

关节型果蔬采摘机械臂优化设计与试验*

王 燕 杨庆华 鲍官军 荀 一 张立彬

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310032)

【摘要】 针对现有采摘机械臂存在的问题,研制了四自由度的关节型果蔬采摘机械臂。为使机械臂能够灵活高效地收获目标空间果实,同时尽量减少机械臂的操作空间和结构尺寸,提出了一种应用于采摘空间为任意立方体,通用的关节型机械臂结构参数优化方法:以工作空间为约束条件,建立优化设计的数学模型,并利用 Matlab 优化工具箱来实现。为验证优化方法的合理性,以温室环境下黄瓜采摘作业为例,对研制的采摘机械臂进行了结构参数优化;并对优化后的机械臂进行了运动规划试验。结果表明:优化后的机械臂能包容黄瓜采摘所要求的全部目标空间,并能到达目标空间的极限点和其他采摘点,在 x 、 y 、 z 方向上的最大定位误差分别为:4.3、5.6、6.8 mm,基本能满足黄瓜采摘作业的要求。

关键词: 果蔬 采摘 机械臂 结构优化 工作空间 运动规划
中图分类号: TP24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)07-0191-05

Optimization Design and Experiment of Fruit and Vegetable Picking Manipulator

Wang Yan Yang Qinghua Bao Guanjun Xun Yi Zhang Libin

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract

In view of the existing problems of current picking manipulator, an articulated picking manipulator with four degree of freedom was developed. In order to harvest fruits and vegetables of the target space flexibly and efficiently, meanwhile to reduce operating space and structure size of the manipulator as much as possible, the general structure optimization method of the articulated manipulator for picking fruits and vegetables was proposed, which was applied in random cube of the picking space. The mathematical models were constructed by taking the workspace for constraints, and the Matlab optimization Toolbox was applied to realize the proposed method. For verifying the availability of the method, the structure parameters of the designed articulated picking manipulator were optimized by referring to the example of the cucumber picking operation in greenhouse; and the motion planning experiments of the optimized manipulator were carried out. Experimental results showed that the optimized manipulator could cover the whole required target space of the cucumber harvesting operation, and also could reach the limit points and other picking points of the target space, the maximum positioning errors of the x 、 y 、 z axis were respectively 4.3 mm、5.6 mm、6.8 mm, so it could basically satisfy the requirement of the cucumber picking operation.

Key words Fruit and vegetable, Picking, Manipulator, Structure optimization, Workspace, Motion planning

收稿日期: 2010-03-12 修回日期: 2010-04-07
* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA04Z222、2009AA04Z209)
作者简介: 王燕, 博士生, 主要从事机器人技术及应用、智能仪器仪表研究, E-mail: ggigle@sohu.com
通讯作者: 张立彬, 教授, 博士生导师, 主要从事农业工程及机电控制研究, E-mail: robot@zjut.edu.cn

引言

随着新的农业生产模式和新技术的发展与应用,农业机器人将成为农业生产的主力军。采摘机器人作为农业机器人的重要类型,具有很大的发展潜力。目前,荷兰、日本等国已研制出应用于温室和小型农场的黄瓜、番茄、甘蓝等多种采摘机器人^[1~3],我国一些高校如中国农业大学、浙江大学等也在进行农业收获机器人的研制。综合国内外果蔬采摘机器人的研究文献发现,对于采摘机器人的研究大多集中在视觉系统对目标果实的识别和定位上^[4~5],对机械臂本体结构的研究较少,而机械臂的本体设计及结构参数优化对其工作空间及运动灵活性和稳定性等都会产生影响,在很大程度上决定了整个机器人性能的优劣。但很多农业采摘机器人大都直接购买现有的工业机械手,体积大、成本高,针对这种情况,本文设计一个四自由度的关节型果蔬采摘机械臂,并提出一种应用于采摘空间为任意立方体,通用的关节型机械臂结构参数优化方法。为验证优化方法的合理性,以温室环境下黄瓜采摘作业为例,对研制的四自由度关节型果蔬采摘机械臂进行结构参数优化,并对优化后的机械臂进行运动规划试验。

