示。按照避障规划步骤,从机械臂初始位置开始(图 5a),首先调节新杆 1 长度,图 5b 所示调整  $\theta_4$  为  $-\pi/2$ ,图 5c 所示调整  $\theta_2$  和  $\theta_3$  后的机械臂状态。图 5d~5g 所示为沿着  $A^*$  算法得到的  $\theta_1$  和  $\theta_5$  决定的避障路径,从开始点到绕过障碍物的运动结果。图 5h~5l 所示为无障碍垂直平面  $m$  和  $n$  内调整到终点关节角的过程。由以上试验过程可见,按照避障规划流程,机械臂带动夹持器能成功绕过障碍物,引导夹持器到达果实目标位置。试验表明,对平面  $R-R$  机械臂的空间映射建模是正确的,提出的避障路径规划是可行的。

## 4 结束语

用临界碰撞关节角建立  $C$ -障碍空间的映射计算模型,适合解析计算,可获得封闭平滑的障碍域,



图 5 机械臂避障采摘番茄的试验过程

Fig. 5 Test procedures of picking tomato for joint robot arm to avoid obstacle

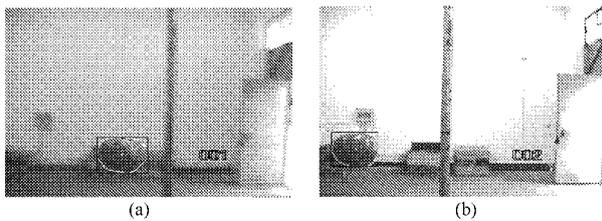


图 6 番茄质心位置的双目定位提取

Fig. 6 Extraction of tomato centroid position using binocular vision

(a) 左目图像 (b) 右目图像

能将工作空间的避障转换为构形空间连杆关节转角

的计算。试验表明,对平面  $R-R$  机械臂的避障建模是正确的。

以能量最优函数优选避障规划的关节终点角,利用  $A^*$  算法可以得到平面  $R-R$  机械臂的避障路径,获得一系列表示空间连杆位置的相交竖直面,并在竖直面内进行其余关节角的规划。避障采摘番茄的试验表明,提出的避障路径规划方法是可行的,可以应用于番茄的自动收获。

## 参 考 文 献

- 1 王伟, 杨扬, 原魁. 机器人  $C$ -空间障碍边界建模与无碰路径规划[J]. 机器人, 1998, 20(4): 280~286.  
Wang Wei, Yang Yang, Yuan Kui. Robot  $C$ -obstacle boundary modeling and collision-free path planning[J]. Robot, 1998, 20(4): 280~286. (in Chinese)
- 2 Konsowa E M, El-Garhy A M. Collision-free path planning algorithm for two-link robotic arm based on geometric modeling [J]. Journal of Engineering and Applied Science, 2008, 55(6): 513~529.
- 3 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.
- 4 陈靖波, 赵猛, 张珩. 空间机械臂在线实时避障路径规划研究[J]. 控制工程, 2007, 14(4): 445~447, 450.  
Chen Jingbo, Zhao Meng, Zhang Heng. Online real-time obstacle avoidance path planning of space manipulator[J]. Control Engineering of China, 2007, 14(4): 445~447, 450. (in Chinese)
- 5 蔡健荣, 赵杰文, Thomas R, 等. 水果收获机器人避障路径规划[J]. 农业机械学报, 2007, 38(3): 102~105, 135.  
Cai Jianrong, Zhao Jiewen, Thomas R, et al. Path planning of fruits harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3): 102~105, 135. (in Chinese)

