DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.05.031

温室3P3R机械臂系统动力学建模与分析*

焦有宙[1]　丁　攀[1]　赵大旭[2]
(1.河南农业大学机电工程学院，郑州 450002；2.浙江农林大学工程学院，临安 311300)

【摘要】 针对温室等设施农业环境,设计了一种具有3P3R机械臂结构的机器人,为了分析机械臂的操作性能并实现精确运动控制,对机械臂进行了运动学和动力学分析;采用Kane方法和旋量理论分析方法建立了机器人的操作臂运动学和动力学模型,利用该模型,针对原理样机的具体结构,在Mathematica环境下研究了机械臂的操作性能,得到在一定作业任务规划下,末端执行器的位姿变化规律,以及按照该规划轨迹运动时各关节的驱动力;结果表明,结合了Kane方法和旋量理论的动力学模型具有准确、简单、有效等特点,能够满足机械臂的运动学、动力学分析的要求。

关键词：温室　机器人　3P3R机械臂　Kane方法　动力学分析
中图分类号：TP242.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2012)05-0179-05

Dynamic Modeling and Analysis for 3P3R Universal Manipulator in Greenhouse

Jiao Youzhou[1]　Ding Pan[1]　Zhao Daxu[2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou* 450002, *China*
2. *School of Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an* 311300, *China*)

Abstract

A universal type 3P3R manipulator in the facility agriculture environment such as greenhouse was designed. The kinematics and dynamics of the manipulator were analyzed for operating performance and accurately motion control acquired. The Kane's method and screw theory were applied to set up the kinematics and dynamics models, respectively. Then in accordance with the models for the manipulator and the structure of the prototype robot manipulator, the operating performance of the manipulator was studied in the Mathematica environment. The orientation variation of the end-effectors and all joint driven torques of the system were obtained according to the planning motion. The result indicates that the correctness, simplicity and validity of the model are verified. Therefore, the dynamic requirements of the manipulator are satisfied with high dexterity. And this research established a foundation for trajectory planning and accurately motion control.

Key words　Greenhouse, Robot, 3P3R manipulator, Kane's method, Dynamic analysis

引言

近年来随着设施农业的快速发展,设施农业机器人向着自动化、智能化、功能多元化等方向发展。国内外相关的播种、移栽、除草、施肥、施药、采摘的机器人研究较多。温室中的作业大多分布在剖面为矩形的垂直面内,对于靠近地表的作业,例如西瓜、甜瓜、卷心菜的采摘、施肥以及移苗作业等,传统关节型农业机器人则有局限性,研究一种多用途农业机器人非常迫切[1~5]。本文所述机械臂系统采用3P3R构型,通过更换末端执行器,可以满足温室栽培管理作业的各种要求。

收稿日期：2011-06-15　修回日期：2011-11-02
* 中国博士后科学基金资助项目(20100470992)
作者简介：焦有宙,副教授,博士,主要从事现代农业工程技术研究,E-mail：jyzh@henau.edu.cn
通讯作者：丁攀,副教授,博士,主要从事机电一体化技术及机器人多体系统动力学研究,E-mail：dingpan2004@126.com

机器人性能取决于结构设计和运动控制的水平，其关键是对研究对象高水平的抽象，而机械多体系统理论，则能够为研究对象建立起规范、友好、统一的用户界面[6]，机械多体系统动力学模型是结构设计和运动控制设计的核心问题，是机器人系统设计、制造和控制的理论基础。

本文针对温室中地表栽培模式下栽培目标的空间分布特征，确定机械臂的构型，研究操作臂运动学和动力学性能。应用 Kane 方法和旋量理论建立系统的运动学和动力学模型，利用该模型计算系统沿规划路线运动时各个关节的驱动力，为机械臂的轨迹规划和精确运动控制实施提供理论依据。

1 机械臂系统结构

1.1 系统原理

根据温室栽培管理的具体要求，机械臂的行走机架跨越栽培地面，并在其上方移动，因此在完成对农作物的栽培管理后，要考虑控制运动轨迹，以避开障碍。机械臂系统结构如图 1 所示。

