

# 枸杞采摘机器人双机械臂结构设计与分析<sup>①</sup>

刘小宽<sup>②\*\*\*</sup> 李斌\* 常健\* 张国伟\* 王聪\*

(\* 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016)

(\*\* 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 针对枸杞果实小、水分大、易破损的特点,并结合枸杞采摘的工作空间要求,以及枸杞采摘环境的复杂性,设计出了高效灵活的枸杞智能采摘机器人的双机械臂结构系统。运用 D-H 法建立了机器人坐标变换矩阵,对机器人运动学进行了分析,并提出一种反向建立 D-H 坐标系的间接求解算法来获得采摘机械臂的逆运动学解析解。通过运动学仿真验证了机器人结构设计的有效性,并对间接求逆运动学解析解算法的正确性进行了验证,计算时间比 Matlab 机器人工具箱的逆运动学算法减少了 40% 左右。

**关键词** 枸杞, 采摘机器人, 工作空间, 运动学分析

## 0 引言

枸杞作为宁夏地区的重要产业支柱,具有果实小、皮薄的特性,长期以来以手工采摘为主,使得在采摘季节需要引进大量的劳动力。虽然近些年来推出了振动式和梳理式的便携采摘机,可以携带在手上手持操作单元进行采摘。振动式采摘器根据振动杆对枝条的瞬间力,使得枸杞脱落,但会损坏枝条,影响后续生长,而且难以收集果实;梳理式采摘器根据旋转毛刷将枸杞摘下放入采摘器里,但需要人手提持,工作强度大<sup>[1]</sup>。因此研制一款可以完全代替人类工作的智能化采摘机具有重要的现实意义。通过研究发现,国内外的果蔬采摘机器人主要是面向西红柿、草莓、黄瓜、茄子、苹果、蘑菇等产品进行研究<sup>[2-7]</sup>,这些果实在采摘过程中易于抓取,可进行单个采摘,且随着采摘目标的不同,所采用的机械臂构型也不相同,包括关节型、平面关节型、直角坐标型等,甚至随着蛇形机械臂研究的进展<sup>[8]</sup>,蛇形臂也可用在果蔬采摘机器人上。而枸杞的果实太小,直径只有 1 cm,长度为 0.8 ~ 2 cm,不利于抓取,果实

属于浆果含水量大,皮薄容易破损,而且果实在枝条上连续生长,在抓取上难以实现,且存在效率低的问题。本文提出一种无人化枸杞采摘作业系统,首先根据枸杞采摘环境设计出一套机构装置,并进行了运动学分析,其次根据机构的特殊性提出一种反向建立 D-H 坐标系的逆运动学解法,最后通过仿真分析验证了方法的正确性。

## 1 机器人结构设计

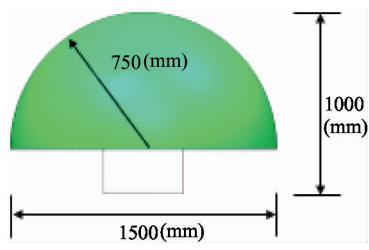
### 1.1 采摘机器人工作方式与目标要求分析

确定工作方式是设计采摘机器人的首要任务,面对不同采摘对象,因为生长环境和采摘方法的不同,工作方式也千差万别,这也是采摘机器人无法实现通用性的原因。人工在携带梳理式采摘器进行采摘时,左手将枝条末端提起,移动到适合采摘的位置,采摘器沿着枝条移动实现采摘任务。受此启发,本文设计的枸杞采摘机器人采用双机械臂构型,末端执行器分别为夹持工具和梳理式采摘器,夹持工具将枝条固定并拉动到适合采摘的空间,梳理式采

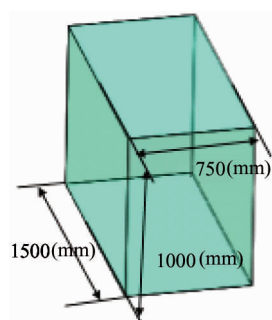
① 宁夏回族自治区重点研发计划重大科技(Y7L1220101)资助项目。

② 男,1991年生,硕士生;研究方向:机械臂结构设计;联系人,E-mail: liuxiaokuan@sia.cn (收稿日期:2018-05-31)

摘器作为使果实与果梗分离的执行工具。工作过程中依靠视觉系统,双机械臂以人类双手协同作业的方式将一定范围内的枸杞采摘完后,携带机械臂的载体小车再移动到下一采摘作业位置。枸杞树属于灌木植物,高度为0.5~1 m,其等效作业空间如图1所示,为1.5 m×1 m×0.75 m的长方体,采用机械臂安装在小车侧面的方式,而双机械臂基座水平装



