

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.003

# 多末端苹果采摘机器人机械手运动学分析与试验

李国利<sup>1,2</sup> 姬长英<sup>1</sup> 顾宝兴<sup>1</sup> 徐伟悦<sup>1</sup> 董芒<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 金陵科技学院机电工程学院, 南京 211169)

**摘要:** 提出了一种多末端采摘机器人机械手结构方案, 设计了机械臂、末端执行器及其控制系统。机器人机械臂采用主从两级结构, 从臂前端可挂接多个末端执行器。末端执行器能进行果实连续采摘, 其结构紧凑、驱动简单、通用性好, 可适用于苹果、柑橘、梨等球形水果的自动化收获。针对设计的采摘机械手具有多末端的特点, 提出了果树分区采摘作业策略, 一个采摘区内各个末端执行器同时连续采摘、果实集中回收。在此基础上建立了机器人机械手运动学模型, 采用 D-H 法推导了运动学方程, 运用 Matlab Robotics Toolbox 进行了运动学仿真验证。制作了机械手物理样机并在实验室环境下进行了机械手运动学及采摘试验, 结果表明, 机械手各从臂末端位置误差小于 9 mm, 采摘成功率为 82.14%。

**关键词:** 采摘机器人; 机械手; 主从结构; 末端执行器; 运动学分析

**中图分类号:** TP242.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0014-08

## Kinematics Analysis and Experiment of Apple Harvesting Robot Manipulator with Multiple End-effectors

Li Guoli<sup>1,2</sup> Ji Changying<sup>1</sup> Gu Baoxing<sup>1</sup> Xu Weiyue<sup>1</sup> Dong Mang<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

(2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low picking efficiency of single end-effector apple harvesting robot, a structure scheme of multiple end-effectors manipulator was proposed. The mechanical arm, end-effector and manipulator control system were designed. Master-slave two-grade structure was used in the mechanical arm, the multiple end-effectors were linked to forepart of the robot slave mechanical arm, and could operate continuously and simultaneously. The end-effector of the robot had advantages of compact structure and simple drive, which could absorb position error of mechanical arm, and it was universal and suitable for apple, citrus, pears and other spherical fruits picking. According to the characteristics of manipulator with multiple end-effectors, a partitioned fruit tree picking operation strategy was formulated, all the end-effectors picked the target fruits of a picking partition continuously and simultaneously, and the fruits were centrally collected. On this basis, the kinematics mode for robot manipulator was established, the kinematics equations were derived based on the D-H method. The kinematics simulation of the manipulator was conducted using Matlab Robotics Toolbox, the simulation results showed that the kinematics analysis was entirely correct. Based on these, the manipulator physical prototype was manufactured, and the manipulator kinematics and end-effectors picking experiments were carried out under laboratory environment. The results showed that the picking operation strategy was reasonable and feasible, the position error of manipulator end was less than 9 mm, and the picking success rate could reach 82.14%.

**Key words:** harvesting robot; manipulator; master-slave structure; end-effector; kinematics analysis

收稿日期: 2016-04-26 修回日期: 2016-06-08

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2006AA10Z259)、江苏省自然科学基金项目(BK20140720)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(KYZ201325)

**作者简介:** 李国利(1973—),男,博士生,金陵科技学院副教授,主要从事农业机器人和智能化检测技术研究, E-mail: qdliguoli@126.com

**通信作者:** 姬长英(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事智能化农业装备和土壤-机器系统研究, E-mail: chyji@njau.edu.cn

## 引言

据统计,2014 年我国苹果产量达到 4 092 万 t,居世界首位。目前,国内苹果的采摘作业基本上采用手工方式。在水果生产作业中,采摘作业是最耗时、最费力的环节,约占整个生产过程作业量的 40%,其费用占成本的 50%~70%。随着社会人口老龄化和农业劳动力的减少,农业生产成本也相应提高,因此研究开发水果采摘机器人具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

从 20 世纪 80 年代中期开始,国内外学者在果蔬采摘机器人及末端执行器的研究上做了大量的工作,试验成功了多种采摘机器人,如柑橘、草莓、茄子、番茄和黄瓜采摘机器人等<sup>[3-14]</sup>。法国、韩国、比利时、中国等相继开展了苹果采摘机器人的研究,有的还试制了样机<sup>[15-20]</sup>。目前,苹果采摘机器人远未达到实用化水平,其机械手的结构、作业方法及控制方式等较为复杂,机械手大都采用单末端执行器结构,机械臂的一个作业周期仅能完成一个果实采摘,果实的平均采摘周期较长。本文采用主从两级结构设计一种多末端执行器采摘机械手,提出果树分区采摘的多末端执行器同时作业策略,建立机械手运动学模型并进行机械手运动学及采摘试验,对一个采摘区内所有目标果实进行连续采摘、集中回收。

## 1 机械手结构设计

### 1.1 机械臂结构设计

随着农业科技的发展,果树栽培模式逐渐向矮化密植方向发展。为了便于生产管理,提高果品质量,在矮化密植的基础上,很多果农注重果树树冠的修剪,使树冠由高变矮、由大变、由圆变扁,有的还将果树修剪成平面篱笆状。在这种栽培模式情况下,果实遮挡情况大大减少,为采摘机器人收获作业提供了便利条件。

