doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.008

狭闭空间内苗盘物流化搬运机器人运动规划与试验

权龙哲[1]　申静朝[2]　奚德君[1]　王　昊[1]　刘立意[1]

(1.东北农业大学工程学院,哈尔滨 150030;
2.天津大学机械工程学院,天津 300072)

摘要:针对植物工厂狭小密闭工作空间(狭闭空间)内大范围作业需求,提出了一种应用于植物工厂内部的物流化搬运机器人。采用 D-H 法建立连杆坐标系,通过求解运动学正解对机器人运动空间进行分析,在此基础上,采用边界追踪法规划了一种满足植物工厂立体式培育特点的滑切式搬运最优轨迹,提取轨迹上若干点,求解提取点运动学逆解,采用三次样条插值拟合机械手臂关节变量随时间变化函数,并在实验室中搭建育秧环境可自动调控的立体式育秧平台进行试验,控制机器人按照最优轨迹运动,应用高速摄像技术对实际运动轨迹进行记录,试验结果表明,实际轨迹和最优轨迹最大绝对误差为 8 mm,在误差允许范围内,可以完成植物工厂内所需的搬运作业功能。

关键词:植物工厂;搬运机器人;苗盘搬运;狭闭空间;轨迹规划

中图分类号:TP242.3;S126　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2016)01-0051-09

Motion Planning and Test of Robot for Seedling Tray Handling in Narrow Space

Quan Longzhe[1]　Shen Jingchao[2]　Xi Dejun[1]　Wang Hao[1]　Liu Liyi[1]

(1. *College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
2. *College of Mechanical Engineering*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*)

Abstract: Due to the high cost of plant factory, we put forward a logistics handling robot, worked in a wide range but took up a narrow space when in non-working state, based on plant factory. First, we introduced its work environment and task characteristics. The space, which the robot takes up, needs to be minimized as far as possible, what's more, the optimal trajectory must ensure that the distance between the robot and the seeding platform reaches the minimum. Then, we adopted D-H method to establish the connecting rod coordinate system, and analyzed the robot movement space through solving the kinematics equation. On this basis, we planned a kind of sliding handling optimal trajectory to meet the vertical cultivation characteristics of plant factory. Then, we extracted some points on the trajectory and solved the kinematics inverse solution of those points. Next, we fitted time-varying function curve of manipulator's joint variable by using cubic spline interpolation. Last, we made a test-machine and set up a vertical seedling platform in the lab. We controlled the robot to move along the optimal trajectory with a high-speed camera recording its actual moving tracking. The test showed that the maximum absolute deviation of actual moving tracking was 8 mm which was within the error range and verified the correctness of the inverse solution. So the invention can complete the needed handling work and provide a good platform for the following study of plant factory.

Key words: plant factory; handling robot; seedling management; narrow space; trajectory planning

收稿日期:2015-06-29　修回日期:2015-07-13

基金项目:黑龙江省普通高等学校青年创新人才培养计划项目(UNPYSCT-2015005)、国家自然科学基金项目(51405078)、黑龙江省博士后基金项目(LBH-Z13022)和东北农业大学"青年才俊"项目(14QC33)

作者简介:权龙哲(1980—),男,副教授,主要从事智能农业装备研究,E-mail:quanlongzhe@163.com

通信作者:刘立意(1963—),男,高级工程师,主要从事测控传感研究,E-mail:liyiiliu@163.com

引言

随着现代农业技术提高,作为国际公认的设施农业最高发展阶段,植物工厂化成为首选发展模式。但目前植物工厂管理多由人工完成,管理难度大和成本较高,因此研究一种物流化搬运机械装备成为植物工厂发展研究中的关键[1-3]。

在农业工程领域中,刘继展等[4]面对螺旋立柱式栽培结构研究了一种移栽机械装备,并对其进行了动态仿真;杨丽等[5]、褚佳等[6]、姜凯等[7]针对蔬菜嫁接速度慢、成活率低等问题,增加了砧穗木搬运机械装备、切削装置、夹送装置,提高了嫁接速度与成活率;张俊峰等[8]、欧阳玉平等[9]、李善军等[10]针对山地瓜果运输困难的问题研究了若干山地轨道运输装备,适应了复杂地形运输的需要;高占文等[11]、辜松等[12]分别对我国现代与荷兰水稻苗盘搬运机械发展研究做了相关介绍。机械工程领域中张良安等[13]、付铁等[14]对工业中若干码垛及搬运机械装备进行了研究,完成了对大重型物料搬运作业。但是植物工厂投资成本较高,内部多为立体式多层培育,而且植物工厂中作业对象多为脆弱生物体,对机械手臂的柔顺性和稳定性提出了较高要求,目前的搬运机械装备自动化程度低、动作粗犷、占用空间大,皆不能满足要求。