(a) 简化枸杞树采摘环境



(b) 等效采摘空间区域

图1 枸杞树等效采摘空间

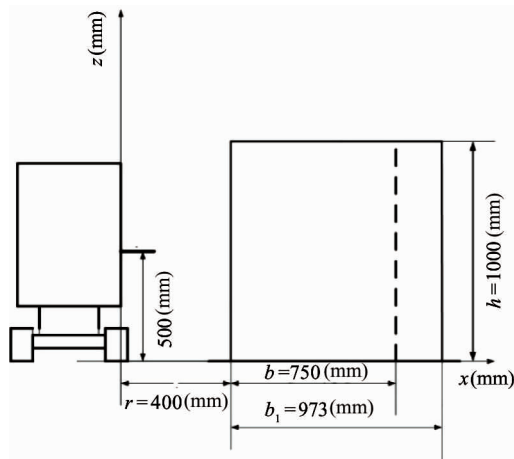


图2 中轴线等效采摘距离

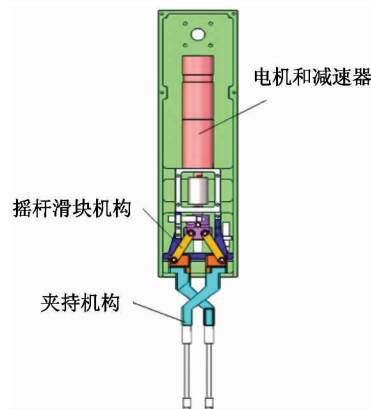


图3 夹持机械手

时,采摘两侧枝条机械臂靠近基座的位置会发生碰撞,减小作业面积,为了尽可能避免碰撞发生,基座采用竖直安装的方法,作业时夹持机械臂竖直夹持枝条,采摘机械臂从侧面伸入进行采摘的仿人动作。作业时小车离枸杞树距离为0.4 m,双机械臂基座的中心距离地面0.5 m,基座轴线距离为0.25 m,将枸杞树两侧最远处映射到对称轴处时,小车与采摘最远距离为1.37 m,从基座到最远的采摘点距离为1.5 m,如图2所示。

### 1.2 夹持机械臂的结构设计

机械臂设计基于要完成的任务以及完成任务的方式,夹持机械臂的功能是夹持挂果枝条末端,并拉扯到适合采摘的位置,因为枝条末端近似为圆柱体,夹持方位没有特殊要求,因此本文设计出滑块式夹持机械手,如图3所示。夹持机械手在夹持枝条时

只要确定位置即可,对姿态没有要求,需要3个确定位置的自由度,但在抓取过程中应避免夹持方向与枝条共面以至夹持失败的情况,因此在腕部加了弯曲的自由度,即夹持机械手的机械臂为4自由度,分别为腰关节、肩关节、肘关节和腕关节。根据已经得到的所需作业空间以及机械臂安装位置,运用 Bergamaschi 等人<sup>[9]</sup>提出的计算工作空间边界的方法,以工作空间为目标函数,结合机器人可操作度以及灵活性的问题<sup>[10]</sup>,优化了夹持手臂尺寸,其中从腰关节轴线到肩关节轴线距离为187 mm,肩关节轴线到肘关节轴线697 mm,肘关节到腕关节距离为569.5 mm,腕关节轴线到夹持机构工作点距离为320 mm。同时考虑到机械臂在工作模式下与非工作模式下的总体布置,以及关节的转动范围,设计了4自由度夹持机械臂,图4是枸杞采摘机器人夹持机械臂的结构图。

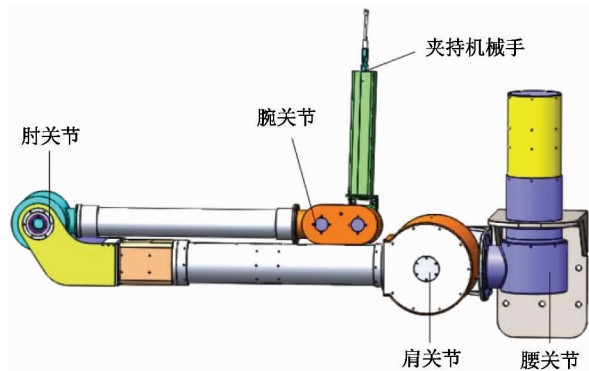


图4 夹持机械臂结构示意图

### 1.3 采摘机械臂的结构设计

采摘机械臂在采摘过程中的任务有3个:(1)机械臂携带梳理式采摘器从预设位置接近枝条采摘位置,使得采摘器凹槽包裹住枝条。(2)使采摘器沿着枝条方向执行采摘作业。(3)采摘作业结束后,采摘器下降,使凹槽脱离枝条,机械臂回到预设位置。

