

黄瓜采摘机械臂结构优化与运动分析*

冯青春 纪超 张俊雄 李伟

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 黄瓜采摘机器人在非结构环境中工作时,其机械臂的结构特点与运动精度将直接决定机器人作业范围和采摘成功率。针对黄瓜特定的栽培模式,结合机械臂工作空间及结构长度指标,运用参数优化法,对采摘机械臂构型和结构参数进行了优化设计。建立了机械臂运动D-H模型,实现由关节空间向笛卡尔空间的正逆变换,并确定了机械臂速度雅可比矩阵;应用三次多项式插值法,建立了机械臂关节空间运动规划模型;应用Matlab平台对优化参数进行仿真。结果表明,机械臂实际采摘范围可达到目标工作区域90.5%以上,关节位移变化曲线光滑,运动平稳。

关键词: 黄瓜 采摘机器人 机械臂 参数优化 运动分析

中图分类号: TP242.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)S0-0244-05

Optimization Design and Kinematic Analysis of
Cucumber-harvesting-robot Manipulator

Feng Qingchun Ji Chao Zhang Junxiong Li Wei

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

As the cucumber harvesting robot works in the non-structure condition, the structure and movement of the manipulator directly determines operating space and picking success. According to the specific cucumber cultivation, the manipulator was designed and its structure parameters were optimized based on the method of the parameters optimization. With the D-H kinematic model, the coordinate transformation was achieved between the Articulation and the Cartesian space, and the Jacobian matrix of velocity was derived. Besides, the model was built in the Articulation space for planning path by means of cubic polynomial interpolation. All the parameters optimized was simulated with Matlab, and the simulation results showed that the harvesting manipulator could reach the positions of 90.5% of the cucumbers in the workspace, moreover, it could move smoothly.

Key words Cucumber, Harvesting robot, Robot manipulator, Parameter optimization, Kinematic analysis

引言

采摘机器人是一类工作于非结构环境中的复杂机电一体化产品。在采摘过程中,机械臂只能占用相对最小的操作空间准确完成其动作,这对机械臂结构和控制提出了较高要求^[1]。因此,机械臂的优化设计对改善机器人的采摘效果具有重要意义。

机械臂的机构设计要根据实际的工作要求,选择合适的机构型式并求解各机构结构参数值^[2-8]。本文针对斜拉线式黄瓜栽培模式下采摘目标的空间分布特征,确定机械臂的构型,并将各臂长及关节转角参数化^[7],以机械臂末端活动范围为出发点,建立臂长优化数学模型,综合机械臂实际工作空间、结构长度指标,对机械臂结构尺寸参数进行优化设计。

收稿日期: 2010-07-01 修回日期: 2010-07-19

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA04Z222)

作者简介: 冯青春,硕士生,主要从事农业机器人技术研究,E-mail: fengqingchun@gmail.com

应用 D-H 法建立机械臂正逆运动学模型及机械臂速度雅可比矩阵,对机械臂关节空间运动进行规划,应用三次多项式插值法,建立关节运动的时间函数。

1 机械臂构型设计及臂长优化

1.1 采摘区域

图 1 为黄瓜采摘机器人工作环境,采用斜拉线式栽培模式,有利于将果实与茎叶分离,便于末端执行器切割果柄。机械臂工作空间取决于黄瓜采摘机器人摄像头视场,分布在离地面高 400 ~ 1 200 mm、宽 700 mm、深度为 200 mm 的空间范围内。机械臂底座距黄瓜植株中心 700 mm。

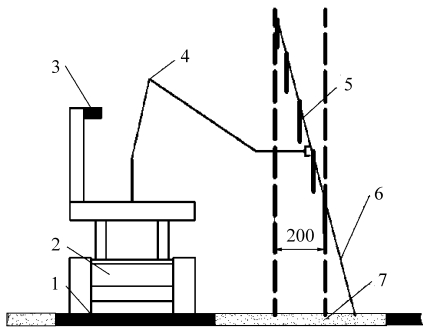


图 1 采摘工况

Fig. 1 Working condition

1. 硬化地面 2. 小车 3. 摄像头 4. 机械臂 5. 黄瓜 6. 拉线 7. 土壤

1.2 机械臂构型设计

采摘目标分布区域较大,温室内可活动空间较小,环境结构复杂。极坐标式机械臂可以在有限空间内拟合空间任意曲线,可按照人为控制对其运动轨迹进行规划,因此本文选择机械臂的结构类型为极坐标型。黄瓜外形呈圆柱形状,由于其自身的对称性,5 个自由度即可满足采摘作业要求,如图 2 所示。本文机械臂关节动作分别为基座旋转、肩关节俯仰、肘关节俯仰、腕关节俯仰和腕关节旋转。