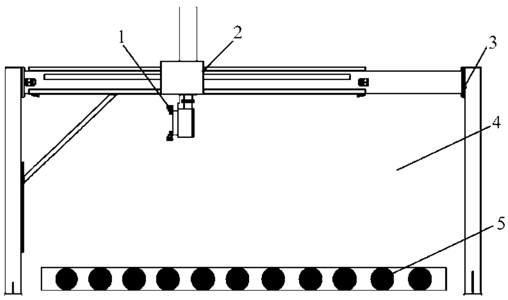

图 1 机械臂布局图

Fig. 1 Schematic diagram of manipulator

1. 末端执行器 2. 移动臂 3. 行走机构 4. 温室栽培区 5. 栽培植物

机械臂系统由升降臂、腕部、末端执行器、横移装置、纵移装置和行走机架组成，机械臂的手臂部分采用直角坐标型结构，由 3 个移动关节来实现对末端执行器的空间定位，且采用电液比例控制保证驱动力波动较大时的精确定位。机械臂手腕采用 3 自由度普通汇交 RBR 型结构，连接末端执行器和手臂，主要作用是改变末端操作器的空间方向和将作业载荷传递到手臂。系统整体有 6 个自由度，具有结构紧凑和灵活的优点。

1.2 机械臂位姿分析

机械臂可简化为一个开链式空间连杆机构，连杆系统通过 3 个移动关节和 3 个转动关节串联而成，3 个移动关节确定末端执行器的空间位置，3 个转动关节确定姿态。各关节的平移或旋转运动，导致各连杆的空间位置、速度和加速度都发生相应的变化，使末端执行器到达空间的不同位置，得到不同的速度和加速度，从而完成预定的作业任务。

利用基于旋量理论的指数积（POE）方法分析机械臂的运动学，以避免 D－H 参数法计算困难和求解时的奇异性。为分析方便，建立惯性参考系和连杆的连体坐标系，如图 2 所示。为避免数学上的奇异性并使姿态表达式简洁，本文在描述机械臂姿态时采用 Euler 四元数而非 Euler 角表达，即 $\boldsymbol{E}_m=[E_{m0}(t)\quad E_{mi}(t)\quad E_{mj}(t)\quad E_{mk}(t)]$（$m=1,2,\cdots,6$），Euler 四元数与 Euler 角可以相互转换[7]。

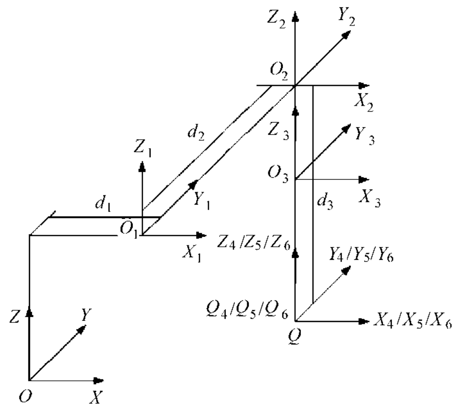

图 2 机械臂动静坐标系示意图

Fig. 2 Dynamic and static coordinates of manipulator

2 基于运动旋量的系统运动学方程

2.1 基于运动旋量的机械臂运动学

分析空间机构的众多数学方法中，旋量是十分有效的工具。一个旋量可以表示空间的一组对偶矢量，从而可以用来同时表示矢量的方向和位置，表示运动学中的角速度和线速度，以及刚体力学中的力和力矩。这样一个含有 6 个标量的旋量概念，适用于机构的运动学和动力学分析。同时它也易于与其他方法，如矢量法、矩阵法和运动系数法之间的相互转换；它具有几何概念清楚、物理意义明确、表达形式简单、代数运算方便等优点，因此得到了广泛的应用，在机器人这种典型的机构运动学和动力学分析上都做出了贡献。系统中某个刚体 B 的位姿可以由刚体参考点在惯性系中的位置矢量 $\boldsymbol{P}$ 和旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 表示，引入 $\boldsymbol{R}^{4\times4}$ 齐次坐标矩阵 $\boldsymbol{g}$ 表示该刚体的位姿[8]

$$\boldsymbol{g}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R} & \boldsymbol{P}\\ 0 & 1\end{bmatrix} \tag{1}$$