在作业过程中,采摘机械臂是从侧面伸入,如同人手臂作业方式,枸杞树冠近似半球形状,为了避免机械臂本体与枝条碰撞的情况发生,对枸杞果实和枝条造成伤害,影响后续生长,选用4自由度确定位置的方法来实现避障要求。而在采摘器对枸杞进行采摘时,基坐标系和工具坐标系的建立如图5所示。为了可以平滑地沿着枝条方向前进,即 $x'$ 与 $x$ 轴同向,需要绕 $z$ 轴旋转的自由度;挂果枝条的生长没有规律,枝条错综复杂,而为了能拉扯到理想空间进行采摘,拉扯的方向具有随机性,因此当 $z'$ 轴与 $z$ 轴不平行时,需要绕 $y$ 轴旋转的自由度来满足轴平行的要求;假设枸杞果实在重力的作用下沿着枝条垂直分布,无需绕 $x$ 轴方向的转动,但因为重力的原因,如果工作面倾斜过大,采摘器采摘后的枸杞会被

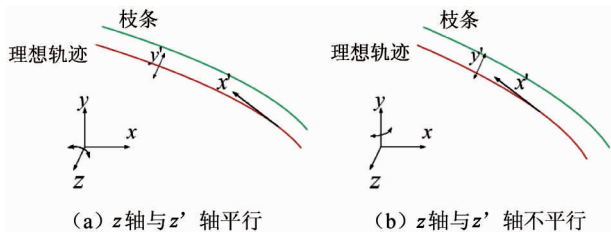


图5 末端姿态要求

旋转毛刷带动出来,导致果实掉落,如图6所示。综上所述,枸杞采摘机器人的采摘机械臂需要4个自

由度来确定位置,需要2个自由度调整姿态,并且保证采摘器工作面倾斜在 $45^\circ$ 范围内。

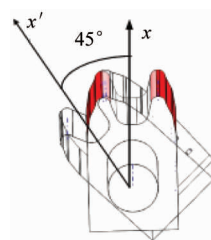


图6 采摘器最大倾斜角度

为了能在最少自由度条件下满足上述要求,本文从模拟人体手臂角度出发,设计采摘机械臂肩部为球关节,具有3个自由度;肘部为旋转关节,具有1个自由度;腕部为正交关节,具有2个自由度。根据已经得知所需工作空间和安装位置、自由度分配,采用与夹持机械臂同样的方法来确定了机械臂的尺寸,其中肩部3个关节轴线相交点距离肘关节轴线距离为837.5 mm,肘关节轴线与腕部正交关节轴线垂直,公垂线为620 mm,为了获得较大的关节范围,偏距为102 mm,腕点到采摘机工作点距离为200 mm,图7是采摘机械臂的结构示意图。

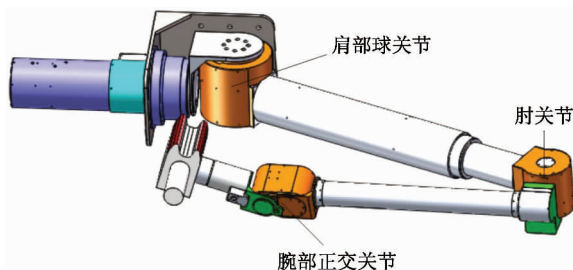


图7 采摘机械臂结构示意图

双机械臂总体参数如表1所示。图8为双机械臂在载体小车安装的结构示意图。

表1 双机械臂的结构参数

	自由度	大臂长度 (mm)	小臂长度 (mm)	小臂轴线到夹持作用点距离 (mm)	重量 (kg)
夹持机械臂	4	697	570	320	20.06
采摘机械臂	6	837.5	620	150	28.76