针对以上问题,本文主要研究一种狭闭空间内的物流化搬运机器人,采用边界追踪法,优化滑切式最优搬运轨迹,并研制实体进行试验分析。

1 机器人任务特征及样机结构

1.1 苗盘搬运作业环境及任务特征

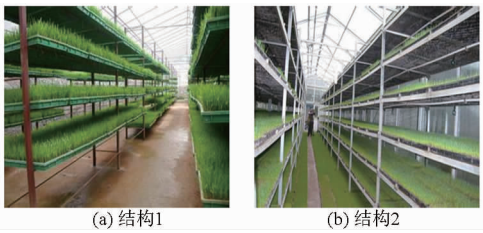
植物工厂育秧平台结构参数如表 1 所示。

表 1 育秧平台结构参数

Tab.1 Structural parameters of seedling platform

参数	数值
苗盘(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	700×500×50
层数/层	5~10
单层高度/mm	400~500
秧苗高度/cm	12~17

植物工厂虽具有规模化、集约化、立体化等诸多优点,但却给运输带来了不便。随着育秧平台层数的增加,搬运的难度与成本不断增加,且给工作人员带来很多不安全因素,严重制约其进一步发展,针对此问题,需要研究一种搬运机器人,可以完成苗盘的层间搬移和移入移出等作业,使其不受高度的制约。考虑到植物工厂投资成本较高,为提高空间利用率,必须要求育秧平台(图 1)过道宽度、层间高度尽量小,



(a) 结构1 (b) 结构2

图 1 植物工厂育秧平台不同结构

Fig.1 Seedling platform with different structures

因此机器人必须满足狭小空间内大范围作业的需求。

1.2 机器人结构及工作原理

机器人通过固定在植物工厂内部的水平移动轨道,穿梭于整个工厂内部完成搬运作业,结构简图如图 2 所示。主体框架由钢材和合金铝材焊接而成,水平移动机构由直流电动机提供动力带动固定在齿形带上的竖直升降机构在水平导轨上自由移动,回转机构由直流电动机驱动可实现 360°旋转,竖直升降机构由直流推进器(图中未画出)带动承载机械手臂的平台在立柱轨道上竖直升降,三者相互协调,使承载机械手臂的平台能到达二维坐标内的任何位置实施作业。搬运机械手臂有 3 个自由度,由大臂、小臂、双叉式末端执行器组成。

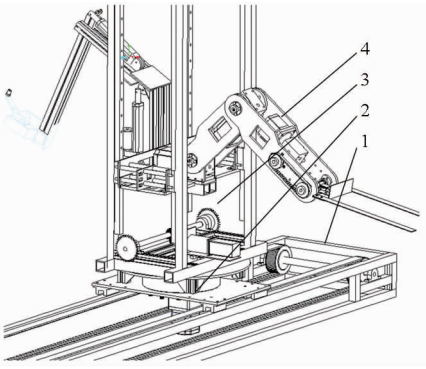


图 2 立体式智能苗盘搬运机器人机构图

Fig.2 Mechanism figure of intelligent handling robot in vertical space

1. 水平移动机构 2. 回转机构 3. 竖直升降机构 4. 3 自由度搬运机械手臂

其工作原理如下:①在实验室内部搭建育秧环境可自动调控的小型育秧植物工厂,固定于秧苗盘上方的图像采集系统实时反馈秧苗的生长状态信息。②经上位机运算判断,向机器人控制系统发出相应解决方案信号。③控制水平、竖直、旋转机构协调作业,到达待工作位置后三轴机械手臂从折叠状态展开,完成搬运作业。④机械系统恢复初始状态。

2 搬运机械系统运动学分析

2.1 搬运机械系统运动学模型建立与求解

搬运机械系统关节结构由水平移动机构、竖直

升降机构、回转主体、3 自由度搬运机械手臂(后简称搬运机械手臂)等部分组成,有 4 个转动关节和 2 个移动关节,具有 6 个关节自由度。

为表示杆件间的相对位置和姿态,采用 D－H 法[15]建立杆件坐标系。此坐标系由机器人手臂处于伸展状态得到,如图 3 所示。

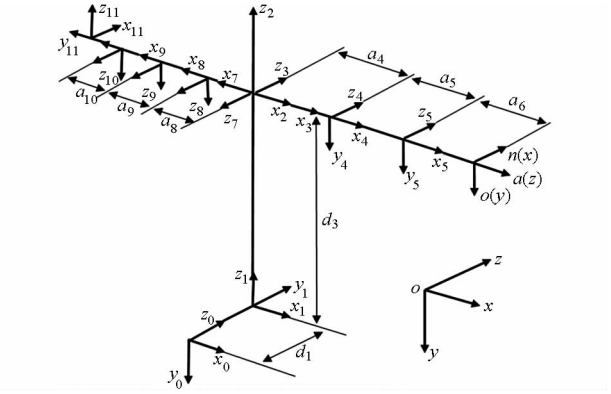


图 3　机器人连杆坐标系

Fig. 3　Connecting rod coordinate of handling mechanism system

用齐次变换矩阵${}_{i}^{i-1}\boldsymbol{T}$来表示连杆 i 坐标系在连杆 $i-1$ 坐标系中的位置和姿态,可推导出机械手臂末端质心(双叉末端执行器末端点连线中点)相对于固定坐标系的位姿。各关节变量参数如表 2 所示。