所有位姿 $\boldsymbol{g}$ 的集合构成了一个 6 维 Lie 群 SE(3)，其 Lie 代数 SE(3) 中的元素称为运动旋量，以 4×4 矩阵 $\hat{\boldsymbol{\xi}}=\begin{bmatrix}\widetilde{\boldsymbol{\omega}} & \boldsymbol{v}\\ 0 & 0\end{bmatrix}$ 表示，其中反对称矩阵

$$\widetilde{\boldsymbol{\omega}}=\begin{bmatrix}0 & -\boldsymbol{\omega}_3 & \boldsymbol{\omega}_2\\ \boldsymbol{\omega}_3 & 0 & -\boldsymbol{\omega}_1\\ -\boldsymbol{\omega}_2 & \boldsymbol{\omega}_1 & 0\end{bmatrix}$$

是特殊正交群 SO(3)的子集,表征转动,3 维向量 $\boldsymbol{v}\in\boldsymbol{R}^3$ 表征平动。引入 V(vee)运算符

$$\begin{bmatrix}\hat{\boldsymbol{\omega}} & \boldsymbol{v}\\ 0 & 0\end{bmatrix}^V=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\omega}\\ \boldsymbol{v}\end{bmatrix} \tag{2}$$

称 6 维向量 $\boldsymbol{\xi}=[\boldsymbol{\omega}\quad \boldsymbol{v}]^{\mathrm{T}}\in\boldsymbol{R}^6$ 为 $\hat{\boldsymbol{\xi}}$ 的坐标[9]。为与后续研究统一,这里将 6 维向量 $\boldsymbol{\xi}$ 的前 3 行表达为旋转,后 3 行表达为平移,类似的表达方式表示作用在刚体上的空间力,称为力旋量 $\boldsymbol{F}=[\boldsymbol{\tau}\quad \boldsymbol{f}]^{\mathrm{T}}\in\boldsymbol{R}^{6\times1}$,是一个 6 维向量。运动旋量 $\hat{\boldsymbol{\xi}}_k$ 反映了刚体 B(k)相对于其低序体(对于链式系统,为刚体 B($k-1$))的相对运动,对应除关节 k 外所有其他关节均固定于 $\theta_j=0$ 位置时关节 k 的运动旋量,其坐标为

$$\boldsymbol{\xi}_j=\begin{cases}[\boldsymbol{\omega}_j\quad -\boldsymbol{\omega}_j\boldsymbol{Q}_j]^{\mathrm{T}} & (\text{转动关节})\\ [\boldsymbol{O}\quad \boldsymbol{v}_i]^{\mathrm{T}} & (\text{移动关节})\end{cases} \tag{3}$$

假设连体坐标系 B 相对于坐标系 A 的初始形位为 $\boldsymbol{g}(0)$,则 t 时刻 B 的形位可以用运动旋量的指数积变换得到:$\boldsymbol{g}(t)=\mathrm{e}^{\hat{\xi}\theta}\boldsymbol{g}(0)$,变换 $\boldsymbol{g}_{ab}=\mathrm{e}^{\hat{\xi}\theta}$ 反映的是刚体的相对运动。B 相对于 A 的速度为 $\boldsymbol{V}_{ab}$,相对于坐标系 A 和 B 的运动旋量为 $\hat{\boldsymbol{V}}^a_{ab}=\dot{\boldsymbol{g}}_{ab}\boldsymbol{g}^{-1}_{ab}$,$\hat{\boldsymbol{V}}^b_{ab}=\boldsymbol{g}^{-1}_{ab}\dot{\boldsymbol{g}}_{ab}$,其旋量的坐标为 $\boldsymbol{V}^a_{ab}=[\boldsymbol{\omega}^a_{ab}\quad \boldsymbol{v}^a_{ab}]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{V}^b_{ab}=[\boldsymbol{\omega}^b_{ab}\quad \boldsymbol{v}^b_{ab}]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{V}^a_{ab}$ 与 $\boldsymbol{V}^b_{ab}$ 之间可以用关于刚体位姿 $\boldsymbol{g}$ 的伴随变换 $\boldsymbol{A}_{dg}$ 及其逆 $\boldsymbol{A}^{-1}_{dg}$ 相互转换[10]

$$\begin{cases}\boldsymbol{V}^a_{ab}=\boldsymbol{A}_{dg}\boldsymbol{V}^b_{ab}=\begin{bmatrix}0 & \boldsymbol{R}_{ab}\\ \boldsymbol{R}_{ab} & \widetilde{\boldsymbol{p}}_{ab}\boldsymbol{R}_{ab}\end{bmatrix}\boldsymbol{V}^b_{ab}\\ \boldsymbol{V}^b_{ab}=\boldsymbol{A}^{-1}_{dg}\boldsymbol{V}^a_{ab}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}_{ab} & -\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}_{ab}\widetilde{\boldsymbol{p}}_{ab}\\ 0 & \boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}_{ab}\end{bmatrix}\boldsymbol{V}^a_{ab}\end{cases} \tag{4}$$