本文所设计的机械手其机械臂前端挂接 3 个末端执行器。机械臂采用主从两级结构,主臂前端通过端架安装 3 个从臂,从臂末端安装末端执行器。此结构要求主臂前端必须有较大的载量,同时还要有较高的运动精度,以免各从臂出现较大的积累误差。机械臂的结构形式主要有直角坐标结构、圆柱坐标结构、极坐标结构和关节型结构等。根据矮化苹果树的生长及修剪状况,结合各种坐标结构机械臂的工作空间特点,从承重和运动精度等方面考虑,主臂采用圆柱坐标结构,如图 1 所示,垂直关节采用滚珠丝杆传动方式,水平关节采用齿轮齿条传动方式。根据苹果生长位姿特点,从臂采用另一种形式的圆柱坐标结构,面对果树

在端架上自左至右分别安装左、中、右从臂。采摘作业时,主臂 3 个关节运动并带动端架上的各个从臂运动,各从臂关节运动将对应末端执行器送到指定采摘位置。

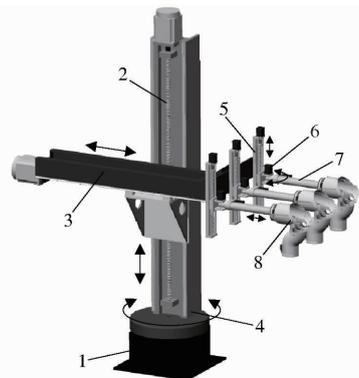


图 1 苹果采摘机器人机械手

Fig. 1 Manipulator of apple harvesting robot

1. 底座 2. 主臂垂直关节 3. 主臂水平关节 4. 主臂旋转关节
5. 从臂垂直关节 6. 从臂旋转关节 7. 从臂伸缩关节 8. 末端执行器

矮化苹果果园的果树行距一般为 3.0~4.0 m,果树高为 2.5~3.0 m,约 90% 以上的果实高度低于 2.8 m,冠幅为 2.0~2.5 m,枝下高为 0.8~1.0 m。结合采摘对象矮化苹果树的生长状况确定采摘机械手目标水平工作空间为 0~2.5 m,垂直工作空间为 0.8~2.9 m,果实分布深度范围为 0~400 mm。根据目标工作空间确定机械手各关节行程范围。果园采摘环境下,机械手安装在移动平台上,设机械手底座距地面高度为 380 mm,当从臂垂直关节行程范围为 -300~300 mm 时,则主臂垂直关节的行程范围为 0~1 500 mm,如图 2a 所示,图中 A、B 分别为主臂垂直关节上下极限位置。图 2b 为目标采摘范围俯视图,设主臂垂直关节距果树距离为 1 000 mm,当主臂旋转关节旋转角  $\theta$  范围为  $\pm 51.34^\circ$  时,子臂末端可达到水平宽 2 500 mm 的目标区域,且各角度截面内子臂末端深度可达 0~400 mm 的运动范围,主

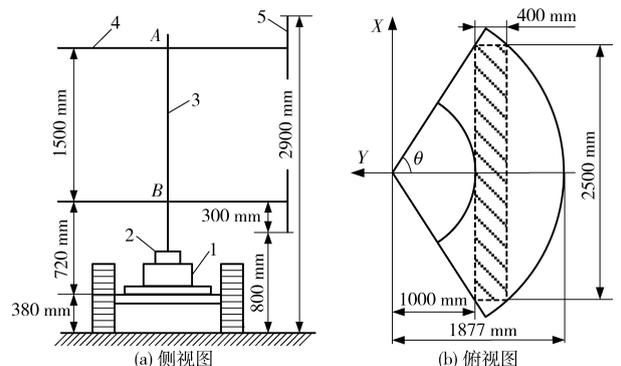


图 2 机械手采摘范围

Fig. 2 Working area of manipulator

1. 底座 2. 主臂旋转关节 3. 主臂垂直关节 4. 主臂水平关节
5. 从臂垂直关节

臂水平关节与从臂伸缩关节总长须大于 1 877 mm, 取 2 000 mm。3 个从臂在端架上的横向间隔距离设计为 350 mm。

## 1.2 末端执行器结构设计

本文设计的末端执行器主要作业对象为苹果, 同时考虑适用柑橘和梨等冠状树上的球形或类球形水果。此类作业对象在重力作用下, 其果梗大多位于果实上方且与水平线呈锐角姿态。设计的末端执行器结构如图 3 所示, 该末端执行器由接果器、齿状拢果器、位置传感器、刀片、步进电动机、同步带轮、同步带、从动带轮和收果筒等组成。采摘作业时, 从臂运动带动接果器到达目标果实, 当位置传感器检测到果实完全进入接果器时, 刀片在步进电动机 I 作用下旋转, 同时齿状拢果器旋转将果实进一步赶入接果器并接住果梗。刀片和齿状拢果器咬合切断果梗, 果实落入收果筒暂时存放。步进电动机 II 旋转控制收果筒旋转底盖开合实现果实的集中回收。