表 2　机器人搬运机械系统关节变量参数

Tab. 2　Joint variable parameters of robot's handling mechanical system

连杆序号 i	关节变量	变量范围	扭角 α_i/(°)	杆长 a_i/mm	距离变量 d_i
1	d_1/mm	0～3 000	90	0	d_1
3	θ_2/(°)	－180～180	0	0	0
2	d_3/mm	0～2 000	－90	0	d_3
4	θ_4/(°)	－90～45	0	300	0
5	θ_5/(°)	－45～160	0	400	0
6	θ_6/(°)	－135～135	0	500	0

注:“杆长”一栏括号内数据表示大臂、中臂、小臂长度。

根据 D－H 法建立坐标系原则可得

$$
{}_{i}^{i-1}\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}
\cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_i \\
\sin\theta_i\cos\alpha_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & -d_i\sin\alpha_i \\
\sin\theta_i\sin\alpha_i & \cos\theta_i\sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i\cos\alpha_i \\
0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix} \tag{1}
$$

根据表 2 关节变量参数,建立搬运机械系统运动学方程

$$
{}_{6}^{0}\boldsymbol{T}={}_{1}^{0}\boldsymbol{T}\,{}_{2}^{1}\boldsymbol{T}\,{}_{3}^{2}\boldsymbol{T}\,{}_{4}^{3}\boldsymbol{T}\,{}_{5}^{4}\boldsymbol{T}\,{}_{6}^{5}\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}
n_x & o_x & a_x & p_x \\
n_y & o_y & a_y & p_y \\
n_z & o_z & a_z & p_z \\
0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix} \tag{2}
$$

式(2)表示机器人搬运机械系统变换矩阵,描述了末端连杆坐标系{6}相对基坐标系{0}的位姿,将初始关节变量代入校核${}_{6}^{0}\boldsymbol{T}$的正确性,得

$$
{}_{6}^{0}\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}
1 & 0 & 0 & a_4+a_5+a_6 \\
0 & 1 & 0 & -d_3 \\
0 & 0 & 1 & d \\
0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix}
$$

与图 3 所示完全一致。

令

$$
{}_{6}^{0}\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R} & \boldsymbol{P} \\ 0 & 1\end{bmatrix}
$$

其中

$$
\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix}P_x & P_y & P_z\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{3}
$$

式中　$\boldsymbol{P}$——搬运机械手臂末端质心相对于基坐标的姿态矩阵

$\boldsymbol{R}$——搬运机械手臂末端质心相对于基坐标系的位置向量

求解式(3)等号右端各元素相应的表达式为

$$
P_x=a_4c_2c_4+a_6c_6c_2c_{45}-a_6s_6c_2s_{45}+a_5c_2c_{45}
$$

$$
P_y=a_4s_4-d_3+a_5s_{45}+a_6c_6s_{45}+a_6s_6c_{45}
$$

$$
P_z=d_1+a_4c_4s_2+a_6c_6c_{45}s_2-a_6s_6s_2s_{45}+a_5c_{45}s_2
$$

式中,c_2 表示 $\cos\theta_2$,c_4 表示 $\cos\theta_4$,c_6 表示 $\cos\theta_6$,c_{45} 表示 $\cos(\theta_4+\theta_5)$,s_2 表示 $\sin\theta_2$,s_4 表示 $\sin\theta_4$,s_6 表示 $\sin\theta_6$,s_{45}表示 $\sin(\theta_4+\theta_5)$,下同。

2.2　搬运机械手臂运动空间分析

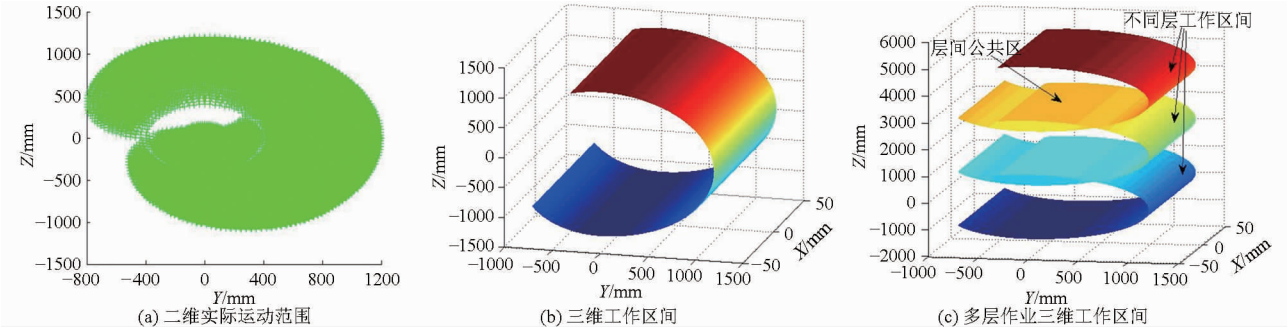
机械手臂是该机器人的重要执行部件,其灵活度对育秧管理机器人的工作能力起着决定性作用,手臂的实际工作空间是反映机器人运动灵活程度的重要指标之一,也是验证其是否满足狭小空间内大范围作业需求的必要条件之一,同时也是确定苗层间距避免干涉和求解运动学逆解的基础[16－17]。工作空间通常指其末端执行器末端质心所能达到的空间点集合[18]。