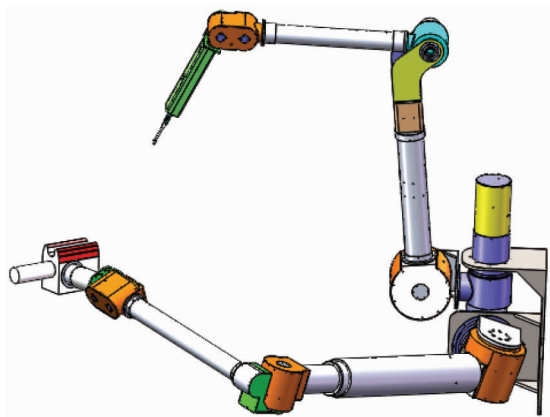


图8 枸杞采摘机器人双机械臂结构

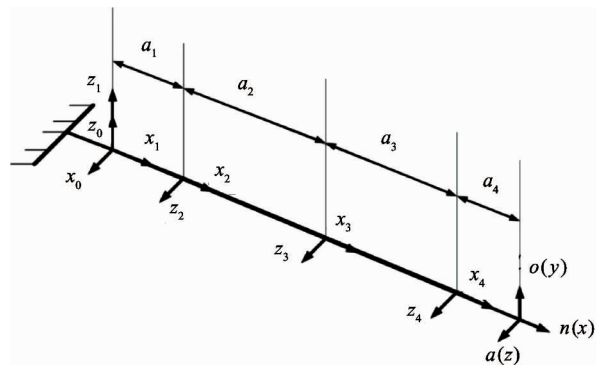


图9 夹持机械臂连杆坐标系

## 2 机器人运动学分析

枸杞采摘机器人是开链连杆式关节型机器人,两个机械臂均是由一系列通过关节连接起来的连杆组成,可以通过运用 Denavit-Hartenberg (D-H) 建模的方法,将关节处固连坐标系,通过齐次变换描述坐标系间相对位置和姿态,最终转换到基座与目标点之间的关系。

### 2.1 夹持机械臂的运动学分析

夹持机械臂为4自由度机械臂,简化后的连杆坐标系如图9所示。在进行运动学分析时,末端执行器的姿态与第4关节的姿态相同,假设腕点坐标为  $(x, y, z)$ , 则满足  $x + n_x \cdot a_4 = p_x$ ,  $y + n_y \cdot a_4 = p_y$ ,  $z + n_z \cdot a_4 = p_z$ 。目标点与腕点坐标转换比较简单,为了求解简单,本文把腕点坐标作为目标点,根据关节坐标系间的变换方法,求出相邻关节间的转换矩阵,并将转换矩阵依次相乘,求出基座与目标点

间的总转换矩阵,得出目标点的信息量。相邻关节的转换矩阵为

$${}_{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中  $c\theta_i = \cos\theta_i$ ,  $s\theta_i = \sin\theta_i$ 。

将式(1)代入  ${}^0T_4 = {}^0T_1 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T$ , 得到夹持机械臂的正向运动学表达式:

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{22} & r_{23} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

逆运动学是将末端执行器坐标系的笛卡尔空间到关节空间的逆变换,以求出每个关节的转角,若已知末端执行器的信息,将其变成第4关节的腕点信息,根据式(2)可以计算得到2组关节角度解析解:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan \frac{p_x}{p_y} \\ \theta_2 = \arctan \left[ \frac{p_z}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2} - 0.187} \right] - \arctan \left[ \frac{0.5695S_3}{0.697 + 0.5695C_3} \right] \\ \theta_3 = \left( \pi - \arccos \left\{ \frac{0.697^2 + 0.5695^2 - (\sqrt{p_x^2 + p_y^2} - 0.187)^2 - p_z^2}{2 \times 0.697 \times 0.5695} \right\} \right) \\ \theta_4 = \text{atan2}(n_z, o_z) - \theta_2 - \theta_3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan \frac{p_y}{p_x} \\ \theta_2 = \arctan \left[ \frac{p_z}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2} - 0.187} \right] + \arctan \left[ \frac{0.5695S_3}{0.697 + 0.5695C_3} \right] \\ \theta_3 = \left( \pi + \arccos \left\{ \frac{0.697^2 + 0.5695^2 - (\sqrt{p_x^2 + p_y^2} - 0.187)^2 - p_z^2}{2 \times 0.697 \times 0.5695} \right\} \right) \\ \theta_4 = \text{atan2}(n_z, o_z) - \theta_2 - \theta_3 \end{cases}$$

当  $p_x$  为 0 时, 关节 1 转动量为  $90^\circ$ 。

## 2.2 采摘机械臂的运动学分析

采摘机械臂具有 6 个自由度, 在进行运动学分析时, 依然将末端执行器的信息转换成第 6 关节坐标系的信息, 末端姿态与关节坐标系的姿态相同, 假设末端第 6 关节坐标系的位置是  $(x, y, z)$ , 则  $x + a_x \cdot d_6 = p_x$ ,  $y + a_y \cdot d_6 = p_y$ ,  $z + a_z \cdot d_6 = p_z$ , 简化后的连杆坐标系如图 10 所示。正向运动学与夹持机械臂的正向运动学相似, 将式 (1) 代入  ${}^0_6T = {}^0_1T_2T_3T_4T_5T_6T$  中, 得到采摘机械臂的正向运动学。