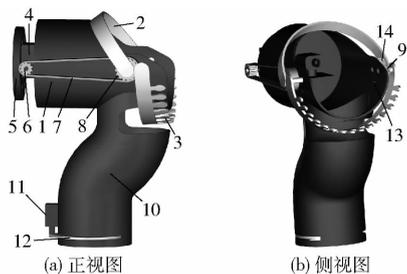


图 3 末端执行器结构图

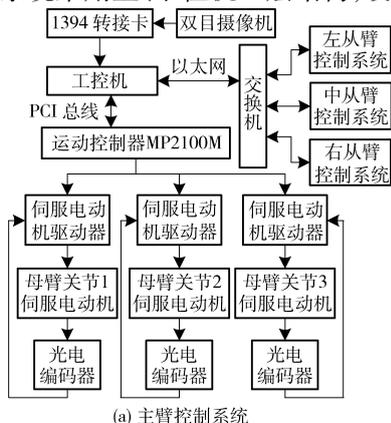
Fig. 3 Structure diagrams of end-effector of apple harvesting robot

1. 接果器 2. 刀片 3. 齿状拢果器 4. 步进电动机 I 5. 法兰
6. 同步带轮 7. 同步带 8. 从动带轮 9. 拢果器齿轮 10. 收果筒
11. 步进电动机 II 12. 收果筒旋转底盖 13. 位置传感器
14. 刀片齿轮

## 2 机械手控制系统设计

### 2.1 控制系统硬件设计

机械手控制系统采用上、下位机 2 层结构, 硬件



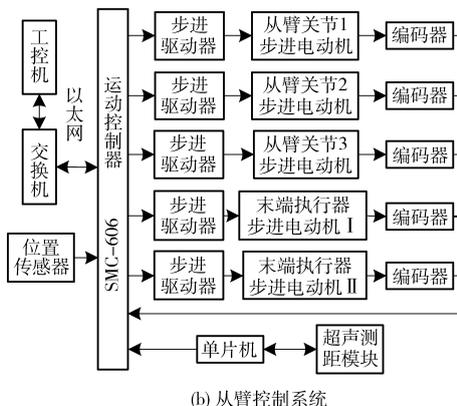
(a) 主臂控制系统

结构框图如图 4 所示。上位机采用研华 IPC-6606BP 工控机。双目视觉采用 Point Grey Research 公司 Bumblebee2 型双目摄像机, 其焦距为 3.8 mm, 基线长 120 mm。双目摄像机通过 IEEE-1394 转接卡与工控机进行数据传输。下位机包括主臂控制器和从臂控制器。主臂控制器采用安川运动控制器 MP2100M, 该控制器插在工控机 PCI 插槽中, 通过 MECHATROLINK-II 总线连接主臂 3 个关节伺服电动机驱动器。主臂 3 个关节驱动电动机选用安川交流伺服电动机。水平关节选用 0.75 kW 伺服电动机通过行星减速机带动齿轮齿条运动, 减速机减速比为 1:8; 垂直关节选用 1.3 kW 伺服电动机通过同步带轮带动滚珠丝杆运行; 旋转关节采用 1.3 kW 伺服电动机通过 RV 减速机带动整个机械本体旋转, 减速机减速比为 1:81。

从臂控制器选用雷赛公司的 SMC-606 运动控制器。上位机通过以太网与 SMC-606 运动控制器进行通信, 工控机 Ethernet 接口首先接入网络交换机, 通过网络交换机与 3 块 SMC-606 的 Ethernet 接口连接, 并与从臂各关节驱动电机构成多轴步进电动机运动控制系统。由于以太网的高速传输特性, 使得工控机与从臂控制器之间信号传输的实时性大大提高。

### 2.2 采摘作业策略

机械手采摘采用分区作业方式。根据树冠和机械手从臂工作空间, 将果树一侧分为若干个采摘区, 每个采摘区采集一幅果实图像。主臂运动到达某一采摘区, 由各从臂完成该区所有目标果实的集中采摘, 然后进行果实集中回收。为防止各区交界处果实漏摘, 相邻区之间留有重叠区域。对于重叠区域的果实, 若第一次被成功采摘, 则这部分果实就不会出现在下一幅相邻果树图像中; 若这些果实第一次未被采摘, 则它们会再次出现在下一幅相邻果树图像中, 系统会对它们进行补摘。每个采摘区对应一



(b) 从臂控制系统

图 4 机械手控制系统结构框图

Fig. 4 Block diagrams of control system for manipulator

个果实采摘点,果实采摘点为采摘作业时主臂水平关节末端位置。果实采摘点位置的确定采用“最短路径”和“主臂多动、从臂少动”的原则,即在满足各从臂能够采摘所属目标果实的前提下,各从臂运动量最小、主臂运动量最大。