为防止搬运机械手臂在非工作状态下占用空间过大,机械手臂在待工作状态和进入工作位置过程中,手臂处于收缩状态,承载机械手臂的平台到达指定工作位置后,手臂伸展工作,其运动空间范围不受搬运机械系统水平、竖直、旋转机构运动的影响。而且该机器人自由度较多,作业空间大,绘制整个搬运机械系统运动空间很难观察其运动范围,因此令 $d_1=0$,$\theta_2=0°$,$d_3=0$,仅绘制搬运机械手臂相对于坐标系{3}的运动空间。

采用随机概率蒙特卡罗方法[19]求解搬运机械手臂运动空间,使 θ_4(－90°～45°)、θ_5(－45°～160°)、θ_6(－135°～135°)在其范围内依次等间隔取值变化,间隔为 1°,根据运动学模型中搬运机械手

臂相对于坐标系{3}的位姿矩阵$^3_6\boldsymbol{T}$,依次求出手臂末端质点坐标,得出搬运机械手臂末端质心二维实际运动范围,如图 4a 所示。

为使手臂运动空间更直观,用 Matlab 绘制搬运机械手臂末端质心在 X 轴正方向(待搬运苗盘所在方向)三维运动空间,如图 4b 所示。植物工厂为立体式栽培模式,苗盘区为多层结构,各层分别培育同种或不同种作物,根据作物种类的不同或生长阶段的不同其生长环境不尽相同,图 4c 所示为搬运机械手臂多层作业末端质心工作区间。



(a) 二维实际运动范围 (b) 三维工作区间 (c) 多层作业三维工作区间

图 4 搬运机械手臂工作区间

Fig. 4 Working range of mechanical arm for handling

由计算结果可知,机械手臂 X 轴方向上最大作业范围是在非工作状态下的 6~7 倍,有效工作区间可以完全覆盖苗盘区,满足小空间内大范围作业机器人的作业需求,而且可根据搬运对象、位置的不同改变搬运机械系统控制程序,增加了其灵活性、适应性。

3 搬运机械手臂最优轨迹规划与求解

3.1 搬运机械手臂运动学逆解分析

由于样机设计的局限性,垂直升降机构难以与 3 自由度机械手臂联动完成 4 自由度搬运动作,需水平旋转、竖直机构协同作业,先把承载机械手臂的平台运送至待工作位置,而后机械手臂完成作业。

当待作业对象确定后,关节变量 d_1、θ_2 确定,d_3 不能确定,此时搬运机械系统自由度冗余,机械手臂逆解有无穷多个,d_3 在某一范围之内,每个值都对应 2 组逆解,随着关节变量 d_3 的变化,手臂搬运最优轨迹也在不断变化,因此先假设 d_3 已知,则有

$$^3_6\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y-d_3 \\ n_z & o_z & a_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

令式(4)两端的元素(1,4)、(2,4)对应相等,则有

$$\begin{cases} a_4c_4+a_5c_{45}+a_6n_x=p_x \\ a_4s_4+a_5s_{45}+a_6n_y=p_y \end{cases} \tag{5}$$

解式(5)得

$$\theta_4=\arctan(2(w,m))-\arctan(2(k,\pm\sqrt{m^2+w^2-k^2})) \tag{6}$$

其中 $m=p_y-a_6n_y \quad w=a_6n_x-p_x$

$$k=\frac{a_5^2-a_4^2+2a_6(p_xn_x+p_yn_y)-(p_x^2+p_y^2)-a_6^2(n_x^2+n_y^2)}{2a_4}$$

将 θ_4 代入式(5)并变换得

$$\theta_5=\arctan2(p_y-a_4s_4-a_6n_y,p_x-a_4c_4-a_6n_x)-\theta_4 \tag{7}$$

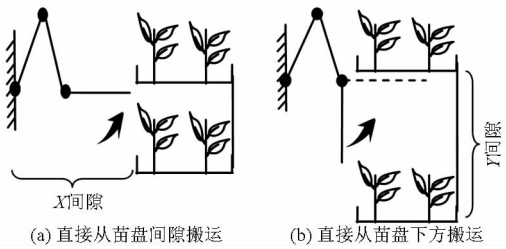
令式(4)两端的元素(1,1)、(2,1)对应相等,则有

$$\begin{cases} \cos(\theta_4+\theta_5+\theta_6)=n_x \\ \sin(\theta_4+\theta_5+\theta_6)=n_y \end{cases}$$

可得 $$\theta_6=\arctan2(n_y,n_x)-\theta_4-\theta_5 \tag{8}$$

3.2 搬运机械手臂最优轨迹规划

如图 5 所示,搬运秧苗盘可采用两种简便方法,然而,在成本较高的植物工厂内部,极容易造成空间严重浪费;如图 5a 所示,此搬运模式会造成 X 轴方向上搬运机器人与育秧平台间距过大;如图 5b 所示,此搬运模式会造成 Y 轴方向上育秧平台层与层之间间隙过大,造成空间资源浪费,不符合小空间内大范围作业机器人的要求。



