

组培苗移植机器人移苗作业轨迹规划^{*}

杨 丽 张铁中 张凯良

【摘要】 为实现5自由度关节式组培苗移植机器人快速从培养瓶中取出组培苗而不与苗瓶产生碰撞,针对运苗和取苗作业过程对手爪运动路径和速度的要求,提出了分别在关节空间中采用5次多项式插值和直角坐标空间中采用沿空间直线运动的方式规划机器人的运动轨迹,建立了运动轨迹的数学模型,并结合实际工作过程,对机器人的运动轨迹进行了计算机仿真。仿真结果表明,规划的轨迹平滑连续,无抖动和停顿,能够保证机器人正常工作。实际运行情况表明,组培苗移植机器人基本上能按照规划的轨迹运行,平均位置偏差小于0.5 mm,满足移苗作业的精度要求。

关键词: 组培苗 移植 机器人 轨迹规划

中图分类号: TP242.2

文献标识码: A

Trajectory Planning of Tissue Culture Plantlet Transplanting Robot in Transporting Seedling

Yang Li Zhang Tiezhong Zhang Kailiang

(China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

Aimed at different working courses of conveying and grasping plantlet, the method of using quintic polynomial in joint space and beeline in Cartesian coordinate space was adopted to plan the motion trajectory of the 5-DOF tissue culture plantlet transplanting robot. The robot could take out plantlet fleetly from culture bottle and not hit with the bottle at the same time. The mathematics model of the motion trajectory was established and the computer simulation on the motion trajectory of the robot was carried out. The simulated trajectory curves of the robot were smooth and successive, which could assure the robot working normally. The practical tests show that the robot can run according to the trajectory planning basically and the average warp is less than 0.5 mm. It can realize the precision of transporting seedling.

Key words Tissue culture plantlet, Transplanting, Robot, Trajectory planning

引言

组培苗移植机器人是针对我国普遍采用的培养瓶育苗方式而研制的专用机器人系统,以解决传统组培苗生产过程中手工作业对苗污染严重且人力成本过高等现实问题,该系统的研究在国内外尚属首

次。组培苗移植机器人采用5自由度关节式结构,模拟人工操作实现组培苗的抓取、搬运和插植作业^[1]。在工作过程中,要求机械手在保证不与苗瓶产生碰撞的情况下能够准确地抓取组培苗,同时要求工作效率尽量高。本文从这些要求出发,规划组培苗移植机器人手爪的运动轨迹。

收稿日期:2008-01-22

^{*} 国家自然科学基金资助项目(项目编号:60375036)和中国农业大学科研启动基金资助项目(项目编号:2006006)

杨 丽 中国农业大学工学院 讲师 博士,100083 北京市

张铁中 中国农业大学工学院 教授 博士生导师

张凯良 中国农业大学工学院 博士生

1 机器人的轨迹规划

在作业过程中,组培苗移植机器人的主要运动形式有2种,如图1所示:①手爪从 $P_0 \rightarrow P_1$ 、 $P_1 \rightarrow P_3$ 、 $P_3 \rightarrow P_4$ 及 $P_4 \rightarrow P_1$ 的运苗过程。②手爪从 $P_1 \rightarrow P_2$ 及 $P_4 \rightarrow P_5$ 的取苗插苗过程。其中: P_0 是手爪的起始位置; P_1 是待移植苗瓶瓶口正上方20 mm处一点,手爪在进入苗瓶前和取出苗后都要在此处停留; P_2 是 P_1 正下方80 mm处一点,手爪先从 P_1 点运动到此处,然后再根据苗的位置作水平方向的运动,抓取苗; P_3 是苗切割平台上的一点,机械手在此处放苗或抓苗; P_4 是新苗瓶瓶口正上方20 mm处一点,手爪从此处进入苗瓶,实现苗的插植; P_5 是 P_4 正下方80 mm处一点,手爪先从 P_4 点运动到此处,然后作水平方向的运动,插苗。