2.2　机械臂运动学模型

机器人的运动学正解是给定机器人各个连杆的相对位置情况下,确定末端执行器的位形。设机器人连杆 i 的坐标原点为 $\boldsymbol{O}_i=(x_i,\ y_i,\ z_i)$,旋量 $\boldsymbol{\xi}_i$ 方向的单位矢量为 $\boldsymbol{\omega}_i$,机械臂关节变量为 $\boldsymbol{\theta}=[\theta_1\quad\cdots\quad\theta_6]$。连杆 i 的本体坐标系相对于基础坐标系(惯性系)S 的形位定义为 $\boldsymbol{g}_{si}(\boldsymbol{\theta})$,定义 $\boldsymbol{\theta}=0$ 时,工具参考系 T 相对惯性系参考形位为 $\boldsymbol{g}_{st}(\boldsymbol{O})$,则运动学正解的指数积公式为

$$\boldsymbol{g}_{st}(\boldsymbol{\theta})=\prod_{k=1}^{N}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{\xi}}_k\boldsymbol{\theta}_k}\boldsymbol{g}_{st}(\boldsymbol{O}) \tag{5}$$

根据式(3),机械臂前 3 个移动关节对应运动旋量为

$$\begin{cases}\boldsymbol{\xi}_1=\begin{bmatrix}\boldsymbol{O}\\ \boldsymbol{v}_1\end{bmatrix}=[0\quad 0\quad 0\quad 1\quad 0\quad 0]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\xi}_2=\begin{bmatrix}\boldsymbol{O}\\ \boldsymbol{v}_2\end{bmatrix}=[0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 1\quad 0]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\xi}_3=\begin{bmatrix}\boldsymbol{O}\\ \boldsymbol{v}_3\end{bmatrix}=[0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 1]^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{6}$$

设 $\boldsymbol{Q}(d_1,d_2,d_3)$ 为 3 个转动关节共同原点,则

$$\begin{cases}\boldsymbol{\xi}_4=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\omega}_4\\ -\boldsymbol{\omega}_4\boldsymbol{Q}\end{bmatrix}=[0\quad 0\quad 1\quad d_2\quad -d_1\quad 0]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\xi}_5=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\omega}_5\\ -\boldsymbol{\omega}_5\boldsymbol{Q}\end{bmatrix}=[0\quad 1\quad 0\quad -d_3\quad 0\quad d_1]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\xi}_6=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\omega}_6\\ -\boldsymbol{\omega}_6\boldsymbol{Q}\end{bmatrix}=[0\quad 0\quad 1\quad d_2\quad -d_1\quad 0]^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{7}$$

3　基于 Kane 方法的机械臂动力学方程

3.1　基于运动旋量的 Kane 方程

鉴于广义坐标对于非完整系统不独立,Kane 方程直接选取对完整和非完整系统均独立的“速度”参数作为基本参数,因此 Kane 方程对于完整系统和非完整系统都是有效方法[11]。引入旋量理论,对于具有 N 个自由度的机械多体系统,确定 N 个广义速率旋量后,即可计算出系统内各质点及刚体相应的偏速度旋量及相应的 N 个广义主动力旋量、广义惯性力旋量。令每个广义速率所对应的广义主动力及广义惯性力之和为零,即得到 Kane 方程

$$F^{(j)}+F^{*(j)}=0\quad (j=1,2,\cdots,N) \tag{8}$$

上述 N 个标量方程,可以用矩阵形式表达为:$\boldsymbol{F}+\boldsymbol{F}^*=0$。对于任意个质点 P_i 组成的质点系,P_i 上作用的主动力和惯性力分别标记为 $\boldsymbol{f}_i$ 和 $\boldsymbol{f}_i^*$,设 P_i 相对于惯性系的第 j 个偏速度旋量为 $\boldsymbol{v}_i^{(j)}$,式(8)中的广义主动力 $F^{(j)}$ 和广义惯性力 $F^{*(j)}$ 定义为标量形式

$$\begin{cases}F^{(j)}=\sum_{i=1}^{N}f_i v_i^{(j)}\\ F^{*(j)}=\sum_{i=1}^{N}f_i^* v_i^{(j)}\end{cases} \tag{9}$$