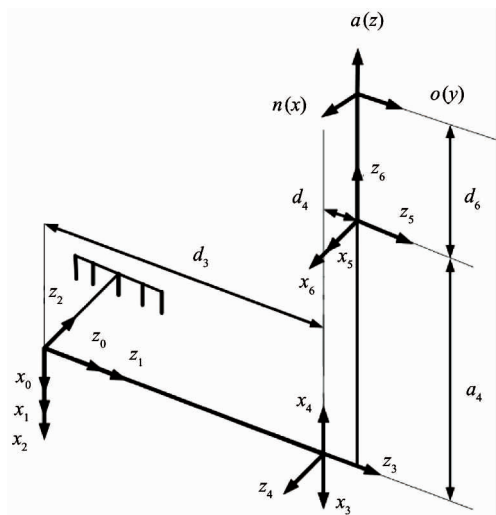


图 10 采摘机械臂连杆坐标系

根据 pieper 法则, 前 3 个关节相交于一点, 采摘机械臂具有解析解<sup>[11]</sup>, 但因为 4 个自由度确定位置, 求反解比较复杂, 为此, 根据采摘机械臂的特殊性, 我们提出了一种反向建模的方法, 将基坐标系和目标坐标系互换, 即把目标点固定, 把基点作为机械臂所要达到的点, 建立的反向坐标系如图 11 所示。

反向建立的模型具有后 3 个关节轴线相交于腕点的特点, 等价于前 3 个关节控制位置, 后 3 个关节调整姿态, 此时便可以用后三轴相交的 pieper 解法来求

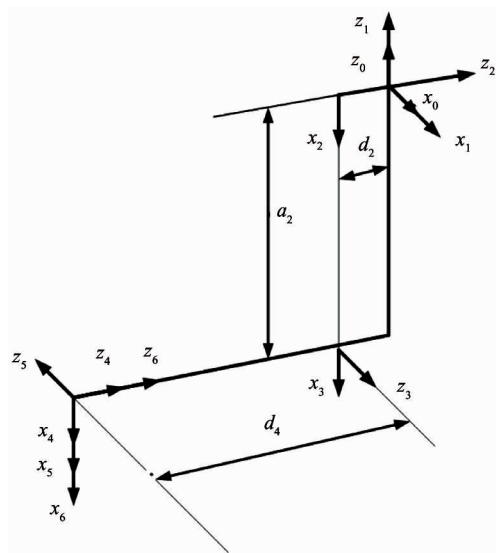


图 11 采摘机械臂反向连杆坐标系

解反向运动学的解析解<sup>[12]</sup>, 该解法通过几何法或者正向运动学的位置信息求得前 3 个关节的转角, 把后 3 个关节等价于通过一定顺序的欧拉角变换所得, 通过得到的前 3 个关节转角求出转换矩阵 ${}^0R$ , 再与欧拉角相乘最后得到目标点的姿态, 得出反向坐标系的解析解后, 再转变为本文所需的解析解。即此时获得采摘机械臂的逆解总共需要 3 个步骤: (1) 基坐标系和目标坐标系的转换; (2) 用三轴相交的 pieper 解法解的反向坐标系的逆解; (3) 将得到的反向坐标系的解析解映射到正向坐标系。

### (1) 基坐标系和目标坐标系转换

目标坐标系相对于基坐标系的旋转矩阵与基坐标系相对目标坐标系的旋转矩阵是互逆的关系, 即:

$$\begin{aligned}
 {}^0_6\mathbf{R} &= \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow {}^6_0\mathbf{R} \\
 &= \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z & -p \cdot n \\ o_x & o_y & o_z & -p \cdot o \\ a_x & a_y & a_z & -p \cdot a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} n_x' & o_x' & a_x' & p_x' \\ n_y' & o_y' & a_y' & p_y' \\ n_z' & o_z' & a_z' & p_z' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