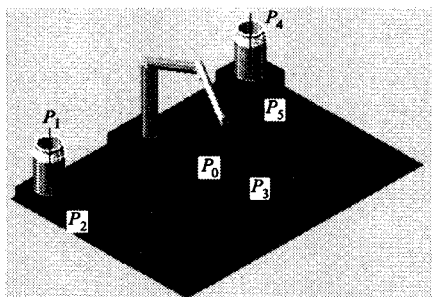


图1 组培苗移植机器人工作过程示意图

Fig.1 Working process of plantlet transplanting robot

运动形式的不同,对机器人的运动轨迹提出了不同的要求,因此,应对这2种不同的工作过程采取相应的轨迹规划算法,以完成组培苗的移植作业。

1.1 运苗作业过程的轨迹规划

在运苗过程中,只要求手爪以较高的速度到达目标点,并保证到达目标点时手爪的空间位姿,对运动中间过程手爪的状态没有特殊要求。因此在关节空间进行轨迹规划,采用PTP(point-to-point)的运动方式,以降低运算量、提高作业速度。

在关节空间中进行轨迹规划,是将关节变量映射成时间的函数,并规划它的一阶和二阶时间导数。为了在关节空间形成所求轨迹,首先将路径点映射成各关节变量角度值,即用逆运动学方法把路径点转换成关节角度值,然后对每个关节拟合一光滑函数,使之从起始点开始,依次光滑通过所有路径点,最后到达目标。对于每一段路径,各关节运动时间均相同,以保证所有关节同时到达各路径点,从而得到末端手爪预定的位置和姿态。尽管每个关节在同一段路径中的运动时间相同,但各个关节函数之间却相互独立^[2~6]。

相应于 $P_0 \rightarrow P_1$ 、 $P_1 \rightarrow P_3$ 、 $P_3 \rightarrow P_4$ 及 $P_4 \rightarrow P_1$

的每一个运动过程,由于抓苗手爪的起始位姿和终止位姿已知,由运动学逆解即可求出对应于各起始点和终止点的关节角度 θ_0 和 θ_f 。因此,采用通过起始点关节角和终止点关节角的一个平滑插值函数 $\theta(t)$ 来描述手爪的运动轨迹。 $\theta(t)$ 在 $t_0=0$ 时刻的值是起始关节角 θ_0 ,在终止时刻 t_f 的值是终止关节角 θ_f 。

为了生成平滑的轨迹,实现关节的平稳运动,整个运动时间内在保证位置和速度连续性的同时,为防止末端执行器(手爪)产生振动,还必须保证加速度不出现突变。为此,轨迹函数 $\theta(t)$ 需满足如下约束条件:

端点的角度、速度和加速度约束分别为

$$\begin{cases} \theta(0) = \theta_0 \\ \theta(t_f) = \theta_f \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{\theta}(0) = 0 \\ \dot{\theta}(t_f) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \ddot{\theta}(0) = \ddot{\theta} \\ \ddot{\theta}(t_f) = -\ddot{\theta} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\ddot{\theta}$ 、 $-\ddot{\theta}$ ——初始与终止时刻关节的加速度

满足上述约束条件的平滑函数有很多,鉴于计算简化和形式简单,且能满足上述任意给定的约束条件,利用五次多项式插值函数来描述各关节的运动轨迹,其形式为

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (4)$$

相应运动轨迹上的关节速度 $\dot{\theta}(t)$ 和加速度 $\ddot{\theta}(t)$ 可通过对式(4)分别求一阶和二阶导数获得。

将约束条件式(1)~(3)代入关节位移、速度和加速度表达式中,可得

$$\begin{aligned} a_0 &= \theta_0 & a_1 &= 0 & a_2 &= \frac{\ddot{\theta}}{2} & a_3 &= \frac{10\theta_f - 10\theta_0 - 2\ddot{\theta}t_f^2}{t_f^3} \\ a_4 &= \frac{30\theta_0 - 30\theta_f + 5\ddot{\theta}t_f^2}{2t_f^4} & a_5 &= \frac{6\theta_f - 6\theta_0 - \ddot{\theta}t_f^2}{t_f^5} \end{aligned}$$

因此,机器人运苗作业过程的运动轨迹曲线为

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \theta_0 + \frac{\ddot{\theta}}{2} t^2 + \frac{10\theta_f - 10\theta_0 - 2\ddot{\theta}t_f^2}{t_f^3} t^3 + \\ &\quad \frac{30\theta_0 - 30\theta_f + 5\ddot{\theta}t_f^2}{2t_f^4} t^4 + \frac{6\theta_f - 6\theta_0 - \ddot{\theta}t_f^2}{t_f^5} t^5 \quad (5) \end{aligned}$$