因此,Kane 方程求解的关键是求出偏速度。

3.2　偏速度计算

对于 N 个刚体的链式多体系统,选择各关节速度 $\dot{\boldsymbol{\theta}}=[\dot{\theta}_1\quad\cdots\quad\dot{\theta}_N]^{\mathrm{T}}$ 作为伪速度,由式(5)知,B(i)的本体坐标系相对于基础坐标系 S 的形位 $\boldsymbol{g}_{si}(\boldsymbol{\theta})$ 可表示为

$$\boldsymbol{g}_{si}(\boldsymbol{\theta}) = \prod_{k=1}^{i} \mathrm{e}^{\hat{\xi}_k\theta_k}\boldsymbol{g}_{si}(\boldsymbol{O}) \tag{10}$$

式(9)对时间求导,可分别得到 B(i)相对于惯性系和本体坐标系的运动旋量

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{V}}_{si}^{s} = \dot{\boldsymbol{g}}_{si}(\boldsymbol{\theta})\boldsymbol{g}_{si}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) = \sum\limits_{k=1}^{i}\left(\dfrac{\partial \boldsymbol{g}_{st}}{\partial \theta_k}\dot{\theta}_k\right)\boldsymbol{g}_{si}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) = \\ \qquad \sum\limits_{k=1}^{i}\left(\dfrac{\partial \boldsymbol{g}_{si}}{\partial \theta_i}\boldsymbol{g}_{si}^{-1}(\boldsymbol{\theta})\right)\dot{\theta}_k \\ \hat{\boldsymbol{V}}_{si}^{i} = \boldsymbol{g}_{si}^{-1}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{g}}_{si}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{g}_{si}^{-1}(\boldsymbol{\theta})\sum\limits_{k=1}^{i}\left(\dfrac{\partial \boldsymbol{g}_{st}}{\partial \theta_k}\dot{\theta}_k\right) = \\ \qquad \sum\limits_{k=1}^{i}\left(\boldsymbol{g}_{si}^{-1}(\boldsymbol{\theta})\dfrac{\partial \boldsymbol{g}_{si}}{\partial \theta_i}\right)\dot{\theta}_k \end{cases} \tag{11}$$

式(8)可转换为运动旋量坐标,进一步分别得到 B(i)的空间雅可比矩阵和本体雅可比矩阵

$$\begin{cases} \boldsymbol{J}_{si}^{s}(\boldsymbol{\theta}) = [\,\xi_{i1}' \quad \cdots \quad \xi_{ii}' \quad 0 \quad \cdots \quad 0\,] \\ \boldsymbol{J}_{si}^{i}(\boldsymbol{\theta}) = [\,\xi_{i1}^{+} \quad \cdots \quad \xi_{ii}^{+} \quad 0 \quad \cdots \quad 0\,] \end{cases} \tag{12}$$

其中 $\xi_{ij}' = \begin{cases} \left(\dfrac{\partial \boldsymbol{g}_{si}}{\partial \theta_j}\boldsymbol{g}_{si}^{-1}(\boldsymbol{\theta})\right)^{V} & (j \leqslant i) \\ 0 & (j > i) \end{cases}$ $\quad \xi_{ij}^{+} = Ad_{\boldsymbol{g}_{si}(\boldsymbol{\theta})}^{-1}\xi_{ij}'$

根据偏速度定义,由 $\hat{\boldsymbol{V}}_{si}^{i} = \boldsymbol{J}_{si}^{i}(\boldsymbol{\theta})\dot{\theta}_i$ 知,B(i)的本体雅可比矩阵即为偏速度旋量矩阵[12]。将偏速度代入式(9)可得

$$\begin{cases} F^{(j)} = \sum\limits_{i=1}^{N} f_i\xi_{ij}^{+} \\ F^{*(j)} = \sum\limits_{i=1}^{N} f_i^{*}\xi_{ij}^{+} \end{cases} \tag{13}$$