采摘作业时,由双目视觉采集某一采摘区果树图像并传送给上位机处理,获取该区内所有目标果实的空间坐标。视觉系统采集图像尺寸设定为 640 像素 × 480 像素,如图 5a 所示。采取基于色差  $R-G$  的 Otsu 自动阈值方法进行图像分割,分割效果如图 5b 所示。分割后的图像通常存在小孔洞、孤立的点和毛刺,需要对分割后的图像进行消噪处理。处理过程为:首先选用  $3 \times 3$  正方形结构元素对分割后的图像进行 2 次腐蚀运算,从而消除颗粒噪声。然后再用区域标记去除像素面积小于最大像素面积  $1/5$  的噪声点,去除较大的孔洞噪声。接着选用  $3 \times 3$  正方形结构元素对图像进行 2 次膨胀运算,将与目标接触的所有背景点合并到该目标中,同时消除目标区域内孔洞。图 5c 为形态学运算后图像。最后求取图像果实区域的二维质心坐标,如图 5d 所示。系统采用双目视觉的视差进行果实定位<sup>[17,21-22]</sup>,果实的立体匹配采用摄像机处理函数库自带的匹配算法。获得采摘区内各目标果实的空间坐标后,机械手采摘控制流程如下:①上位机计算、确定采摘点坐标,划分各末端执行器采摘果实任务。②主臂运动至该采摘区果实采摘点。③上位机结合各末端执行器采摘任务果实坐标,进行各从臂采摘

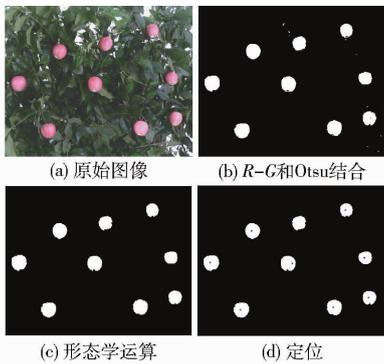


图 5 果实图像识别

Fig. 5 Recognition of fruit images

路径规划,巡回向各从臂控制器发送运动参数和运动指令,并等待各从臂控制器返回作业完成信号。④从臂控制器接收上位机运动参数与运动指令后,控制从臂运动并带动末端执行器进行该区内所有任务果实连续采摘。⑤采摘区内的目标果实采摘完毕后,从臂返回初始位置,主臂运动并带动从臂及末端执行器到达果实回收位置进行果实集中回收,从而完成一次采摘。

### 3 机械手运动学分析

#### 3.1 坐标系及结构参数

采用 D-H 法建立苹果采摘机器人机械手运动学方程。机械手坐标系如图 6 所示,其中坐标系  $\{0\}$  为基坐标系。机械手各连杆参数如表 1 所示。

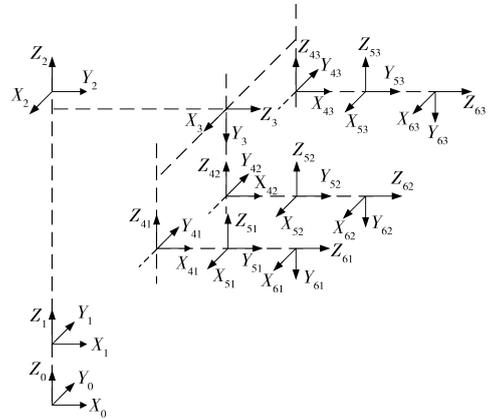


图 6 机器人机械臂 D-H 坐标系

Fig. 6 D-H coordinate of robot manipulator

#### 3.2 运动学方程

机器人机械手 D-H 参数下相邻连杆的变换矩阵 ${}^{i-1}T_i$ 的通式为

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i \sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据前面所述机械手采摘作业策略,结合表 1 和式(1),得到

表 1 机械手连杆参数

Tab. 1 Kinematics parameters of manipulator

连杆 $i$	$\theta_i/\text{rad}$	$d_i/\text{mm}$	$a_{i-1}/\text{mm}$	$\alpha_i/\text{rad}$	关节变量范围
1	$\theta_1$	290	0	0	$-\pi \sim 0$
2	$-\pi/2$	$d_2$	0	0	720 ~ 2 220 mm
3	0	$d_3$	$a_2(155)$	$-\pi/2$	265 ~ 1 080 mm
4	$-\pi/2$	$d_4$	$a_3(0, -350, 350)$	$\pi/2$	0 ~ 600 mm
5	$\theta_5(-\pi/2)$	0	$a_4(52)$	0	$-0.383\ 78 \sim 0.383\ 78$ rad
6	0	$d_6$	0	$-\pi/2$	468 ~ 868 mm

$${}^0_3\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T}_2 {}^2_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & d_3\cos\theta_1 + a_2\sin\theta_1 \\ -\cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & d_3\sin\theta_1 - a_2\cos\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & 290 + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于

$${}^3_6\mathbf{T} = {}^3_4\mathbf{T}_5 {}^5_6\mathbf{T} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_5 & 0 & -\cos\theta_5 & a_3 - d_6\cos\theta_5 \\ 0 & 1 & 0 & -d_4 \\ \cos\theta_5 & 0 & -\sin\theta_5 & -d_6\sin\theta_5 + a_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