(a) 直接从苗盘间隙搬运 (b) 直接从苗盘下方搬运

图 5 普通搬运模式

Fig. 5 Ordinary handle-model of robot

为增加空间利用率,本文采用边界追踪法规划了定点滑切式搬运方法,始终沿着滑切点切入最大可用搬运距离内搬运秧苗盘,在保证作业效果的同

时，使空间利用率达到最大，如图 6 所示。

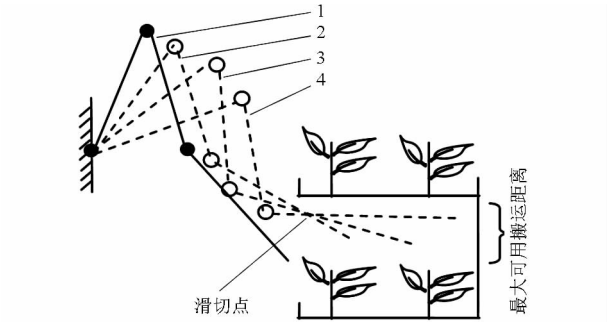


图 6　滑切式的搬运模式

Fig. 6　Sliding handle-model of robot

1. 运动位姿 1　2. 运动位姿 2　3. 运动位姿 3　4. 运动位姿 4

植物工厂中苗层间距过小不利于植物通风、取光，过大则造成空间资源浪费，应在保证生长条件适宜的情况下尽量减小层间间距。查阅相关资料，在不影响秧苗生长的情况下，层间最大可用搬运距离约为 100 mm[3,20]（如图 7 所示间距 d），所以苗盘搬运最优轨迹是最大限度的利用间距 d，使搬运机器人与育秧平台的间距（即过道间隙）达到最小（如图 7 所示间距 L）。

在初始状态下，3 自由度搬运手臂处于折叠状态，如图 7 所示位姿 1，$\alpha(20°)$ 处于极限位置，中臂、小臂在同一条直线上，与 y 轴平行，图中粗实线 $ABCDEFG$ 为搬运机械手臂末端质心最优轨迹。

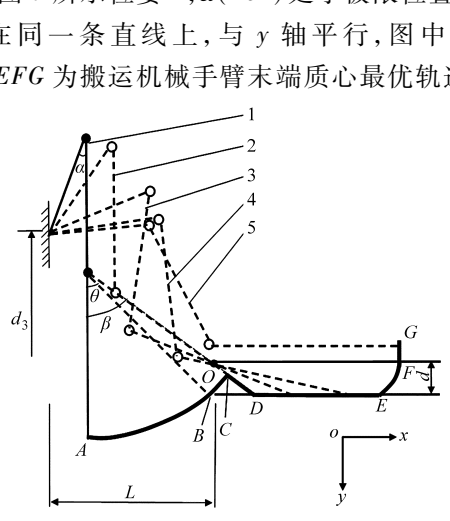


图 7　滑切式的搬运模式

Fig. 7　Sliding handle-model of robot

1. 运动位姿 1　2. 运动位姿 2　3. 运动位姿 3　4. 运动位姿 4
5. 运动位姿 5

图中 A、B、C、D、E、F、G 分别表示运动过程中手臂末端质心经过的位置；θ 表示从 A 点到 B 点末端执行器转过角度；β 表示从 A 点到 C 点末端执行器转过角度；α 表示初始状态下大臂与小臂夹角；d_3 表示竖直升降关节变量。

竖直升降机构内部存放控制柜、导线等，为防止搬运机械手臂在运动过程中与其干涉，图中小臂、末端执行器上任何点 X 坐标值在运动过程中必须大于图 7 中点 A 的 X 坐标值，需满足关系式

$$ {}^{3}_{5}\boldsymbol{T}(1,4) \geqslant a_4 \sin\alpha \tag{9} $$

点 C、D、E、F、G 坐标为 $C(c_x,c_y)$、$D(d_x,d_y)$、$E(e_x,e_y)$、$F(f_x,f_y)$、$G(g_x,g_y)$，其中

$$ \begin{cases} c_x = s_\theta a_4 + s_\theta a_6 + s_\beta\left(a_6 - \sqrt{a_6^2 + d^2 - 2da_6c_\theta}\right) \\ c_y = a_5 + c_\theta a_6 - c_\alpha a_4 - d + c_\beta \sqrt{a_6^2 + d^2 - 2da_6c_\theta} \\ d_x = s_\theta a_4 + s_\theta a_6 + t_\beta d \\ d_y = a_5 + c_\theta a_6 - c_\alpha a_4 \\ e_x = s_\alpha a_4 + s_\theta a_6 + \sqrt{a_6^2 - d^2} \\ e_y = a_5 + c_\theta a_6 - c_\alpha a_4 \\ f_x = s_\alpha a_4 + s_\theta a_6 + a_6 \\ f_y = a_5 + c_\theta a_6 - c_\alpha a_4 - d \\ g_x = s_\alpha a_4 + s_\theta a_6 + a_6 \\ g_y = a_5 + c_\theta a_6 - c_\alpha a_4 - d - 50 \end{cases} \tag{10} $$

式中，s_θ、s_β、c_θ、c_α、c_β、t_β、s_α 分别为 $\sin\theta$、$\sin\beta$、$\cos\theta$、$\cos\alpha$、$\cos\beta$、$\tan\beta$、$\sin\alpha$，下同。