- 10 Vetrimani R, Jyothirmayi N, Haridas R P, et al. Inactivation of lipase and lipoxygenase in cereal bran, germ and soybean by microwave treatment[J]. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 1992,25(6):532~535.
- 11 Kumar G V, Emilia V T, Haridas R P, et al. Effect of heat treatment on the nutritive value of wheat germ[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 1980,17(6):256~258.
- 12 徐斌,董英,吴艳博.小麦胚芽的微波在线稳定化试验[J].*农业机械学报*,2009,40(8):134~138.  
Xu Bin, Dong Ying, Wu Yanbo. Study on technology of stabilized storage of wheat germ by on-line microwave processing [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009,40(8):134~138. (in Chinese)
- 13 Sudha M L, Srivastava A K, Leelavathi K. Studies on pasting and structural characteristics of thermally treated wheat germ [J]. *European Food Research and Technology*, 2007,225(3~4):351~357.
- 14 董英,徐斌.一种小麦胚芽在线灭酶的方法及装备:中国,200710130943.6[P].2007-09-03.  
Dong Ying, Xu Bin. Technology and equipment of stabilized storage of wheat germ by on line microwave processing:China, 200710130943.6[P].2007-09-03. (in Chinese)
- 15 Devin J R, Oscar A P. A simple method to measure lipase activity in wheat and wheat bran as an estimation of storage quality [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2006,83(5):415~419.
- 16 Shiiba K, Negishik Y, Okada S. Purification and characterisation of lipoxygenase isozymes from wheat germ[J]. *Cereal Chemistry*, 1991,6(8):115~122.
- 17 Zimmerman D C, Vick B A. Hydroperoxide isomerase a new enzyme of lipid metabolism[J]. *Plant Physiology*, 1970,46(3):445~453.
- 18 Srivastava A K, Meyer D, Rao H. Scanning electron microscopic study of dough and chapati from gluten-reconstituted good and poor quality flour[J]. *Journal of Cereal Science*, 2002,35(2):119~128.
- 19 Tipples K, D'Appolonia B, Dirks B, et al. Uses and applications[M]//Shuey C, Tipples K. *The Amylograph Handbook*. St. Paul: The American Association of Cereal Chemists, 1980:12~24.
- 20 Bhattacharya S, Sudha M L, Rahim A. Pasting characteristics of an extruded blend of potato and wheat flours[J]. *Journal of Food Engineering*, 1999,40(1~2):107~111.

---

(上接第 175 页)

- 6 梁喜凤,王永维,苗香雯.番茄收获机械手避障运动规划[J].*农业机械学报*,2008,39(11):89~93.  
Liang Xifeng, Wang Yongwei, Miao Xiangwen. Motion planning of a tomato harvesting manipulator for obstacle avoidance [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008,39(11):89~93. (in Chinese)
- 7 姚立健,丁为民,陈玉仑,等.茄子收获机器人机械臂避障路径规划[J].*农业机械学报*,2008,39(11):94~98.  
Yao Lijian, Ding Weimin, Chen Yulun, et al. Obstacle avoidance path planning of eggplant harvesting robot manipulator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008,39(11):94~98. (in Chinese)
- 8 李东洁,邱江艳,尤波,等.机械臂三维避障算法研究[J].*控制工程*,2010,17(5):669~673.  
Li Dongjie, Qiu Jiangyan, You Bo, et al. Three-dimensional obstacle avoidance algorithm for manipulator [J]. *Control Engineering of China*, 2010,17(5):669~673. (in Chinese)
- 9 王其军,杜建军. MOTOMAN 机器人逆运动学新分析[J].*哈尔滨工业大学学报*,2010,42(3):451~454.  
Wang Qijun, Du Jianjun. A new solution for Inverse kinematics problems of MOTOMAN robot[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010,42(3):451~454. (in Chinese)
- 10 贾庆轩,陈钢,孙汉旭,等.基于 A\* 算法的空间机械臂避障路径规划[J].*机械工程学报*,2010,46(13):109~115.  
Jia Qingxuan, Chen Gang, Sun Hanxu, et al. Path planning for space manipulator to avoid obstacle based on A\* algorithm [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010,46(13):109~115. (in Chinese)
- 11 尹建军,毛罕平.基于断层切片透视的双目测量模型[J].*江苏大学学报:自然科学版*,2011,32(3):249~253.  
Yin Jianjun, Mao Hanping. Binocular measurement model based on fault slice perspective[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2011,32(3):249~253. (in Chinese)