得

$${}^0_6\mathbf{T} = {}^0_3\mathbf{T}_3 {}^3_6\mathbf{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} n_x &= \cos(\theta_1 + \theta_5) & n_y &= \sin(\theta_1 + \theta_5) \\ a_x &= -\sin(\theta_1 + \theta_5) & a_y &= \cos(\theta_1 + \theta_5) \\ o_z &= 1 & n_z &= o_x = o_y = a_z = 0 \\ p_x &= -d_6\sin(\theta_1 + \theta_5) + (a_4 + d_3)\cos\theta_1 + (a_2 + a_3)\sin\theta_1 \\ p_y &= d_6\cos(\theta_1 + \theta_5) + (a_4 + d_3)\sin\theta_1 - (a_2 + a_3)\cos\theta_1 \\ p_z &= d_4 + d_2 + 290 \end{aligned}$$

设坐标系{3}原点相对于坐标系{0}的坐标为 $(x, y, z)$ , 则

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \arccos \frac{a_2}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ d_2 = z - 290 \\ d_3 = \sqrt{x^2 + y^2 - a_2^2} \end{cases} \quad (5)$$

当坐标系{6}的原点相对于坐标系{0}的坐标为 $(l, m, n)$ 时, 有

$$\begin{cases} \theta_5 = -\theta_1 - \arctan \frac{l - (a_4 + d_3)\cos\theta_1 - (a_2 + a_3)\sin\theta_1}{m - (a_4 + d_3)\sin\theta_1 + (a_2 + a_3)\cos\theta_1} \\ d_4 = n - z \\ d_6 = \left\{ [l - (a_4 + d_3)\cos\theta_1 - (a_2 + a_3)\sin\theta_1]^2 + [m - (a_4 + d_3)\sin\theta_1 + (a_2 + a_3)\cos\theta_1]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (6)$$

其中 $d_3$ 、 $\theta_1$ 和 $d_2$ 由式(5)求得。左、中、右从臂关节变量计算时, $a_3$ 分别为 $-350, 0, 350$  mm。

### 3.3 采摘点坐标确定

设一幅果树图像内4个极限果实在基坐标系下的坐标分别为 $Z$ 坐标最小果实 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 、在基坐标系 $XOY$ 平面投影距离原点最近果实 $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$ 、图像左边界果实 $P_3(X_3, Y_3, Z_3)$ 和图像右边界果实 $P_4(X_4, Y_4, Z_4)$ , 则

$$\begin{cases} Z_1 = \min \{ Z_i \} \\ \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} = \min \{ \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \} \\ \arctan(X_3/Y_3) = \max \{ \arctan(X_i/Y_i) \} \\ \arctan(X_4/Y_4) = \min \{ \arctan(X_i/Y_i) \} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ 为基坐标系下各果实坐标, $i=1, 2, \dots, N$ 。根据前述“最短路径”和“主臂多动、从臂少动”原则, 则主臂到达采摘点应满足以下要求: ①从臂垂直关节在最下端便可采摘 $P_1$ 。②从臂伸缩关节在初始状态便可采摘 $P_2$ 。③左从臂和右从臂旋转关节以最小运动量可分别采摘 $P_3$ 和 $P_4$ 。设采摘点坐标为 $P_z(X_z, Y_z, Z_z)$ , 根据要求①, 则

$$Z_z = Z_1 + 0.5h \quad (8)$$

式中  $h$ ——从臂垂直关节行程

根据要求②, 则

$$r_z = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} - (a_4 + l_0) \quad (9)$$

式中  $r_z$ ——主臂位于采摘点时水平关节长度

$l_0$ ——从臂水平关节初始长度

画出 $P_3$ 和 $P_4$ 在基坐标系 $XOY$ 平面的投影分别为 $P'_3$ 和 $P'_4$ , 如图7所示, 图中 $k_0$ 为相邻从臂垂直关节间距, 则

$$\begin{cases} \beta = \arctan(X_4/|Y_4|) + \arcsin(k_0/\sqrt{X_4^2 + Y_4^2}) \\ \gamma = \arctan(|Y_3|/X_3) + \arcsin(k_0/\sqrt{X_3^2 + Y_3^2}) \end{cases} \quad (10)$$

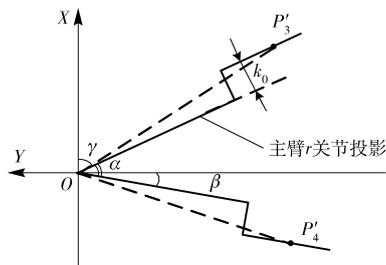


图7 边界果实在 $XOY$ 平面投影

Fig.7 Projection map of boundary fruit in  $XOY$  plane

为满足要求③, 兼顾左从臂和右从臂分别采摘 $P_3$ 和 $P_4$ , 则位于采摘点时主臂水平关节在基坐标系 $XOY$ 平面的投影与 $Y$ 轴夹角为

$$\theta_2 = -[\gamma + 0.5(\pi/2 - \beta - \gamma)] = (\beta - \gamma)/2 - \pi/4 \quad (11)$$

所以

$$\begin{cases} X_z = r_z \cos\theta_2 \\ Y_z = r_z \sin\theta_2 \\ Z_z = Z_1 + 0.5h \end{cases} \quad (12)$$

## 4 机械手运动学仿真

### 4.1 工作空间仿真

采用蒙特卡洛法<sup>[23-24]</sup>, 根据机械手正向运动学分析得到3个从臂末端在基坐标系下的坐标方程,

结合表 1 给出的各关节变量范围,运用 Matlab 软件编程对机械手末端轨迹进行解算与仿真,得到机械手工作空间如图 8 所示。可见,在  $Z$  方向 400 ~