各单元 6 维质量记为 $\boldsymbol{M}_i = \begin{bmatrix} m_k\boldsymbol{I} & m_k\tilde{\boldsymbol{p}}_k \\ m_k\tilde{\boldsymbol{p}}_k & \boldsymbol{J}_k \end{bmatrix}$($i = 1,2,\cdots,6$),其中 $\boldsymbol{J}_k$ 为关于惯性系参考点的转动惯量,$\tilde{\boldsymbol{p}}_k$ 为重心 G_k 的矢径 $\boldsymbol{p}_k$ 的叉积矩阵,根据关节加速度,可以分别求出对应惯性力,代入式(13)从而求解出系统的广义主动力,这对于机械臂的设计与控制至关重要。

4 机械臂动力学仿真

通过建立操作臂动力学方程,得出了机器臂末端执行器位姿与机器臂各关节变量及连杆参数之间的关系,在 Mathematica 环境下,对机械臂越过障碍采摘、搬运地表作物的作业进行了研究。根据任务规划,末端执行器位置和欧拉四元数变化曲线如图 3、图 4 所示。

根据上述预定运动轨迹,利用 Kane 方法分别求解了 3 个移动关节的驱动力(f_1、f_2、f_3)以及 3 个旋转关节的驱动力矩(τ_4、τ_5、τ_6),分别如图 5 和图 6 所示。

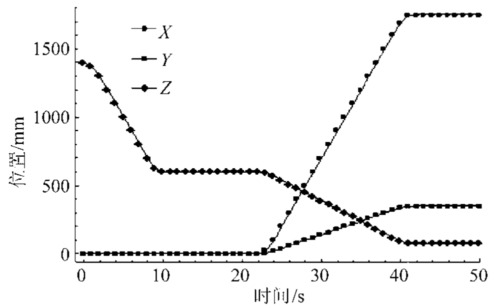

图 3 腕部参考点位置曲线

Fig. 3 Location parameters curves of wrist

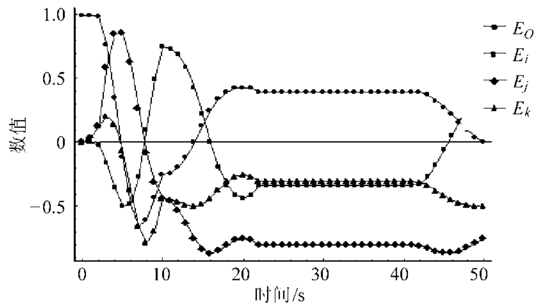

图 4 末端执行器四元数曲线

Fig. 4 Quaternion curves of end-actuator

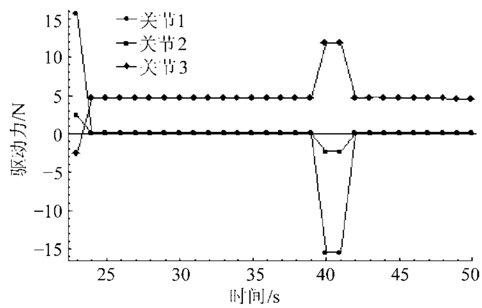

图 5 3 个移动关节驱动力曲线

Fig. 5 Force curves of moving joints

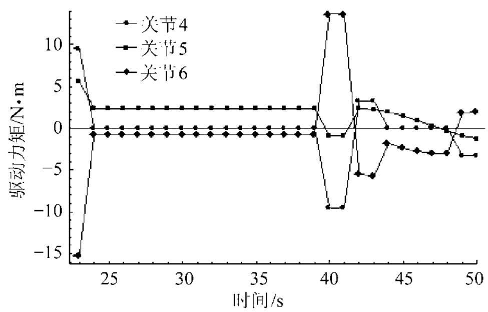

图 6 3 个旋转关节驱动力矩曲线

Fig. 6 Torque curves of rotary joints

由图 5 可知,由于考虑躲避及跨越非目标栽培作物,关节 3(垂直方向)由于频繁转换运动方向,驱动力变化最复杂,因此,关节 3 采用电液比例阀控制的液压驱动是合理的。