1 果蔬采摘机械臂本体设计

机器人的结构形式大致有直角坐标型、圆柱坐标型、极坐标型和关节型。其中,关节型机器人主体结构有3个自由度,主要由旋转关节组成,具有与人的肩、肘、腕相对应的关节,比其他类型的机械手更接近于人的手臂。此类机械手灵活性强,结构紧凑,工作范围大而占用空间小。综合考虑4种类型机器人的特点决定选用关节型坐标机器人。

自由度是机器人的一个重要技术指标,理论上6个自由度的机械臂可到达三维空间的任意位置;自由度过少,虽然可简化机器人的结构,但不能完成预定的工作;反之,将造成结构复杂,难以控制^[6]。本文设计的机械臂主要用于温室环境下特殊栽培模式的果蔬,果实已经暴露在外面,藤蔓和果实相距一定的距离,障碍物大大减少,采摘相对容易。因此,设计机械臂时可利用关节型机械臂的3个自由度来确定目标果实的位置;同时,为便于采摘,使末端执行器在采摘过程中保持水平,在腕关节加一个旋转自由度,故4个自由度的机械臂即可满足采摘作业要求。果蔬采摘机械臂实物图如图1所示。主要由腰关节、肩关节、肘关节和腕关节4个旋转关节组成。

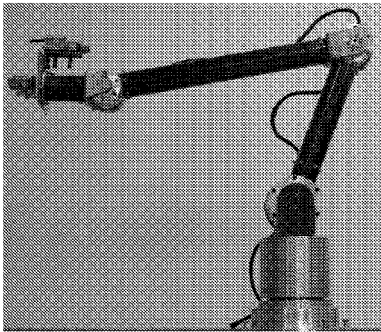


图1 果蔬采摘机械臂实物图

Fig.1 Photo of fruit and vegetable picking manipulator

机械臂设计的指导思想是在满足作业要求的前提下,尽量减轻结构的质量和体积,降低传动机构的复杂性。4个关节的机械结构形式基本相同,均采用直流力矩电动机串接谐波减速器的传动方式,实现驱动元件和执行部分合二为一的目的。底座及各连杆设计为薄壁结构,在保证刚度和强度的前提下,底座和各关节均采用铝合金材料,而各连杆则选用轻质高强的碳纤维管。控制系统采用基于CAN总线通信的分布式控制,机械臂各关节控制器作为CAN总线上的节点,与上位机通信只需4根连线,不仅大大简化系统布线,而且可方便地实现机械臂关节的扩展。

2 果蔬采摘机械臂结构参数优化设计

2.1 目标采摘空间优化问题的简化处理

以温室环境下黄瓜采摘为例,对采摘机械臂进行结构参数优化。设黄瓜的目标采摘空间 $b \times w \times h$ 为 $200\text{ mm} \times 700\text{ mm} \times 800\text{ mm}$,机械臂放置在高为 440 mm 的行走小车上,黄瓜分布在距小车中心横向(沿 x 轴) $600 \sim 800\text{ mm}$,纵向(沿 y 轴) $-350 \sim 350\text{ mm}$,距地面高 $400 \sim 1\,200\text{ mm}$ 的区域中,目标采摘空间主视图如图2所示。

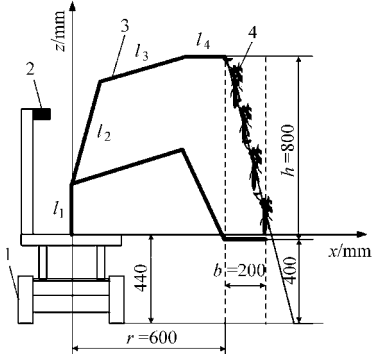


图2 黄瓜目标采摘空间主视图

Fig.2 Front view of cucumber picking target space

1. 行走小车 2. 摄像头 3. 机械臂 4. 黄瓜

经分析可知,满足立方体 $b \times w \times h$ 问题可简化为在纵平面内(Oxz)满足矩形 $b_1 \times h$ 的问题。因为

满足 $b_1 \times h$ 之后, 只需利用腰关节绕 z 轴回转相应的角度 θ_1 , 即可实现要求的工作空间, 腰关节回转的最小角度 θ_1 应满足^[7]