1.2 取苗插苗作业过程的轨迹规划

在取苗插苗作业过程中,要求手爪必须以较高的位置和姿态精度沿苗瓶中心垂直地伸入或提出(沿直线运动),否则手爪可能碰撞苗瓶,因此对这一

作业过程在直角坐标空间中进行轨迹规划^[7~12]。

组培苗移植机器人取苗作业过程如图2所示。

①机械手爪移动到苗瓶坐标系 $\{B\}$ 的坐标原点,苗瓶坐标系 $\{B\}$ 的规定如图2所示。坐标原点位于瓶口上方20 mm处苗瓶的中心轴线上,Z轴垂直于纸面向外,Y轴水平向右,X轴垂直向下, $\{B\}$ 坐标系即确定了手爪到达坐标原点时的位置和姿态。

②抓取苗瓶中的某一棵苗,抓取位置为A点。要抓到苗,不光手爪要移动到A点,而且手爪的方向也要绕 $\{B\}$ 系的X轴转过 θ 角度。由于瓶中苗的形态不规则,考虑到手爪在苗瓶中转动可能会对苗产生扰动,造成伤苗或使苗歪斜,因此在手爪伸入苗瓶之前,先让手爪转过 θ 角,使手爪正对A'点(A'点是A点正上方且与 $\{B\}$ 系坐标原点位于同一高度的点),此时手爪的位姿用 P_1 来描述。③手爪沿直线从 P_1 点垂直地伸入苗瓶至 P_2 点,再从 P_2 点沿直线水平移动到A点将苗夹住。④从A点退回 P_2 点,再从 P_2 点退回到 P_1 点,完成取苗过程。

插苗过程的运动方式跟取苗过程类似,在此不再进行详细分析。

手爪从 P_1 点到 P_2 点的运动可表示为

$${}^0T_5 = {}^0T_B {}^B P_1 {}^5T_E^{-1} \quad (6)$$

$${}^0T_5 = {}^0T_B {}^B P_2 {}^5T_E^{-1} \quad (7)$$

式中 0T_5 ——机器人手腕坐标系相对参考坐标系的齐次变换矩阵

5T_E ——工具(即手部夹爪)坐标系 $\{T\}$ 相对手腕坐标系的齐次变换矩阵

0T_B ——苗瓶坐标系 $\{B\}$ 相对参考坐标系的齐次变换矩阵

${}^B P_1$ 、 ${}^B P_2$ —— P_1 、 P_2 相对苗瓶坐标系 $\{B\}$ 的齐次变换矩阵

基于式(6)和(7),则从 P_1 到 P_2 的运动可用驱动变换 $D(\lambda)$ 来表示

$${}^0T_5(\lambda) = {}^0T_B {}^B P_1 D(\lambda) {}^5T_E^{-1} \quad (8)$$

其中 $\lambda = t/T$ ($\lambda \in [0, 1]$)

式中 λ ——归一化时间

t ——自 P_1 点运动开始计算的实际运动时间

T ——由 P_1 点运动到 P_2 点的总时间

在 P_1 点,实际运动时间 $t=0$,因此 $\lambda=0$, $D(0)$

是 4×4 的单位矩阵,因而式(8)与式(6)相同。

在 P_2 点, $t=T$, $\lambda=1$,有

$${}^B P_1 D(1) = {}^B P_2$$

式(8)与式(7)相同,因此得

$$D(1) = {}^B P_1^{-1} {}^B P_2 \quad (9)$$

P_1 点和 P_2 点相对于苗瓶坐标系 $\{B\}$ 的描述可用相应的齐次变换矩阵来表示。由于 P_1 点相对 $\{B\}$ 只是转过了 θ 角, P_2 点相对 $\{B\}$ 先转过了 θ 角,又沿X轴方向平移了 d_1 的距离,因此可求出 ${}^B P_1$ 、 ${}^B P_2$ 。则由式(9)可得

$$D(1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

手爪坐标系从 P_1 点到 P_2 点的运动只是一个平移运动,即

$$D(\lambda) = L(\lambda) \quad (11)$$

式中, $L(\lambda)$ 是表示平移运动的齐次变换,作用是把 P_1 的坐标系原点沿直线运动到 P_2 的坐标系原点。

$$L(\lambda) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \lambda x \\ 0 & 1 & 0 & \lambda y \\ 0 & 0 & 1 & \lambda z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