以此便完成了基坐标系与目标坐标系的转换，基点变为机械臂所要达到的位置。

(2)后三轴相交的 pieper 解法

先通过求出的正向运动学,得到的位置信息为

$$\begin{aligned}
 p_x' &= 620C_1C_2 + 102S_1 + 837.5C_3S_1 \\
 &\quad + 837.5C_1C_2S_3 \\
 p_y' &= -102C_1 - 837.5C_1C_3 + 620C_2S_1 \\
 &\quad + 837.5C_2S_1S_3 \\
 p_z' &= -620S_2 - 837.5S_2S_3
 \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)经过一定的计算,可以得到前3个关节转角:

$$\begin{aligned}
 \theta_1' &= \text{atan2}\left(\frac{t_1p_y' + t_2p_x'}{t_1^2 + t_2^2}, \frac{t_1p_x' - t_2p_y'}{t_1^2 + t_2^2}\right) \\
 \theta_2' &= \arcsin\left(-\frac{p_z'}{0.62 + 0.8375S_3}\right) \\
 \theta_3' &= \arcsin\left(\frac{p_x'^2 + p_y'^2 + p_z'^2 - 1.0962}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right) - \varphi
 \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned}
 t_1 &= 0.62C_2 + 0.8375C_2S_3 \\
 t_2 &= 0.102 + 0.8375C_3 \\
 a &= 2 \times 102 \times 837.5 \\
 b &= 2 \times 620 \times 837.5 \\
 \varphi &= \arctan \frac{a}{b}
 \end{aligned}$$

在得出前3个关节转角后,利用欧拉角的方法求解后3个关节转角,因为后3个关节轴线相交于一点,绕关节4、5、6的顺序旋转等价于zyz轴的欧拉

角变换,因此

$$\begin{aligned}
 {}^0_6\mathbf{R} &= {}^0_3\mathbf{R} \cdot {}^3_6\mathbf{R} = {}^0_3\mathbf{R} \cdot {}^3_4\mathbf{R} |_{\theta_4=0} \cdot \mathbf{R} |_{ZYZ} \Rightarrow {}^0_4\mathbf{R}^{-1} |_{\theta_4=0} \cdot {}^0_6\mathbf{R} \\
 &= \mathbf{R} |_{ZYZ}, \text{ 即:}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\begin{bmatrix} C_1C_2C_3 - S_1S_3 & S_1C_2C_3 + C_1S_3 & -S_2C_3 \\ -C_1S_2 & -S_1S_2 & -C_2 \\ -(C_1C_2S_3 + S_1C_3) & C_1C_3 - S_1C_2S_3 & S_2S_3 \end{bmatrix} \\
 &\cdot \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} C_4C_5C_6 - S_4S_6 & -(C_4C_5S_6 + S_4C_6) & C_4S_5 \\ S_4C_5C_6 + C_4S_6 & -S_4C_5S_6 + C_4C_6 & S_4S_5 \\ -S_5C_6 & S_5S_6 & C_5 \end{bmatrix} \quad (4)
 \end{aligned}$$

根据式(4)可以求解得到后3个关节转角:

$$\begin{aligned}
 \theta_4' &= \text{atan2}(A_y, A_x), \theta_4' = \theta_4' + \pi \\
 \theta_5' &= \text{atan2}(C'_4A_x + S'_4A_y, A_z) \\
 \theta_6' &= \text{atan2}(-S_4N_x + C_4N_y, -S_4O_x + C_4O_y)
 \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned}
 N_x &= n_x(C_1C_2C_3 - S_1S_3) + n_y(C_1S_3 + C_2C_3S_1) \\
 &\quad - n_z(S_2C_3) \\
 N_y &= -n_x(C_1S_2) - n_y(S_1S_2) - n_zC_2 \\
 N_z &= -n_x(C_1C_2S_3 + S_1C_3) + n_y(C_1C_3 - S_1C_2S_3) \\
 &\quad + n_zS_2S_3 \\
 O_x &= o_x(C_1C_2C_3 - S_1S_3) + o_y(C_1S_3 + C_2C_3S_1) \\
 &\quad - o_z(S_2C_3) \\
 O_y &= -o_x(C_1S_2) - o_y(S_1S_2) - o_zC_2 \\
 O_z &= -o_x(C_1C_2S_3 + S_1C_3) + o_y(C_1C_3 - S_1C_2S_3) \\
 &\quad + o_zS_2S_3 \\
 A_x &= a_x(C_1C_2C_3 - S_1S_3) + a_y(C_1S_3 + C_2C_3S_1) \\
 &\quad - a_z(S_2C_3) \\
 A_y &= -a_x(C_1S_2) - a_y(S_1S_2) - a_zC_2 \\
 A_z &= -a_x(C_1C_2S_3 + S_1C_3) + a_y(C_1C_3 - S_1C_2S_3) \\
 &\quad + a_zS_2S_3
 \end{aligned}$$