$$\theta_1 \geq \arctan((w/2)/r) \tag{1}$$

$$b_1 = \sqrt{(w/2)^2 + (r+b)^2} - r \tag{2}$$

由图 2 可得: $\theta_1 \geq 30.3^\circ, b_1 = 274 \text{ mm}$ 。

2.2 优化设计变量的确定

机械臂设计变量包括底座高度 l_1 , 大臂长 l_2 , 小臂长 l_3 , 腕关节长 l_4 , 腰部回转角 θ_1 , 肩关节和肘关节的转角范围 $[\theta_{2min}, \theta_{2max}], [\theta_{3min}, \theta_{3max}]$; 腕关节转角 θ_4 。在采摘过程中, 腕关节一直水平, 即 $\theta_4 = -(\theta_2 + \theta_3)$ 。由于底座高度 l_1 和腕关节长度 l_4 与采摘空间的大小无关, 只与采摘空间的相对位置有关, 故不对 l_1 和 l_4 进行优化; 另外, 为简化优化设计过程, 并结合黄瓜目标采摘区域主视图, 可取 $\theta_{2min} = 0, \theta_{3max} = 0$; 故只选取 4 个参数作为设计变量

$$\mathbf{x} = [x(1), x(2), x(3), x(4)]^T = [l_2, l_3, \theta_{2max}, \theta_{3min}]^T \tag{3}$$

2.3 采摘机械臂主连杆确定的工作空间

利用图解法得到采摘机械臂主连杆 (l_2 和 l_3) 在纵平面内确定的工作空间^[8], 如图 3 所示。

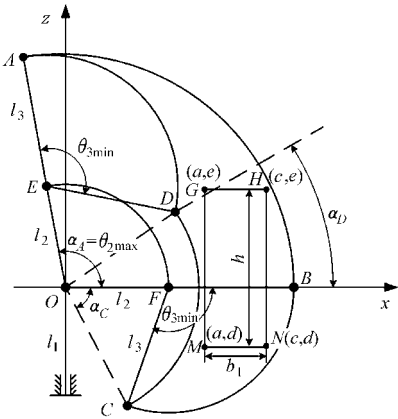


图 3 主连杆确定的工作空间

Fig. 3 Reachable workspace of main links

各段圆弧对应的边界点为: A, B, C, D, E, F 。A 点坐标可表示为

$$\begin{cases} x_A = (l_2 + l_3) \cos \theta_{2max} = (x(1) + x(2)) \cos(x(3)) \\ z_A = (l_2 + l_3) \sin \theta_{2max} = (x(1) + x(2)) \sin(x(3)) \end{cases} \tag{4}$$

圆弧 $\widehat{AB}$ 的半径为

$$r_{OA} = \sqrt{x_A^2 + z_A^2} = x(1) + x(2) \tag{5}$$

其他边界点坐标的求取方法和 A 点相似。

2.4 建立目标函数

选取机械臂实际到达工作空间所围的面积 S_{ABCD} 为目标函数, 并使其在包容所要求的矩形工作

空间 $b_1 \times h$ 条件下为最小值

$$\min f(\mathbf{x}) = S_{ABCD} \tag{6}$$

$$S_{ABCD} = S_{\widehat{OAB}} + S_{\widehat{FBC}} + S_{\triangle OFC} - S_{\triangle OED} - S_{\widehat{OCD}} - S_{\widehat{EDA}} = [r_{OA}^2 \alpha_A - r_{OC}^2 (\alpha_D - \alpha_C)]/2 \tag{7}$$

式中 $\alpha_A, \alpha_C, \alpha_D$ ——A、C、D 点的向量角

r_{OA}, r_{OC} —— $\widehat{AB}$ 弧和 $\widehat{CD}$ 弧的半径

2.5 约束条件

为使机械臂实际到达工作空间 S_{ABCD} 包容所要求的矩形工作空间, 将此约束变换为各段圆弧方程的约束条件:

- (1) $\widehat{AD}$ 弧: 当 $z = z_E, x = l_3 + x_E < a$ 。
- (2) $\widehat{CD}$ 弧: 当 $z = 0, x = \sqrt{x_C^2 + z_C^2} < a$ 。
- (3) $\widehat{AB}$ 弧: 当 $z = e, x = \sqrt{r_{OA}^2 - e^2} > c$ 。
- (4) $\widehat{BC}$ 弧: 当 $z = d, x = x_F + \sqrt{l_3^2 - d^2} > c$ 。