CD 阶段手臂末端质心位姿为 $\boldsymbol{T}_{cd}$，DE 阶段手臂末端质心位姿为 $\boldsymbol{T}_{de}$，EF 阶段手臂末端质心位姿为 $\boldsymbol{T}_{ef}$，FG 阶段手臂末端质心位姿为 $\boldsymbol{T}_{fg}$，其中，$i \in (0,1)$。

$$ \boldsymbol{T}_{cd} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2}-\beta\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}-\beta\right) & 0 & c_x + i(c_x - d_x) \\ \sin\left(\frac{\pi}{2}-\beta\right) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}-\beta\right) & 0 & c_y + i(c_y - d_y) - d_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{11} $$

$$ \boldsymbol{T}_{de} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & d_x + i(d_x - e_x) \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & d_y + i(d_y - e_y) - d_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{12} $$

$$ \gamma = \arctan\frac{d}{d_x + i(d_x - e_x) - s_\alpha a_4 - s_\theta a_6} \tag{13} $$

$$ \boldsymbol{T}_{ef} = \begin{bmatrix} \cos\left(i\arcsin\frac{d}{a_6}\right) & -\sin\left(i\arcsin\frac{d}{a_6}\right) & 0 & b_x + a_6\cos\left(i\arcsin\frac{d}{a_6}\right) - e_x \\ \sin\left(i\arcsin\frac{d}{a_6}\right) & \cos\left(i\arcsin\frac{d}{a_6}\right) & 0 & f_y + a_6\sin\left(i\arcsin\frac{d}{a_6}\right) - d_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{14} $$

$$\boldsymbol{T}_{fg}=\begin{bmatrix}1&0&0&f_x\\0&1&0&g_y+i(f_y-g_y)-d_3\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix} \tag{15}$$

将各阶段位姿矩阵代入式(6)、(7)、(8)可得 θ_4、θ_5、θ_6值。

由于限制条件式(9),设图 7 中轨迹 *AB* 所对应夹角 θ 值最小分度为 1°,将 θ_4、θ_5值代入式(9)中可得 θ 最小值,求解得

$$\min\theta=\frac{8\pi}{45} \tag{16}$$

将 θ 代入式(10)~(15)可得最优轨迹各阶段位姿。

由图 8 可知 $\min L=a_4\sin\alpha+a_6\cos\theta$,$\theta$ 与 L 成正比,则 $\min L=526.6$ mm。因此,机器人最优搬运轨迹下,搬运机器人与育秧平台最小间距为 526.6 mm。

3.3 最优轨迹关节变量逆解求解

在轨迹 *CD*、*DE*、*EF*、*FG* 段取若干点求解其逆解,如表 3~6 所示。

表 3 *CD* 段插值点逆解

Tab. 3 Inverse kinematics of interpolation point in *CD* period

插值点	θ_4	θ_5	θ_6	${}^3_5\boldsymbol{T}(1,4)$
点 *C*	-70.00	160.00	-39.27	102.606
CD 中点	-61.04	154.99	-43.22	117.716
点 *D*	-53.95	150.23	-45.55	132.826

表 4 *DE* 段插值点逆解

Tab. 4 Inverse kinematics of interpolation point in *DE* period

插值点	θ_4	θ_5	θ_6	${}^3_5\boldsymbol{T}(1,4)$
点 *D*	-53.95	150.23	-45.55	132.83
插入点 1	-27.65	141.70	-74.85	102.71
插入点 2	-14.03	131.83	-86.33	104.49
插入点 3	-3.38	115.38	-89.80	149.66
插入点 4	2.60	94.12	-81.54	311.26
点 *E*	9.32	70.38	-68.16	367.57

表 5 *EF* 段插值点逆解

Tab. 5 Inverse kinematics of interpolation point in *EF* period

插值点	θ_4	θ_5	θ_6	${}^3_5\boldsymbol{T}(1,4)$
点 *E*	9.32	70.38	-68.16	367.57
点 *F*	-9.32	70.38	-79.70	367.57

表 6 *FG* 段插值点逆解

Tab. 6 Inverse kinematics of interpolation point in *FG* period

插值点	θ_4	θ_5	θ_6	${}^3_5\boldsymbol{T}(1,4)$
点 *F*	9.32	70.39	-79.70	367.57
点 *G*	-0.41	80.68	-80.23	367.57

为保证关节角度、关节速度、关节加速度的连续性,根据表 3~6 各段所对应各关节角度,采用三次样条插值[21-23]分别对关节角度 θ_4、θ_5、θ_6未知位置关节角进行插值,拟合光滑函数,拟合函数两端速度为零,从而得到关节变量随时间变化的函数,如图 8 所示。