显然,平移量 λx 、 λy 、 λz 与 λ 成正比,而 λ 随时间线性变化,故 $D(\lambda)$ 所代表的运动是一个恒速移动。由式(10)、(11)和(12),令 $\lambda=1$,使位置矢量的各元素分别相等,则得 $x=d_1$, $y=0$, $z=0$ 。故有

$$D(\lambda) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \lambda d_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)即为关于归一化时间变量 λ 的驱动矩阵 $D(\lambda)$ 的数值表达式,将该式代入式(8),可得到从 P_1 点到 P_2 点间任意时刻组培苗移植机器人夹爪应具有的位置矩阵 ${}^0T_5(\lambda)$,同理可算出从 $P_2 \rightarrow A$ 、 $A \rightarrow P_2$ 及 $P_2 \rightarrow P_1$ 的位姿矩阵 ${}^0T_5(\lambda)$,对于插苗过程也以同样的方式计算。将求得的 ${}^0T_5(\lambda)$ 矩阵按照轨迹的更新速率实时地进行逆向运动学计算,回归到关节空间,即可获得控制手爪沿直线运动的机器人关节位移序列。

2 机器人轨迹规划的仿真

2.1 运苗过程轨迹仿真与分析

在运苗过程中,机器人手爪在必经的4个路径点 P_0 、 P_1 、 P_3 、 P_4 处的位姿矩阵分别为

$${}^0P_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 330 \\ 0 & 0 & -1 & 120 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^0P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 250 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0P_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 250 \\ 0 & 0 & -1 & 40 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^0P_4 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -250 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由机器人运动学逆解^[13](组培苗移植机器人的运动学逆解,在文献[13]中做了详细分析),即可求出机器人在各点处 5 个关节相应的角度值,见表 1。

将 P_0 点处各关节的角度值作为初始值, P_1 点处各关节的角度值作为终止值,对机器人各关节采用 5 次多项式的轨迹规划方法进行插值,即由式(9)可求出机器人手爪从 P_0 点运动到 P_1 点机器人各

关节的轨迹曲线。设从 P_0 到 P_1 运动时间 $t_f = 3$ s,通过计算机仿真可得出机器人各关节的运动轨迹如图 3a 所示。同理,可得出手爪 $P_1 \rightarrow P_3$ 、 $P_3 \rightarrow P_4$ 及 $P_4 \rightarrow P_1$ 各段机器人各关节的运动轨迹,如图 3b、3c、3d 所示。

表 1 手爪在不同路径点处机器人各关节的角度值

Tab.1 Angles of every joint of the robot while paw at different knots (°)

路径点	关节转角				
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
P_0	0	4.31	48	7.11	-90
P_1	90	6.9	36.85	16.25	90
P_3	0	23	80.76	-43.76	-90
P_4	-90	6.9	36.85	16.25	-90