2 600 mm、 $X$  方向 -1 500 ~ 1 500 mm、 $Y$  方向 -1 700 ~ -500 mm 范围内工作点密集,机械手能够满足矮化果园的一整棵果树采摘要求。

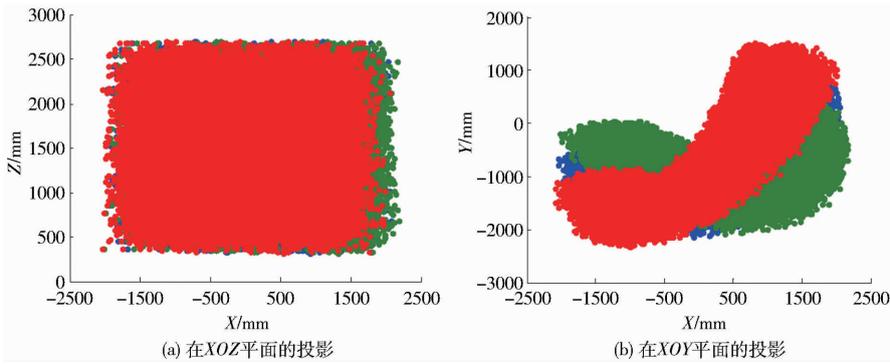


图 8 机械手工作空间

Fig. 8 Shapes of manipulator workspace

### 4.2 运动学仿真验证

运用 Matlab Robotics Toolbox<sup>[25]</sup>,根据表 1 中的 D-H 参数构建机械手运动学模型进行运动学仿真验证。设机械手主臂末端初始坐标为  $P_0(265, -155, 720)$ ,左、中、右从臂末端初始位置坐标分别为  $P_{10}(785, 145, 420)$ 、 $P_{20}(785, -155, 420)$ 、

$P_{30}(785, -455, 420)$ 。给出主臂采摘点坐标为  $P_z(-80, -660, 1220)$ ,左、中、右从臂末端目标位置坐标分别为  $P_l(420, -1400, 1000)$ 、 $P_m(96, -1450, 1280)$ 、 $P_r(-500, -1386, 1500)$ 。

图 9 为仿真得到主臂与从臂各关节运动位移曲线。根据运动学方程求得机械臂各关节位移如表 2

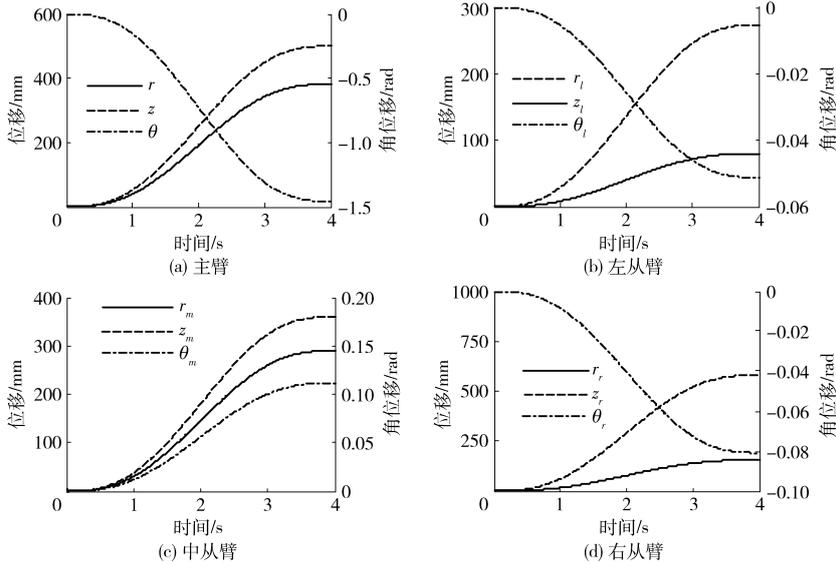


图 9 机械臂关节位移曲线

Fig. 9 Displacement curves of manipulator joints

表 2 机械手关节位移

Tab. 2 Displacement of manipulator joints

机械臂	关节位移
主臂( $\theta, z, r$ )/(rad, mm, mm)	(-1.456 1, 500, 381.509 9)
左从臂( $z_l, \theta_l, r_l$ )/(mm, rad, mm)	(80, -0.051 20, 273.328)
中从臂( $z_m, \theta_m, r_m$ )/(mm, rad, mm)	(360, 0.111 70, 289.670 9)
右从臂( $z_r, \theta_r, r_r$ )/(mm, rad, mm)	(580, -0.080 80, 155.204)

所示。对比表 2 与位移曲线可知,仿真得到机械手各关节位移量与表 2 基本一致,验证了所建立的运动学方程正确性。

## 5 机械手采摘试验与分析

### 5.1 运动学试验

本文设计、制作的多末端机械手样机如图 10a 所示。机械手末端的定位精度是决定果实采摘成功的关键因素,在采摘试验前进行了机械手主臂与各从臂末端定位精度测量试验。试验中首先用标线标出基坐标系的  $XOY$  平面,以主臂垂直轴线为  $Z$  轴,机械手主从臂末端初始坐标与 4.2 节一致。然后设定主臂采摘点坐标和左、中、右从臂末端目标位置坐