(3)解析解的顺序映射转换

求出反向建立的 D-H 模型的逆运动学解析解后,将反向模型的逆运动学解析解通过连杆坐标系一定映射关系转化为正向模型的解析解。

$$\theta_1 = -\theta_6' \quad \theta_3 = -\theta_4'$$

$$\theta_5 = 180 - \theta_2' \quad \theta_2 = -\theta_5'$$

$$\theta_4 = 180 - \theta_3' \quad \theta_6 = -\theta_1'$$

至此,通过采摘机械臂自由度分配的特殊性,先转化为可用现成解法求解的形式,再转化为所需要的解析解,通过间接的方法求出计算比较复杂的逆运动学。

### 3 机器人运动学仿真

本文首先在 Matlab 机器人工具箱里对双机械臂建立了模型,模型如图 12 所示。

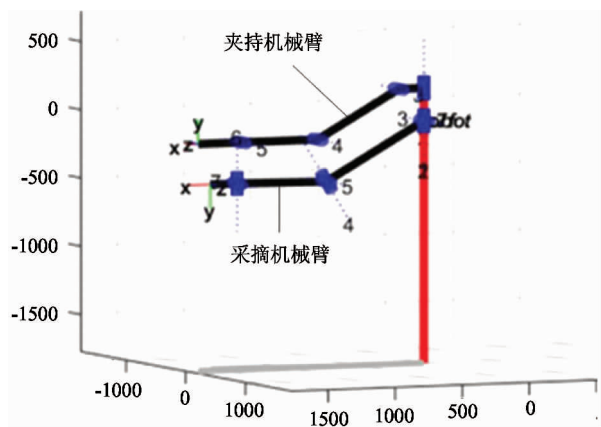
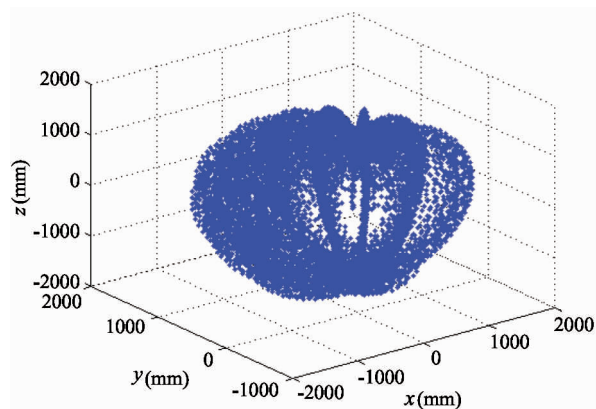


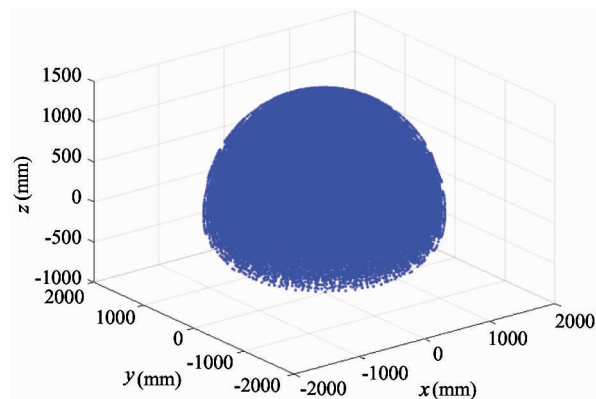
图 12 双机械臂简化模型

然后分别对夹持机械臂和采摘机械臂的作业空间进行分析,分析得到的结果绘制成三维图形,如图 13。由图像所包含范围可看出,本文的双机械臂均满足所需的工作空间。

为了验证上文中间接求逆运动学方法的正确性,我们在 Matlab 的 robotics 工具里建立了采摘机械臂的正向运动学模型,随机产生关节范围内的 10 000 组关节量,通过建立的正运动学模型生成末端的位置和姿态的信息量,并将信息量带入上述间接求法的逆运动学算法中,生成新的关节量,将新的关节量代入正运动学模型中得出对应的位置和姿态的信息量,计算生成的信息量与之前的信息量的差值,得到的结果如表 2 所示,因为有计算时的近似误差, $x$  轴方向上最大误差为 0.036 mm, $y$  轴方向最大误差为 0.038 mm, $z$  轴方向误差为 0.021 mm,而  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的角度偏差特别小,数量级只有  $10^{-13}$ ,由此说