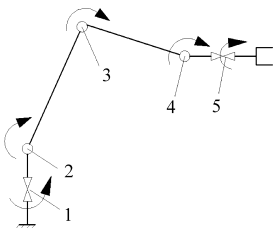


图 2 机械臂构型

Fig. 2 Construction of arm

1. 基座旋转 2. 肩关节俯仰 3. 肘关节俯仰 4. 腕关节俯仰 5. 腕关节旋转

1.3 臂长优化

图 3 为目标区域俯视图,当基座关节旋转范围为 $\pm 31^\circ$ 时,末端执行器可达到宽 700 mm 的目标区

域,且各角度截面内末端执行器深度方向运动范围为 274 mm。

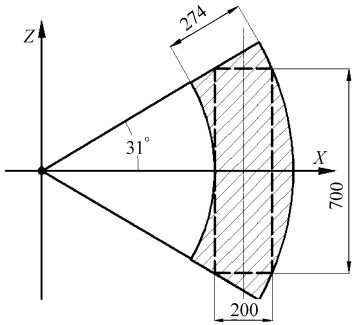


图 3 目标区域俯视图

Fig. 3 Vertical view of work space

如图 4 所示,机械臂放置于小车顶部,车高 440 mm。假设小车基座距其实际工作区域中心为 L ,机械臂基座高为 C ,机械臂大臂长为 a ,小臂长 b ,末端执行器长 d 。以采摘目标矩形(阴影部分)区域 4 个边界点 $(m_i, n_i, i = 0, 1, 2, 3)$ 为初始条件,通过绘图几何求解的方法,得到大、小臂长及边界点相应关节角度分别用 a, b, θ_1, θ_2 表示,其中

$$a = \sqrt{1\,492 - 72C + C^2}$$

$$b = \sqrt{1\,600 + d^2 - 2Ld + L^2}$$

$$\theta_{1\max} = -\theta_{1\min} = -\arctan\left(\frac{14}{C-36}\right)$$

$$\theta_{2\max} = -\theta_{2\min} = -\arctan\left(\frac{40}{L-d}\right)$$

期望工作空间体积 w, d 为常量,优化约束为大小臂最小夹角 $30^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ 、基座高度 $100\text{ mm} \leq C \leq 300\text{ mm}$ 、机械臂距采摘区的水平距离 $500\text{ mm} \leq L \leq 800\text{ mm}$,在满足优化约束的前提下,以 C, L 为变量,使机械臂实际工作空间尽可能大地与期望工作空间重合,从而得到最大化有效工作空间,且须使结构长度指标^[9] $Q_L = \frac{a+b}{\sqrt[3]{w}}$ 最小,相应得到的参数 a, b 为最优大、小臂长。

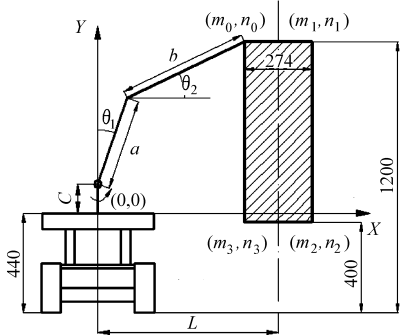


图 4 机械臂参数

Fig. 4 Parameters of manipulator

图 5、图 6 为 C 和 L 与优化目标的关系,随着 C

的增加,结构长度指标逐渐增大,有效采摘空间基本不变;随着 L 增加结构长度指标逐渐增大,有效采摘空间先增加后减小,在 $L = 560\text{ mm}$ 时达到最大。因此,在此取 $C = 170\text{ mm}$, $L = 560\text{ mm}$, $a = 236\text{ mm}$, $b = 443\text{ mm}$, $d = 370\text{ mm}$,使得有效工作空间最大,同时保证了结构长度指标较小。