此外, 还应根据机械臂与黄瓜的目标采摘空间之间的位置关系以及机械臂结构干涉所造成的物理约束等, 来考虑各设计变量的边界约束。

2.6 机械臂结构参数的优化

采摘机械臂的结构参数优化是一个单目标非线性多元函数的极值问题, 它具有 1 个目标函数, 4 个设计变量, 4 个不等式约束条件。而 Matlab 则针对优化问题设计了专用的优化工具箱, 用于解决函数的极值问题, 其中, 命令函数 fmincon 用以处理单目标有约束的非线性多元函数的优化问题, 其调用格式是^[9-10]

$$[\mathbf{x}, f] = \text{fmincon}(@ \text{UserFunction}, \mathbf{x}_0, \mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{A}_{eq}, \mathbf{B}_{eq}, \mathbf{l}_b, \mathbf{u}_b, @ \text{NonLinConstr}, \text{options})$$

式中, f 为 $\mathbf{x}$ 在最优解处所对应的函数; UserFunction 是由 M 文件定义的目标函数 $f(\mathbf{x})$; $\mathbf{x}_0$ 是 $\mathbf{x}$ 的初值; $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{A}_{eq}, \mathbf{B}_{eq}$ 定义了线性约束; $\mathbf{l}_b, \mathbf{u}_b$ 是 $\mathbf{x}$ 的下界和上界; NonLinConstr 是用 M 文件定义的非线性向量函数 $\mathbf{C}(\mathbf{x}), \mathbf{C}_{eq}(\mathbf{x})$; options 定义了优化参数。

根据温室黄瓜实际采摘情况, 可取 $l_1 = 260 \text{ mm}$, $l_4 = 200 \text{ mm}$, 取肩关节中心为机械臂坐标原点, 结合图 2 和图 3, 可得: $a = 400 \text{ mm}, c = 674 \text{ mm}, d = -300 \text{ mm}, e = 500 \text{ mm}$ 。由机械臂结构参数优化的目标函数、杆件长度约束条件和关节变量约束条件, 利用 fmincon 函数进行优化。优化过程为:

- (1) 在 Matlab 环境中编写优化函数 Links: 初始化设计变量, 并将各设计变量边界值分别写入到下界和上界向量 $\mathbf{l}_b, \mathbf{u}_b$ 中, 然后调用优化函数 $[\mathbf{x}, f] = \text{fmincon}(@ \text{LinksObjFunc}, \mathbf{x}_0, [], [], [], [], \mathbf{l}_b, \mathbf{u}_b, @ \text{LinksNonLinConstr}, \text{options})$ 。
- (2) 根据式 (7) 建立的目标函数编写 $f =$

LinksObjFunc ($\mathbf{x}$),同时由工作空间所约束的4个不等式条件编写 $[C,C_{eq}] = \text{LinksNonLinConstr}(\mathbf{x})$ 。

(3)运行该程序,可得优化结果为

$$\mathbf{x} = [484.2277 \quad 354.9838 \quad 1.4777 \quad -2.1934]$$

对优化结果进行圆整,可得: $l_2 = 485 \text{ mm}$, $l_3 = 355 \text{ mm}$, $\theta_{2\max} = 85^\circ$, $\theta_{3\min} = -126^\circ$ 。

3 黄瓜采摘机械臂运动规划试验与分析

为验证结构参数优化后的机械臂能否到达目标采摘点,从而完成目标黄瓜的采摘作业,对机械臂进行了从工作状态初始位姿到目标采摘点的运动规划试验。以目标采摘区域中8个极限采摘点和其他任意7个采摘点进行试验,试验环境如图4所示。