图 6 所示为腕部 3 个旋转关节的驱动力矩，由图 6 可知由于关节 4 连接升降臂，其驱动力矩变化最复杂，而且存在突变，因此在轨迹规划中需要考虑腕部驱动器的承载能力。

5 结论

（1）机械臂针对特定的温室地表栽培环境下的操作，具备较好的多用途性及可操作性，对其构型及其在温室中的布局进行研究具有重要意义。

（2）结合 Kane 方法与旋量理论进行机械臂运动学和动力学分析，建立了操作臂运动学与动力学模型，求解了机械臂按照具体规划作业时末端执行器位姿变化规律以及 6 个关节相对应的驱动力。

（3）3 自由度普通汇交 RBR 型腕部结构，具有足够灵活性，可以满足诸多地表附近的作业任务。机械臂系统具有良好的灵活性和承载能力，能够满足温室等设施农业环境下的作业要求。

（4）通过对所计算的模型进行仿真分析，验证了模型的合理高效性，为研究温室多用途机械臂轨迹规划和精确运动控制提供了理论依据。

参 考 文 献

1 耿长兴，张俊雄，曹峥勇，等. 温室黄瓜病害对靶施药机器人设计[J]. 农业机械学报，2011, 42(1)：177～180.
Geng Changxing, Zhang Junxiong, Cao Zhengyong, et al. Cucumber disease toward-target agrochemical application robot in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1)：177～180. (in Chinese)

2 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)

3 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)

4 梁喜凤，苗香雯，崔绍荣，等. 番茄收获机械手运动学优化与仿真试验[J]. 农业机械学报，2005，36(7)：96～100.
Liang Xifeng, Miao Xiangwen, Cui Shaorong, et al. Experiments of optimization and simulation on kinematics of a tomato harvesting manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7)：96～100. (in Chinese)

5 杨丽，张铁中. 组培苗移植机器人的运动学求解[J]. 农业机械学报，2007，38(7)：94～98.
Yang Li, Zhang Tiezhong. Kinematic solution of tissue culture plantlet transplanting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7)：94～98. (in Chinese)

6 卢宏琴. 基于旋量理论的机器人运动学和动力学研究及其应用[D]. 南京：南京航空航天大学，2007.
Lu Hongqin. Kinematics and dynamics research of robot manipulators and its application based on screw theory [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007. (in Chinese)

7 Robert Beretta. Mechanical systems—kinematic and dynamic analysis in mathematica [EB/OL]. http: // documents. wolfram. com/ applica-tions/mechsystems/VelocityAndAcceleration/VelocityAndAccelerationOutput/Mech. 4. 2. 4. html.

8 Liu Xiaobo. A Lie group formulation of Kane's equations for multi-body systems [J]. Multibody System Dynamics, 2008, 20(1)：29～49.

9 Tasneem Z Naqvi, Maurice Buchbinder, David Zarbatany, et al. Beating-heart percutaneous mitral valve repair using a transcatheter endovascular suturing device in an animal model[J]. Catheterization and Cardiovascular Interventions, 2007, 69(4)：525～531.

10 Abdulrahman H Bajodah, Dewey H Hodges, Ye-Hwa Chen. Non-minimal Kane's equations of motion for multi-body dynamical systems subject to nonlinear nonholonomic constraints[J]. Multibody System Dynamics, 2005, 14(2)：155～187.

11 夏丹，陈维山，刘军考，等. 基于 Kane 方法的仿鱼机器人波状游动的动力学建模[J]. 机械工程学报，2009，45(6)：41～50.
Xia Dan, Chen Weishan, Liu Junkao, et al. Dynamic modeling of a fishlike robot with undulatory motion based on Kane's method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6)：41～50. (in Chinese)

12 理查德·摩雷(美)，李泽湘(中)，夏恩卡·萨斯特(美). 机器人操作的数学导论[M]. 徐卫良，钱瑞明，译. 北京：机械工业出版社，1998：11～101.

13 Kato N, Suzuki M, Omachi S, et al. A handwritten character recognition on system using directi onal element feature and asymmetric Mahalanobis distance [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(3)：258～262.

14 Liu Wufa, Gong Zhenbang, Wang Qinque. Investigation on Kane dynamic equations based on screw theory for open chain manipulators [J]. Applied Mathematics and Mechanics: English Edition, 2005, 26(5)：627～635.