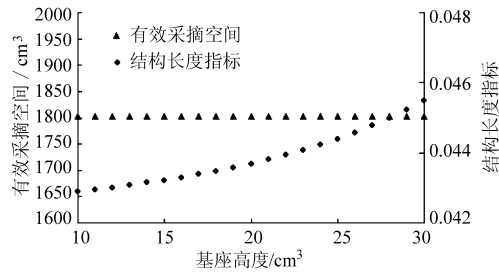


图 5 基座高度与优化目标关系

Fig. 5 Relation between and optimization goals

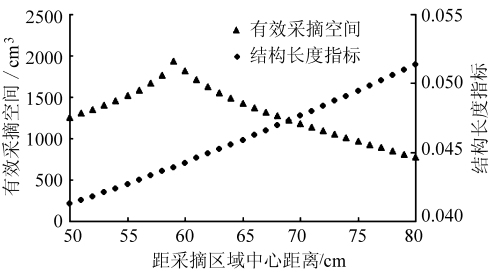


图 6 距采摘区域中心距离与优化目标关系

Fig. 6 Relation between and optimization goals

2 运动分析

2.1 机械臂运动方程

机械臂连杆坐标系^[9]如图 7 所示。将各个连杆变换 $i-1$ T 相乘,得 ${}^0T = {}^0T_1T_2T_3T_4T_5$ 。变换矩阵 0T 是 5 个关节变量的函数,表示末端执行器坐标系 $\{T\}$ 相对于基座坐标系 $\{0\}$ 的描述。

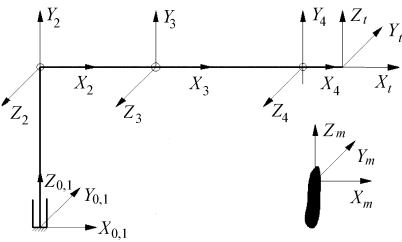


图 7 机械臂坐标系

Fig. 7 Coordinate system

假设目标坐标系为 $\{M\}$,采摘目标点相对基坐标的齐次变换矩阵为 0M T 。当机械臂末端 $\{T\}$ 与目标坐标系 $\{M\}$ 重合,且末端执行器呈水平姿态夹持黄瓜果柄区域,完成采摘定位,即 ${}^0T = {}^0M$ T 。于是有机机械臂正运动学方程

$$\begin{cases} c_1c_{234} = c_1 \\ s_1c_{234} = s_1 \\ c_1s_{123} = 0 \\ c_1c_{234}d + c_1c_{23}b + c_1c_2a + s_1d_2 = x \\ s_1c_{234}d + s_1c_{23}b + s_1c_2a - c_1d_2 = y \\ s_{234}d + s_{23}b + s_2a = z - C \end{cases} \quad (1)$$

其中 $s_1 = \sin\theta_1$ $c_1 = \cos\theta_1$ $s_2 = \sin\theta_2$ $c_2 = \cos\theta_2$
 $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$ $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$
 $s_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ $s_{234} = \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$
 $c_{234} = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$

其中 (x,y,z) 为采摘目标点相对机械臂基坐标原点三维坐标值, $\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4$ 分别为基座、肩关节、肘关节、腕关节转角, d_2 为末端执行器相对基座中心 Z 向偏移距离。在采摘视场平面内黄瓜为长条状,当其采摘部位倾斜角度 α 时,则通过机械臂末端腕关节旋转自由度旋转角度 θ_5 来调整末端执行器姿态,以保证可靠采摘,即 $\theta_5 = \alpha$ 。

为了使机器臂所采摘黄瓜相对参考系的位姿满足给定的要求,需计算相应的关节变量,考虑到机械臂机构动作快捷等因素,去除多解后的逆运动学方程为

$$\begin{cases} \theta_1 = \arcsin\left(\frac{d_2}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) + \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \\ \theta_2 = \pi - \arcsin\left(\frac{a^2 - b^2 + m^2 + z^2}{2a\sqrt{m^2 + z^2}}\right) - \arctan\left(\frac{m}{z}\right) \\ \theta_3 = -\arccos\left(\frac{m^2 + z^2 - a^2 - b^2}{2ab}\right) \\ \theta_4 = -\theta_2 - \theta_3 \\ \theta_5 = \alpha \end{cases} \quad (2)$$