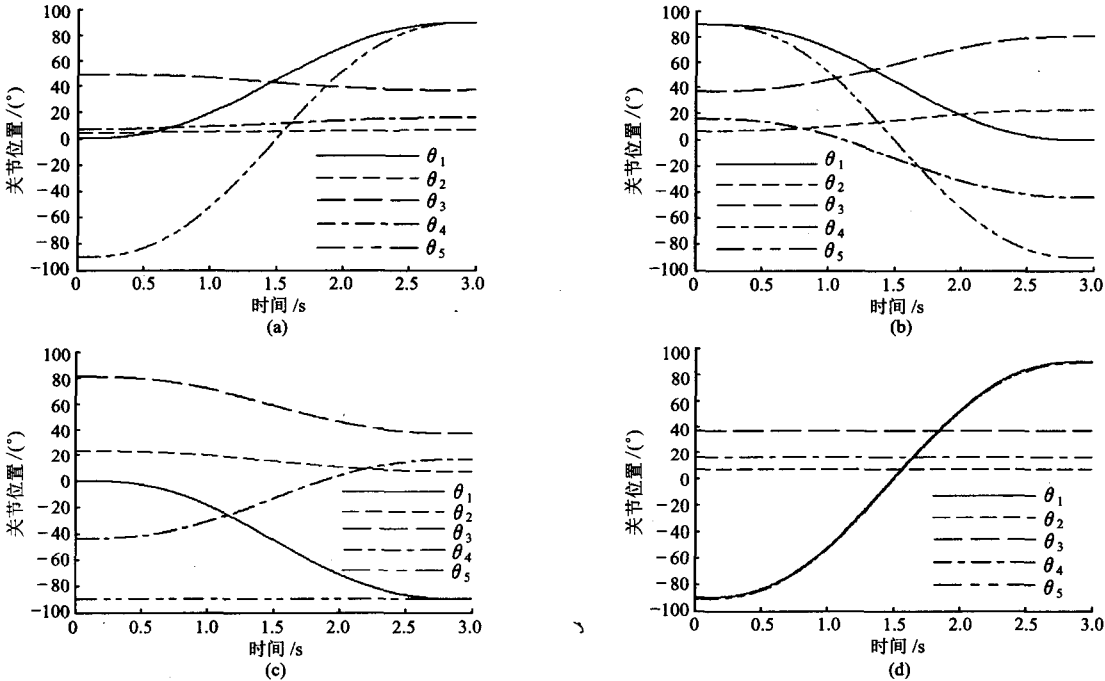


图 3 机器人各关节的运动轨迹

Fig.3 Motion trajectories of robot joints

(a) 手爪 $P_0 \rightarrow P_1$ (b) 手爪 $P_1 \rightarrow P_3$ (c) 手爪 $P_3 \rightarrow P_4$ (d) 手爪 $P_4 \rightarrow P_1$

从仿真结果可以看出,机器人在整个运苗过程中,各关节的运动轨迹平滑连续,无抖动和停顿,从而能够保证机器人平稳、正常地工作。

2.2 取苗插苗过程轨迹仿真与分析

在取苗过程中,机器人手爪必须从 P_1 点沿直线运动到 P_2 点,即手爪沿式(12)所示的轨迹运动,由于 0T_B 、 5T_E 、 ${}^B P_1$ 已知,代入式(12)可得

$${}^0T_5(\lambda) = \begin{bmatrix} \sin\theta & -\cos\theta & 0 & 250 \\ \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 150 - \lambda d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

对于瓶中某棵固定的苗, θ 值是确定的, ${}^0T_5(\lambda)$ 就是归一化时间 λ 的函数。由式(14)可以看出,手爪从 P_1 点运动到 P_2 点,机器人手腕在参考坐标系中其 X、Y 方向的坐标值都没发生变化,只有 Z 方向的坐标值随时间变化,说明机器人手腕沿 Z 轴方向作直线运动。设从 P_1 到 P_2 运动时间 $T = 4$ s, $\theta = 30^\circ$,由计算机仿真可得出机器人的运动轨迹如图 4 所示。从仿真结果可以看出,机器人手爪从 P_1 点运动到 P_2 点的轨迹是一条垂直向下的直线,从而保证了机器人在取苗过程中沿规划的直线路径运行,不会与苗瓶碰撞。

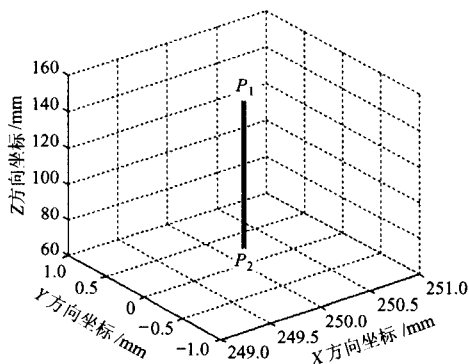


图 4 手爪从 P_1 到 P_2 的运动轨迹

Fig.4 Trajectory of the paw from P_1 to P_2

对于插苗过程,其路径规划与仿真的方法与取苗过程基本相同,这里不再赘述。

3 试验结果与分析

为验证所规划的轨迹是否满足机器人移苗作业要求,对机器人在运苗和取苗作业过程中的运行状

态和运动路径点进行了测试。

试验设备见文献[1]。在试验台上先铺好坐标纸,然后固定机器人,使机器人的坐标零点与坐标纸的原点重合。坐标纸用于测量机器人手部到达各目标处的 X 、 Y 坐标值(水平面内),采用高度划线尺测量手部到达各目标处的 Z 坐标值。各测量值均精确到小数点后 1 位。安排如下 2 个试验。