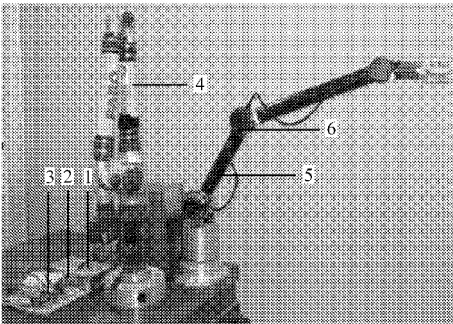


图4 采摘机械手运动规划试验环境

Fig.4 Motion planning experiment of picking robot

1.电源 2. CAN 接口卡 3.上位机运动控制器 4. FaroArm 测量仪 5.采摘机械手 6.关节控制器

具体试验步骤如下:

(1)求解采摘点的逆运动学方程,求解方法见

文献[11],以其中1组极限点为例: $P_x = 800 \text{ mm}$, $P_y = 350 \text{ mm}$, $P_z = 500 \text{ mm}$,代入逆运动学方程,可得机械臂4个关节对应的角度值: $\theta_1 = 23.63^\circ$, $\theta_2 = 39.45^\circ$, $\theta_3 = -6.75^\circ$, $\theta_4 = -32.71^\circ$ 。参照机械臂结构参数的优化结果可知,各关节角度值均在优化范围内。如果令 $P_x = 810 \text{ mm}$ (x 轴方向超出了给定的采摘范围),其他坐标保持不变,则将求得错误的关节角度(角度为复数值),说明以现有的杆件参数到达不了此极限点,将另外14组采摘点分别代入到逆运动学方程,均可得到正确的角度值。

(2)采用基于摆线运动的关节空间轨迹规划方法,由上位机规划出从工作状态初始位姿到极限点对应的关节位置控制指令,通过CAN总线发送到各关节控制器,从而驱动各关节运动到指定位置。各关节的位移规划曲线如图5所示。

(3)机械臂运动到指定位置后,利用美国法如公司生产的便携式三坐标测量仪Platinum FaroArm测量机械臂末端位置坐标,测量精度达0.013 mm。测量结果如表1所示。

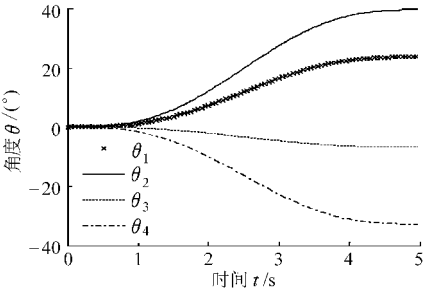


图5 机械臂各关节位移规划曲线

Fig.5 Trajectory planning of each joints of the manipulator

表1 机械臂末端位置坐标测量结果

Tab.1 Measurement results of manipulator end position

序号	理论值			实测值			误差绝对值		
	P_x	P_y	P_z	P'_x	P'_y	P'_z	e_x	e_y	e_z
1	600	350	500	604.1	352.3	493.2	4.1	2.3	6.8
2	600	350	-300	597.6	355.0	-306.2	2.4	5.0	6.2
3	600	-350	-300	596.2	-355.1	-305.3	3.8	5.1	5.3
4	600	-350	500	597.3	-354.2	504.1	2.7	4.2	4.1
5	800	350	500	803.1	355.6	497.0	3.1	5.6	3.0
6	800	350	-300	797.0	345.6	-303.7	3.0	4.4	3.7
7	800	-350	-300	801.2	-346.5	-295.0	1.2	3.5	5.0
8	800	-350	500	803.9	-346.0	497.2	3.9	4.0	2.8
9	620	180	270	623.3	184.9	264.9	3.3	4.9	5.1
10	637	238	488	639.1	243.5	481.6	2.1	5.5	6.4
11	698	154	440	702.3	157.2	435.2	4.3	3.2	4.8
12	700	-200	400	703.7	-202.0	399.1	3.7	2.0	0.9
13	720	280	417	722.5	283.6	410.5	2.5	3.6	6.5
14	750	-50	350	750.4	-52.9	345.5	0.4	2.9	4.5
15	767	176	370	769.8	178.1	364.6	2.8	2.1	5.4