其中 $m = x\cos\theta_1 + y\sin\theta_1$

2.2 机械臂速度雅可比矩阵

机械臂雅可比矩阵与机械臂末端空间速度 v 及关节速度 ω 关系为: $v = J(\theta)\omega$ 。其中,雅可比矩阵的前 3 行元素 J_{vi} 可由机械臂的末端位置矢量 $P = [x,y,z]^T$ 对各关节变量分别求偏导得出;雅可比矩阵后 3 行元素与各关节的单位运动矢量 Z_i 有关, Z_i 可由各关节坐标系对基坐标系的旋转变换矩阵 0R_i 求得^[10],于是得

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} -s_1(d + c_{23}l_2 + c_2l_1) + c_1d_2 & -c_1s_{23}l_2 - c_1s_2l_1 & -c_1s_{23}l_2 & 0 \\ c_1(d + c_{23}l_2 + c_2l_1) + s_1d_2 & -s_1s_{23}l_2 - s_1s_2l_1 & -s_1s_{23}l_2 & 0 \\ 0 & d + c_{23}l_2 + c_2l & d + c_{23}l_2 & d \\ 0 & s_1 & s_1 & s_1 \\ 0 & -c_1 & -c_1 & -c_1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.3 机械臂运动规划

应用逆运动学可以解出对应于目标位姿的各个关节角。现在需要确定每个关节的运动函数,设在 t_0 时刻的值为该关节初始位置 θ_0 ,在 t_f 时刻的值为该关节期望目标位置 θ_f 。为获取一条确定的光滑运动曲线,须使得关节在 t_0 、 t_f 时刻速度为零。显然至少需要对运动函数施加4个约束条件

$$\begin{cases} \theta(0) = \theta_0 \\ \theta(t_f) = \theta_f \\ \dot{\theta}(0) = 0 \\ \dot{\theta}(t_f) = 0 \end{cases} \tag{4}$$

这些约束唯一确定一个三次多项式,其形式为

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \tag{5}$$

其中

$$\begin{aligned} a_0 &= \theta_0 & a_1 &= 0 \\ a_2 &= \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0) \\ a_3 &= -\frac{3}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0) \end{aligned}$$

3 设计参数仿真

将优化得到的大臂、小臂、基座的尺寸参数代入式(2),设定各关节转角范围为

$$\begin{cases} \theta_1 = 0^\circ \\ -90^\circ \leq \theta_2 \leq 90^\circ \\ -45^\circ \leq \theta_3 \leq 180^\circ \\ -45^\circ \leq \theta_4 \leq 180^\circ \end{cases} \tag{6}$$

设定各关节角度变化步长为 10° ,用Matlab编程绘制机械臂实际工作空间如图8所示。由此结果得

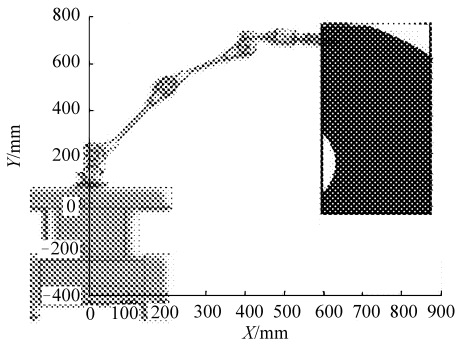


图8 机械臂仿真工作空间
Fig.8 Simulated work space

到,机械臂可达到实际采摘范围占目标矩形工作区域90.5%以上。

假定采摘目标位于以基座为坐标原点空间坐标系(750,300,600)点处,通过式(3)求解个关节目标转角,并对其关节空间进行路径规划,绘制关节运动曲线及末端执行器空寂轨迹曲线。如图9、10所示,可见曲线平滑,关节运动平稳。