标,上位机根据运动学方程计算机械臂各关节位移量并通过控制系统驱动各关节运动,使主臂末端到达采摘点、各从臂末端到达各自目标位置,用激光测距仪分别测量主从臂末端在基座坐标系下的三维坐标值。然后给出下一组主臂采摘点坐标和各从臂末端目标位置坐标进行下一次测量。机械臂的位置误差为  $D = \sqrt{(X' - X)^2 + (Y' - Y)^2 + (Z' - Z)^2}$ , 其中  $P(X, Y, Z)$  为设定值,  $P'(X', Y', Z')$  为测量值。进行了 8 次测量试验,得机械手末端位置误差如表 3 所示,从表中可以看出各从臂末端的位置误差小于 9 mm,可以通过提高机械手零部件的加工与装配精度及优化控制算法等来减小误差。

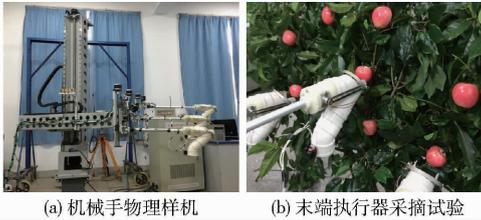


图 10 机械手采摘试验

Fig. 10 Picking experiment photos of manipulator

表 3 机械手位置误差

Tab. 3 Position error of robot manipulator mm

机械臂	最小绝对误差	最大绝对误差
主臂	3.0	5.9
左从臂	6.6	8.4
中从臂	6.4	8.2
右从臂	6.9	8.5

## 5.2 采摘试验

采摘试验在实验室环境下进行,作业对象为仿真苹果树,如图 10b 所示。试验所用红色仿真苹果直径为 60 mm 左右,所设计的末端执行器接果器直径为 70 mm,末端执行器可吸收近 10 mm 位置误差。将双目摄像机安装于主臂水平关节的支架上,根据从臂在一个采摘区的作业空间和摄像机参数,调整摄像机与目标果树的深度距离,使一幅果树图像内所有目标果实能处于一个采摘区内。

按照前述采摘作业策略进行采摘试验,为避免从臂同时采摘各自分区边界果实引发从臂之间干涉,一方面各从臂采取不同的果实采摘顺序,中从臂按照果实空间  $Z$  坐标由大到小进行采摘,左、右从臂按照果实空间  $Z$  坐标由小到大进行采摘。另外,在左右从臂水平关节前端指向中从臂水平安装超声测距模块<sup>[26]</sup>,超声测距控制系统如图 4b 所示,单片机控制超声测距模块进行距离测量,当检测到中从臂进入距离警戒值时,单片机发送警报信息给从臂运动控制器,控制左、右从臂暂停采摘,待中从臂完

成边界果实采摘并超出距离警戒值后,左、右从臂再继续采摘。

采摘试验进行了 8 次,每次采集一幅果树图像,并进行一次果实识别、定位、采摘与回收,系统成功识别、定位目标果实 56 个,成功回收果实 46 个,采摘成功率为 82.14%。试验中采摘失败主要原因是,3 个末端执行器同时进行采摘作业,但它们并非同时到达各自目标果实位置,当一末端执行器首先采摘所属目标果实时,挤压或碰撞果树枝叶引发其他果实严重偏离原来位置,使得稍后到达所属目标果实位置的末端执行器不能捕获目标果实。另外,试验中目标果实在果树上的分布没有成簇的情况,设计的末端执行器不适合成簇果实采摘。

## 6 讨论

以设计的三末端采摘机械手为研究对象,提出果树分区采摘作业策略,进行了机械手运动学分析,旨在建立多末端采摘机械手基础模型,所设定的机械手作业环境为果实静止且无枝叶遮挡的理想化环境。在该环境条件下,只要机械手末端位置误差满足要求,便能够实施采摘作业。为实施采摘作业策略、验证模型的正确性,制作物理样机进行了机械手运动学与采摘作业试验。在理想化实验室环境下,取得了较好的试验结果。采摘试验中末端执行器与果树枝叶发生挤压或碰撞是采摘失败的主要原因。

## 7 结论

(1)设计了一种多末端苹果采摘机器人机械手,包括机械臂与末端执行器。所设计的机械臂分为主臂和从臂两级结构,主臂前端挂接多个从臂,每个从臂能驱动对应末端执行器进行苹果采摘,实现多个末端执行器同时、连续收获作业。所设计的末端执行器结构紧凑、驱动简单,能吸收机械臂位置误差,通用性好,能满足苹果、柑橘、梨等球形水果的自动化收获。

(2)提出了果树分区采摘的多末端执行器同时作业策略,实现一个采摘区内所有目标果实的连续采摘、集中回收。在此基础上进行了机器人机械手运动学分析,推导了运动学方程。在 Matlab 软件环境下运用蒙特卡洛法计算的工作空间表明:所设计的机械手能够满足一整棵果树果实采摘要求。借助 Robotics Toolbox 建立机械手运动学模型进行了运动学仿真,验证了运动学方程的正确性。