由表 1 可知:机械臂能到达黄瓜目标采摘区域的极限点和其他采摘点;并且机械臂在从工作状态初始位姿到采摘点的试验过程中运行平稳无抖动;从而验证了机械臂机械结构优化设计及运动规划控制方法的有效性与合理性。只是机械臂的定位精度存在一些误差,其在 x 、 y 、 z 方向上的最大误差分别为:4.3、5.6、6.8 mm。误差产生的主要原因有:①机械臂各连杆结构参数由于加工装配偏差所引起的位置误差。②各关节电动机采用的是独立 PID 控制方法,没有考虑各关节同时动作时惯性力及重力项等的相互影响,导致各关节角度的控制产生误差。针对以上两个原因可在以后的研究中采取相应的补偿措施:①采用软件补偿法来补偿由结构参数偏差所引起的位置误差。②采用其他先进的控制方法或考虑机械手动力学模型的控制方法,从而提高机械臂的控制精度。

4 结论

(1)针对现有采摘机械手成本高、体积大的缺

点,研制了一个四自由度的关节型采摘机械臂,该机械臂体积小、质量轻(12 kg 左右)、成本低、结构紧凑,具有足够的强度和承载能力。

(2)为使研制的采摘机械臂能灵活高效地收获目标空间果实,提出了一种应用于采摘空间为任意立方体,通用的关节型机械臂结构参数优化方法;并以温室环境下黄瓜采摘作业为例,应用 Matlab 优化工具箱对研制的四自由度关节型果蔬采摘机械臂进行了结构参数优化。

(3)为验证优化方法的合理性,对机械臂进行了运动规划试验,结果表明:机械臂能到达目标采摘区域的极限点和其他采摘点,在 x 、 y 、 z 方向上的最大误差分别为:4.3、5.6、6.8 mm,基本能满足温室环境下黄瓜采摘作业的要求,只是定位精度问题需要在以后的工作做进一步研究。

参 考 文 献

1 Van Henten E J, Hemming J, Van Tuijl B J A, et al. Collision-free motion planning for a cucumber picking robot[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(2):135~144.

2 Foglia M M, Reina G. Agricultural robot for radicchio harvesting[J]. Journal of Filed Robotics, 2006, 23(6):363~377.

3 Kondo N, Monta M. Basic study on chrysanthemum cutting sticking robot[C]//Proceedings of the International Symposium on Agricultural Mechanization and Automation, 1997, (1):93~98.

4 赵金英,张铁中,杨丽. 西红柿采摘机器人视觉系统的目标提取[J]. 农业机械学报, 2006,37(10):200~203.

5 郭峰,曹其新,崔永杰,等. 用于草莓收获机器人的果实定位和果柄检测方法[J]. 农业工程学报,2008,24(10):89~94.

Guo Feng, Cao Qixin, Cui Yongjie, et al. Fruit location and stem detection method for strawberry harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(10):89~94. (in Chinese)

6 宋健. 茄子采摘机器人结构参数的优化设计与仿真[J]. 机械设计与制造, 2008,6(6):166~168.

Song Jian. Optimization design and simulation on structure parameter of eggplant picking robot[J]. Machinery Design and Manufacture, 2008, 6(6):166~168. (in Chinese)

7 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. Optmal design of the major linkage parameters of articulated robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Asronautics, 1996,22(4):509~512. (in Chinese)

8 赵才军. 机器人工作空间及关节运动可靠性规划[D]. 南京:南京理工大学,2003.

9 龚水明,詹小刚. 基于 MATLAB 优化工具的机械优化设计[J]. 机械工程师,2008(10):92~94.

Gong Shuiming, Zhan Xiaogang. Mechanical optimal design based on MATLAB optimization toolbox[J]. Mechanical Engineer, 2008(10):92~94. (in Chinese)

10 Magrab E B, Azarm S, Balachandran B, et al. An engineer's guide to MATLAB: with applications from mechanical, aerospace, electrical, and civil engineering[M]. Pearson Prentice Hall, 2005.

11 Zhang Libin, Wang Yan, Yang Qinghua, et al. Kinematics and trajectory planning of a cucumber harvesting robot manipulator[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2009, 2(1):1~7.

12 崔玉洁,张祖立,范磊. 基于蒙特卡洛方法的采摘机械手工作空间分析[J]. 农机化研究,2007(12):62~63.

Cui Yujie, Zhang Zuli, Fan Lei. Working space analysis of picking manipulator based on MONTE-CARIO method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007(12):62~63. (in Chinese)