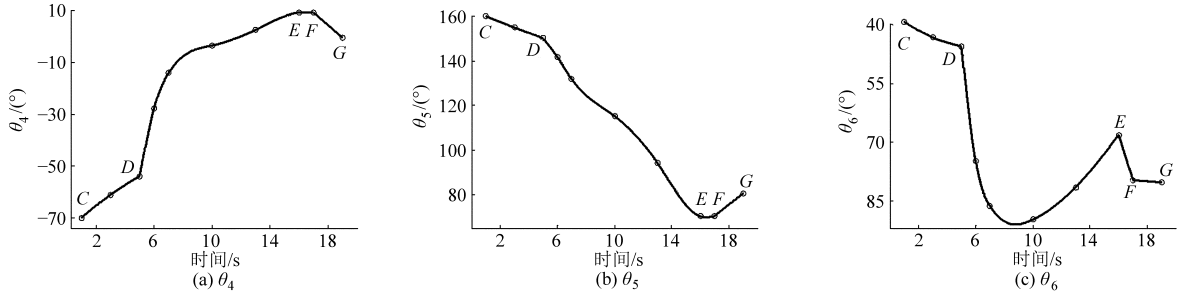


图 8 *CG* 段三轴手臂各关节变量随时间变化拟合函数

Fig. 8 Time-varying function curves of manipulator's joint variable in *CG* period

为验证所求拟合函数的准确性,将所求各关节变化值代入式(3),分别得出手臂末端质心在 *CD*、*DE*、*EF*、*FG* 段的运动轨迹曲线,如图 9 所示。

由图 9 可看出,在 *CD* 段最大绝对误差 $\max\Delta<1$ mm,*DE* 段最大绝对误差 $\max\Delta<1.7$ mm,*FG* 段最大绝对误差 $\max\Delta<1.5$ mm,误差在允许范围之内,关节变量拟合函数可以准确实现最优搬运轨迹。

4 搬运机器人试验与分析

由于机器人智能化程度较高,机械手臂自由度较多,以及受到工厂内部其他因素影响,仅依靠理论模型难以达到最优工作状态,因此在理论研究的基础上,研制了参数可调的植物工厂育秧平台以及搬运机器人样机,验证运动学解的准确性及样机工作效果。