3.1 运苗作业过程

对于运苗作业,测试了机器人作业过程中必经的 3 个路径段,即 $P_1 \rightarrow P_3$ 、 $P_3 \rightarrow P_4$ 、 $P_4 \rightarrow P_1$ 的运行情况。首先以 P_1 为起始点,按照规划的轨迹,以 25 ms 时间间隔进行轨迹插补点计算,运行机器人使手爪从 P_1 运行到 P_3 点停止,运行时间为 3 s,观察机械臂的运行情况,并测取在 P_3 点处的三维实际坐标值,重复进行 20 次。然后再分别以 P_3 、 P_4 点为起始点, P_4 、 P_1 点为目标点,进行同样的测试试验。试验数据如表 2 所示。

表 2 运苗过程中手爪在目标点处的实测三维位置坐标

Tab.2 Practical coordinates of every end knots in transporting plantlets

目标点		P_3	P_4	P_1
理论位置/mm		(0, 250, 40)	(- 250, 0, 150)	(250, 0, 150)
20 组实测位置	最大偏差/mm	(0.86, 0.72, 0.56)	(0.62, 0.58, 0.74)	(0.72, 0.68, 0.52)
	平均偏差/mm	(0.461, 0.352, 0.295)	(0.386, 0.422, 0.359)	(0.432, 0.327, 0.381)

由表 2 可以看出,在各目标点处,实测位置 X 、 Y 、 Z 方向的平均偏差基本上都在 0.5 mm 范围之内,但最大偏差却较大,分别为 0.86 mm、0.72 mm、0.74 mm,为此,对定位精度的准确率进行了统计。准确率计算方法为:若 X 、 Y 、 Z 方向的偏差都在 ± 0.5 mm 范围之内,就认为定位准确。根据这个准则,由 20 组实测数据计算出的定位准确率达到 90%,能满足设计要求。

3.2 取苗作业过程

对于取苗作业过程,测试了机器人手爪从

P_1 (250, 0, 150)到 P_2 (250, 0, 70)点的运行情况。由于从 $P_1 \rightarrow P_2$ 机器人手爪的运动轨迹理论上是一条直线,为了解手爪实际运行轨迹与理论轨迹之间的吻合程度,即手爪是否沿直线运动,在总运行时间 4 s 内,每隔 1 s 测取一次手爪的实际三维坐标。共进行了 5 组试验,测取的 20 组数据如表 3 所示。

由表 3 可以看出,在各时刻,5 组数据在 X 、 Y 、 Z 方向的平均偏差都小于 0.5 mm,最大偏差也不大于 1 mm。因为在实际运行过程中,影响运动精度的因素很多,轨迹规划只是其中的一个,因此实测平均

表 3 取苗过程中不同时刻手爪所经各路径点处的实测三维坐标位置

Tab.3 Practical coordinates of every knot at different time in taking out plantlets

测试时刻	理论位置	手爪的实际三维坐标位置					mm
		1	2	3	4	5	
第 1 秒	(250, 0, 130)	(249.28, 0.74, 129.46)	(249.32, -0.28, 130.32)	(250.48, 0.62, 130.30)	(249.34, 0.48, 129.30)	(249.70, 0.42, 129.36)	
第 2 秒	(250, 0, 110)	(249.54, -0.52, 110.28)	(249.60, 0.42, 110.16)	(249.50, -0.30, 109.38)	(249.50, -0.14, 109.62)	(250.28, 0.26, 110.18)	
第 3 秒	(250, 0, 90)	(249.58, 0.38, 90.34)	(250.44, 0.70, 90.66)	(250.36, -0.54, 90.26)	(250.28, 0.30, 90.34)	(249.82, 0.50, 89.72)	
第 4 秒	(250, 0, 70)	(250.26, -0.40, 69.90)	(249.72, 0.46, 70.42)	(249.72, 0.28, 70.54)	(249.80, 0.58, 70.52)	(250.68, 0.38, 69.54)	
最大偏差		(0.72, 0.74, 0.54)	(0.68, 0.70, 0.66)	(0.50, 0.62, 0.62)	(0.66, 0.58, 0.70)	(0.68, 0.50, 0.64)	
平均偏差		(0.465, 0.420, 0.315)	(0.475, 0.465, 0.390)	(0.405, 0.435, 0.430)	(0.410, 0.375, 0.470)	(0.360, 0.390, 0.390)	