(3)采用上、下位机 2 层结构设计了机械手控制系统,制作了机械手物理样机,并进行了机械手运动学与采摘试验,试验结果表明:机械手各从臂末端

的位置误差小于 9 mm。所设计的末端执行器能够 摘试验,采摘成功率为 82.14%。  
吸收小于 10 mm 的误差,在实验室环境下进行了采

## 参 考 文 献

- 1 宋健,张铁中,徐丽明,等. 果蔬采摘机器人研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2006,37(5):158-162.  
SONG Jian, ZHANG Tiezhong, XU Liming, et al. Research actuality and prospect of picking robot for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(5):158-162. (in Chinese)
- 2 项荣,应义斌,蒋焕煜. 田间环境下果蔬采摘快速识别与定位方法研究进展[J]. 农业机械学报,2013,44(11):208-223.  
XIANG Rong, YING Yibin, JIANG Huanyu. Development of real-time recognition and localization methods for fruits and vegetables in field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(11):208-223. (in Chinese)
- 3 HARRELL R C, SLAUGHTER D C, ADIST P D. A fruit-tracking system for robotic harvesting [J]. Machine Vision and Application, 1989, 2(2): 69-80.
- 4 SEIICHI Aiima, NAOSHI Kondo, MITSUJI Monta. Strawberry harvesting robot on table-top culture [C] // ASAE/CSAE Annual International Meeting, 2004:1-8.
- 5 SHIGEHICO Hayashi, TOMOHIKO Ota, KOTARO Kubota, et al. Robotic harvesting technology for fruit vegetables in protected horticultural production [C] // FRUTIC 05, Information and Technology for Sustainable Fruit and Vegetable Production, 2005:227-236.
- 6 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)
- 7 MUSCATO G, PRESTIFILIPPO M, ABBATE Nunzio, et al. A prototype of an orange picking robot past history, the new robot and experimental results [J]. Industrial Robot: an International Journal, 2005, 32(2): 128-138.
- 8 NAOSHI Kondo, KOKI Yata, MICHIIHISA Iida, et al. Development of an end-effector for a tomato cluster harvesting robot [J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2010, 3(1): 20-24.
- 9 傅隆生,张发年,槐岛芳德,等. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(3):1-8.  
FU Longsheng, ZHANG Fanian, GEJIMA Yoshinori, et al. Development and experiment of end-effector for kiwifruit harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(3):1-8. (in Chinese)
- 10 VAN HENTENA E J, VAN'T SLOT D A, HOLD C W J, et al. Optimal manipulator design for a cucumber harvesting robot [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(2): 247-257.
- 11 KANAE Tanigaki, TATESHI Fujiura, AKIRA Akase, et al. Cherry-harvesting robot [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(1): 65-72.
- 12 SHIGEHICO Hayashi, KENTA Shigematsu, SATOSHI Yamamoto, et al. Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test [J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 160-171.
- 13 宋健,孙学岩,张铁中,等. 开放式茄子采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(1):143-147.  
SONG Jian, SUN Xueyan, ZHANG Tiezhong, et al. Design and experiment of opening picking robot for eggplant [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 143-147. (in Chinese)
- 14 PETER P Ling, REZA Ehsani, TING K C, et al. Sensing and end-effector for a robotic tomato harvester [C] // 2004 ASAE Annual International Meeting, ASAE Paper 043088, 2004.
- 15 ZHAO Dean, LÜ Jidong, JI Wei, et al. Design and control of an apple harvesting robot [J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 112-122.
- 16 BAETEN J, DONNÉ K, BOEDRIJ S, et al. Autonomous fruit picking machine: a robotic apple harvester [C] // SICILIANO B, KHATIB O, GROEN F. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2007, 42: 531-539.
- 17 顾宝兴,姬长英,王海青,等. 智能移动水果采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(6):153-160.  
GU Baoxing, JI Changying, WANG Haiqing, et al. Design and experiment of intelligent mobile fruit picking robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(6):153-160. (in Chinese)
- 18 ACHMAD Irwan Setiawan, TOMONARI Furukawa, ADAM Preston. A low-cost gripper for an apple picking robot [C] // Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2004: 4448-4453.
- 19 马履中,杨文亮,王成军,等. 苹果采摘机器人末端执行器的结构设计与试验[J]. 农机化研究,2009(12):65-67.  
MA Lüzhong, YANG Wenliang, WANG Chengjun, et al. Structure design and experiment of the end-effector for apple-harvesting Robot [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(12): 65-67. (in Chinese)
- 20 BULANON D M, KATAOKA T. Fruit detection system and an end effector for robotic harvesting of Fuji apples [J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2010, 12(1): 203-210.
- 21 蔡健荣,李玉良,范军,等. 成熟柑橘的图像识别及空间定位研究[J]. 微计算机信息,2007,23(12):224-225,314.  
CAI Jianrong, LI Yuliang, FAN Jun, et al. Image recognition and three-dimensional location of mature oranges from nature scene [J]. Microcomputer Information, 2007, 23(12): 224-225, 314. (in Chinese)

- 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)