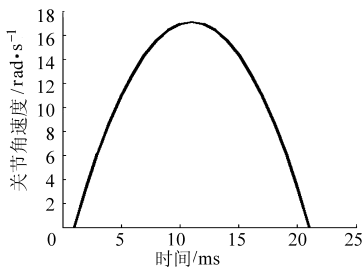


图9 关节速度曲线
Fig.9 Velocity curve of articulation

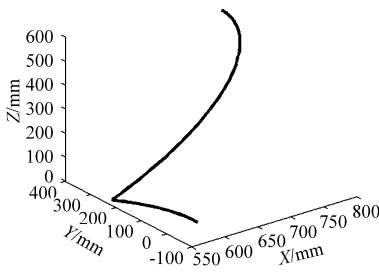


图10 末端执行器空间运动曲线
Fig.10 Motion curve of effector

4 结论

- (1) 黄瓜采摘机械臂工作于农业非结构环境下,需要具备较好的可操作性指标,对其构型及结构参数进行优化设计具有重要意义。
- (2) 针对特定黄瓜栽培模式,结合机械臂工作空间、结构长度指标等,运用结构参数优化法,建立数学模型,最终确定了五自由度极坐标式黄瓜采摘机械臂构型及其最优结构参数。机械臂可达到实际采摘范围占目标工作区域90.5%以上。
- (3) 应用D-H模型进行机械臂运动学分析,建立了机械臂正、逆运动学方程;确定了机械臂速度雅可比矩阵;建立了机械臂关节空间运动规划模型,得到平滑运动曲线,可保证关节运动平稳。

参 考 文 献

1 Van Henten E J, Hemming J. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses[J]. Autonomous Robots,2002, 13(3):241~258.

2 陆怀民. 林木球果采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2001, 32(6): 52~54.

Lu Huaimin. Design and test of collecting robot of conifer cone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001,32(6): 52~54. (in Chinese)

3 Kondo N. Fruit harvesting robot in Japan[J]. Advanced Space Research, 1996,18(1~2):181~184.

4 PonsJ L,Ceres R,Jimenez A. Mechanical design of a fruit picking manipulator: improvement of dynamic behavior[C]//IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,1996,1:969~974.

5 Yoshikawa T. Manipulability of robotic mechanisms [J]. The International Journal of Robotics Research,1985,4(2):3~9.

6 孙杏初. 关节型机器人主连杆(手臂)参数的优化设计[J]. 北京航空航天大学学报,1996,22(4):509~512.
Sun Xingchu. Optimal design of the major linkage parameters of articulated robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1996,22(4):509~512. (in Chinese)

7 李吉. 苹果采摘机械臂设计研究[D]. 北京:中国农业大学,2007.

8 梁喜凤,王永维,苗香雯. 番茄收获机械手机构尺寸优化设计[J]. 机械设计与研究,2008,24(1):21~24.
Liang Xifeng, Wang Yongwei, Miao Xiangwen. Optimal design of mechanism dimension for a tomato harvesting manipulator[J]. Machine Design & Research, 2008,24(1):21~24. (in Chinese)

9 John J Craig. 机器人学导论[M]. 贡超,等译. 北京:机械工业出版社,2006.

10 倪受东,文巨峰,颜景平. 四自由度冗余机器人雅可比矩阵的建立[J]. 仪器仪表学报,2001,22(4):381~383.
Ni Shoudong, Wen Jufeng, Yan Jingping. The establishment of the Jacobian for the 4-DOF reductant robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instament, 2001,22(4):381~383. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 148 页)

10 柏雪源,吴娟,王丽红,等. 生物质热解生物油/柴油乳化燃料的制备与试验[J]. 农业机械学报, 2009,40(9):112~115.  
Bai Xueyuan, Wu Juan, Wang Lihong, et al. Preparation of emulsified fuel from biomass pyrolysis derived bio-oil and diesel and their use in engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(9): 112~115. (in Chinese)

11 矫常命. 农作物秸秆阴燃特性及应用研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2006.  
Jiao Changming. Study on the smoldering characteristics and application of the agro-stalks[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2006. (in Chinese)

12 张琦,常杰,王铁军,等. 生物质裂解油的性质及精制研究进展[J]. 石油化工, 2006,35(5):493~498.  
Zhang Qi, Chang Jie, Wang Tiejun, et al. Progress on research of properties and upgrading of bio-oil[J]. Petrochemical Technology, 2006, 35(5):493~498. (in Chinese)