(a) 夹持机械臂工作范围



(b) 采摘机械臂工作范围

图 13 机械臂工作范围仿真

明由间接求解算法得出的解析解是正确的。在验证方法正确后,与 Matlab 机器人工具箱求逆运动学的雅克比矩阵伪逆的方法相对比,就计算时间而言,本算法计算时间减少了 40% 左右。

表 2

$x$ 轴 偏差 (mm)	$y$ 轴 偏差 (mm)	$z$ 轴 偏差 (mm)	$x$ 轴 转角 ( $^{\circ}$ )	$y$ 轴 转角 ( $^{\circ}$ )	$z$ 轴 转角 ( $^{\circ}$ )
0.036	0.038	0.021	$10^{-13}$	$10^{-13}$	$10^{-13}$

### 4 结论

针对枸杞果实小、皮薄、水分大,不宜进行智能化采摘的问题,选取了高效采摘的工作方式,根据采摘作业需求,设计出 4 自由度的夹持机械臂和 6 自由度采摘机械臂,为类似农作物的智能采摘提供了

参考性。根据采摘机械臂构型的特殊性,提出了先反向建立模型,通过已有解法求出反向模型的解析解,再经过一定映射关系转化为所求的解析逆解的方法,并验证了这种方法的可行性。

#### 参考文献

[ 1 ] 石志刚,肖宏儒,万如,等. 枸杞采摘机研究进展[J]. 农业科技与装备,2016(5):53-56

[ 2 ] Zhao Y, Gong L, Liu C, et al. Dual-arm robot design and testing for harvesting tomato in greenhouse[J]. *IF-AC-PapersOnLine*, 2016, 49(16):161-165

[ 3 ] Zhang K, Xu L, Zhang D. Design and analysis of a 4-PP-PR parallel manipulator for strawberry harvesting in the ridge cultivation mode[C]. In: Proceedings of the International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE), Singapore, 2016. 248-251

[ 4 ] Yamamoto S, Hayashi S, Yoshida H, et al. Development of a stationary robotic strawberry harvester with a picking mechanism that approaches the target fruit from below[J]. *Journal of Jsam*, 2014, 48(3):261-269

[ 5 ] 宋健,孙学岩,张铁中,等. 茄子采摘机器人机械传动系统设计与开发[J]. 机械传动,2009,33(5):36-39

[ 6 ] Bulanonet D M, Kataoka T, Okamoto H, et al. Determining the 3-Dlocation of the apple fruit duringharvest[C]. In: Proceedings of the ASAE Conference, Kyoto, Japan, 2004. 56-60

[ 7 ] Reed J N, Tillett R D. Initial experiments in robotic-mushroom harvesting[J]. *Mechatronics*, 1994, 4(4):265-279

[ 8 ] 马可,李斌,王聪,等. 蛇形机械臂的机构设计与关节驱动分析[J]. 高技术通讯, 2017, 27(11-12):958-965

[ 9 ] Bergamaschi P R, Nogueira A C, Saramago S F P. Design and optimization of 3R manipulators using the workspace features[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2006,172(1):439-463

[ 10 ] 谢碧云,赵京. 机器人运动灵活性问题的研究[J]. 高技术通讯, 2010, 20(8):856-862

[ 11 ] Craig J J. 机器人导论[M]. 北京:机械工业出版社, 2005. 67-69

[ 12 ] Pieper D, Roth B. The Kinematics of Manipulators Under Computer Control[D]. Palo Alto: Stanford University, 1968. 159-169

## Structure design and analysis of wolfberry picking robot's dual manipulator

Liu Xiaokuan<sup>\*\*\*</sup>, Li Bin<sup>\*</sup>, Chang Jian<sup>\*</sup>, Zhang Guowei<sup>\*</sup>, Wang Cong<sup>\*</sup>

(\* State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

(\*\* University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

### Abstract

In view of the characteristics of small fruit, large water content and easy breakage of wolfberry, and combined with the working space requirements and complexity of wolfberry picking, a double mechanical arm structure system of efficient and flexible wolfberry harvesting robot is designed. The D-H method is used to establish the coordinate transformation matrix of the robot, and the kinematics of the robot is analyzed. An indirect solution algorithm for the inverse establishment of the D-H coordinate system is proposed to obtain the analytical solution of the inverse kinematics of the picking manipulator. The validity of the structure design is verified by kinematics simulation, and the correctness of the indirect solution of inverse kinematics is verified. The calculation time is reduced by about 40% compared with the inverse kinematics algorithm of the Matlab robot toolbox.

**Key words:** wolfberry, picking robot, workspace, kinematics analysis