偏差小于 0.5 mm,说明手爪基本上沿直线运行。

另外,在测试过程中,机器人能够平稳、正常工作,未出现停顿、抖动等异常情况。说明规划的机器人运动轨迹满足机器人移苗作业要求。

4 结束语

对 5 自由度关节式组培苗移植机器人的轨迹规划进行了探讨。针对运苗作业过程,在关节空间中采用 5 次多项式插值的方法规划机器人的运动轨

迹,以降低运算量,尽可能提高机器人的作业速度;针对取苗、插苗作业过程,在直角坐标空间中采用沿空间直线运动的方式规划机器人的运动轨迹,解决了在取苗插苗作业过程中手爪可能会与苗瓶产生碰撞的难题。对规划的轨迹进行了仿真分析,仿真结果表明,所规划的轨迹平滑连续,无抖动和停顿,可以保证机器人正常工作。实际运行情况表明,组培苗移植机器人基本上能按照规划的轨迹运行,平均偏差小于 0.5 mm,满足移苗作业的精度要求。

参 考 文 献

- 1 杨丽. 组培苗分割移植机器人系统的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- 2 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- 3 戴学丰, 边信黔. 6 自由度水下机器人轨迹控制仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(3): 368~369.
Dai Xuefeng, Bian Xinqian. Simulation on trajectory control of a 6 - DOF underwater vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2001, 13(3): 368~369. (in Chinese)
- 4 张大庆, 何清华, 郝鹏, 等. 液压挖掘机铲斗的轨迹跟踪控制[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2005, 35(5): 490~494.
Zhang Daqing, He Qinghua, Hao Peng, et al. Trajectory tracking control of hydraulic excavator bucket[J]. Journal of Jilin University of Technology: Engineering and Technology Edition, 2005, 35(5): 490~494. (in Chinese)
- 5 Luo Xiong, Fan Xiaoping, Zhang Heng, et al. Novel integrated optimization algorithm for trajectory planning of robot manipulators based on integrated evolutionary programming[J]. Journal of Control Theory and Applications: English Edition, 2004, 2(4): 319~331.
- 6 Tan Guanzheng, Wang Yuechao. Theoretical and experimental research on time-optimal trajectory planning and control of industrial robots[J]. Control Theory & Applications: English Edition, 2003, 20(2): 185~192.
- 7 Chwa Dongkyoung, Kang Junho, Choi Jinyoung. Online trajectory planning of robot arms for interception of fast maneuvering object under torque and velocity constraints[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans, 2005, 35(6): 831~843.
- 8 Gasparetto A, Zanutto V. A new method for smooth trajectory planning of robot manipulators[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(4): 455~471.
- 9 Zhang Ke, Wu Yixiong, Jin Xin, et al. Trajectory planning of posture adjustment of welding mobile robot during auto-searching weld line[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: English Edition, 2005, 41(5): 215~220.
- 10 Valero Francisco, Mata Vicente, Besa Antonio. Trajectory planning in workspaces with obstacles taking into account the dynamic robot behaviour[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(5): 525~536.
- 11 Luo Xiong, Fan Xiaoping, Zhang Heng, et al. Integrated optimization of trajectory planning for robot manipulators based on intensified evolutionary programming [C] // Proceedings-2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2004: 546~551.
- 12 Munasinghe S Rohan, Nakamura Masatoshi, Goto Satoru, et al. Trajectory planning for industrial robot manipulators considering assigned velocity and allowance under joint acceleration limit[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2003, 1(1): 68~75.
- 13 Ellekilde Lars P, Perram John W. Tool center trajectory planning for industrial robot manipulators using dynamical systems [J]. International Journal of Robotics Research, 2005, 24(5): 385~396.
- 14 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)