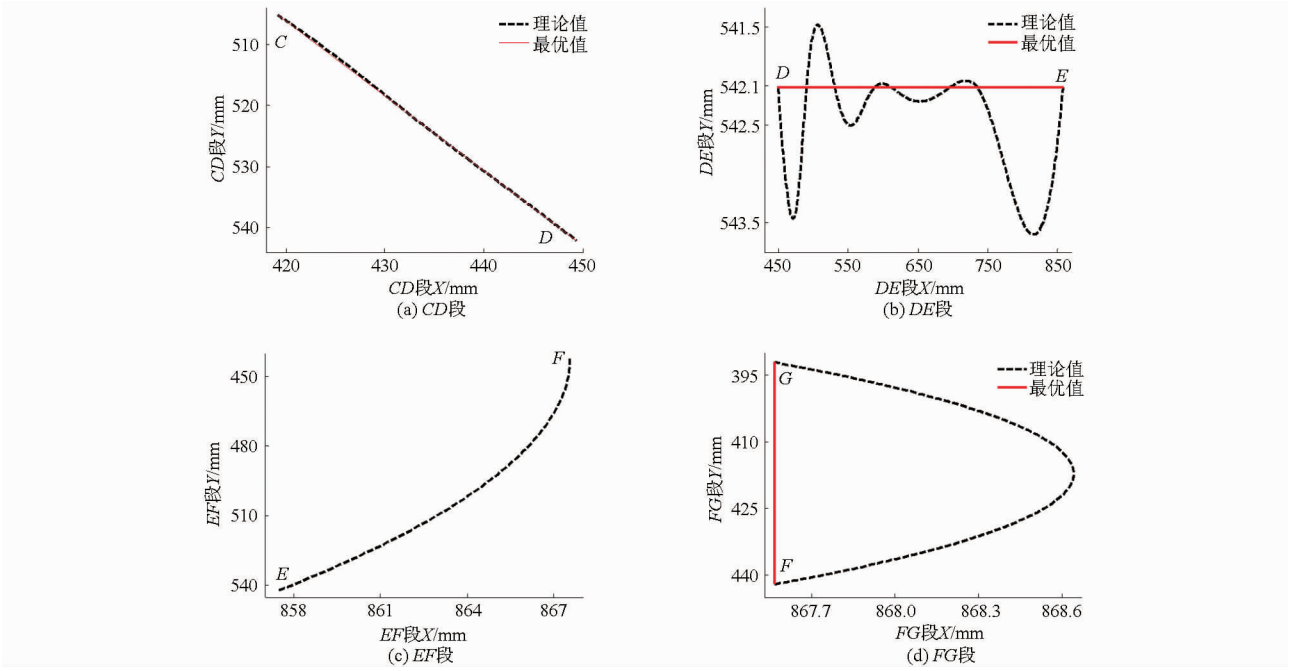


图 9　末端质心在 *CG* 段运动轨迹

Fig. 9　Movement path of center of terminal mass in *CG* period

4.1　搬运机器人实体研制与控制系统搭建

用钢材、铝材搭制机器人样机如图 10 所示，并在实验室环境下搭建了小型植物工厂，为搬运机器人提供试验平台。

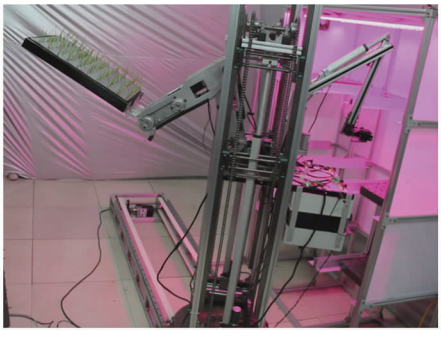


图 10　立体式智能搬运机器人实体

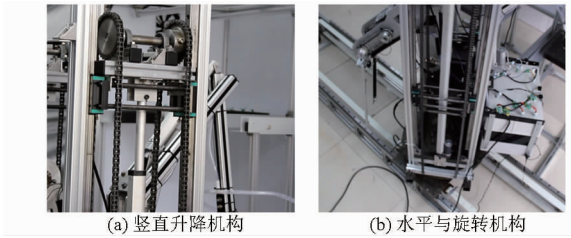
Fig. 10　Physical figure of intelligent handling robot in vertical space

机器人采用机器视觉反馈控制模式，苗况信息智能决策系统通过视觉系统实时采集苗况信息，并将所采集信息传送至计算机数据参数协调中心，经过计算机的数据处理产生决策信息并传送至控制中心，控制机械手臂完成工作任务。

4.2　搬运机器人试验与分析

在实验室环境下，用仿真苗盘模拟不同生长状态的秧苗，采用滑切式最优搬运模式，进行了 100 次搬运试验，包括苗盘不同层间的搬移和不同区域的搬移，搬运效果良好，没有出现伤苗现象，试验表明，机器人的机械机构、控制算法具有较高的可靠性，机器人搬运成功率大于 99%，平均搬运效率是人工的 200%，层数越高搬运效率越高，有力地解决了狭小空间内人工搬运困难的问题。

图 11a、11b 分别为竖直升降机构、水平与旋转机构实体试验，此 3 个自由度均采用欧姆龙 E3S－GS30E4 型对射光电传感器精确定位，接通延时小于 1.5 ms，定位误差小于 1.2 mm，可以准确地将机械手臂平台运送到指定位置。



(a) 竖直升降机构　　(b) 水平与旋转机构

图 11　机器人主体移动实体试验

Fig. 11　Physical experiments of sliding handle-model

为验证运动学逆解的准确性及其误差，采用高速摄像技术记录机械手臂末端质心运动轨迹，与理论最优轨迹进行对比，图 12 所示为滑切式搬运模式搬运机械手臂实体试验。

在手臂侧面架设高速摄像系统，试验用高速摄像为 KODAK 公司生产的彩色 CCD 摄像机，本文运动轨迹拍摄分辨率为 512 像素 ×480 像素，帧速为 125 帧/s，试验平台由 2 个 1 kW 强光进行照射，并借助配套的软件进行记录分析，对机械手臂运动过程中末端质心位置进行标记，获得 *X* 轴方向及 *Y* 轴方向坐标[24－25]。图 13 中虚线和实线分别代表机械手臂末端质心试验实际轨迹和最优轨迹。

搬运机械手臂实际轨迹与最优轨迹基本一致，*Y* 向最大绝对误差为 8 mm，产生误差原因主要有：

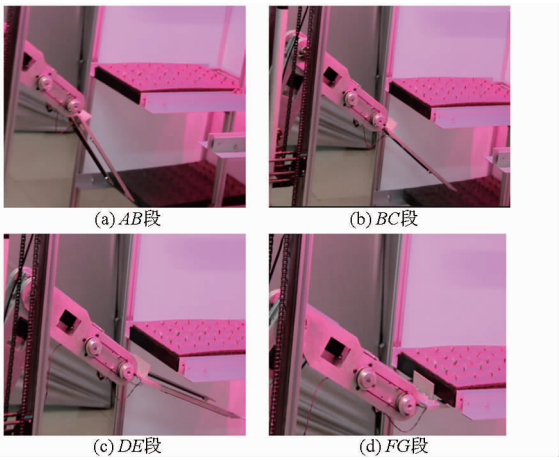


图 12 滑切式搬运模式实体试验

Fig. 12 Physical experiments of sliding handle-model

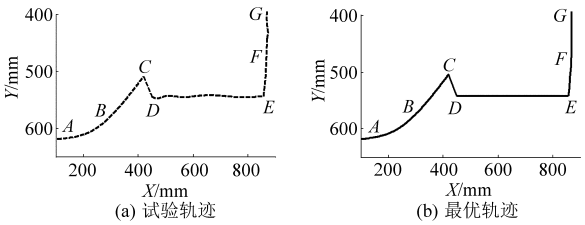


图 13 试验轨迹与理论轨迹

Fig. 13 Test track and academic track

①机械手臂加工误差、减速器间隙。②插值拟合算法的局限性。③摄像头与机械手臂运动平面不垂直造成试验误差。相对于焊接机器人等对末端轨迹精度要求较高的机器人,搬运作业对末端质心轨迹精度要求较低,允许存在一定误差,样机测试轨迹与最优规划轨迹相符,表明该机器人运动学逆解的准确性,达到了预期要求,可以完成植物工厂内所需的作业功能。

5 结论

(1)将农业工程学和机器人学相结合,提出了一种基于植物工厂化的立体式智能搬运机器人,并对机器人机构进行了原理分析。

(2)采用 D-H 法,建立了机器人连杆坐标系及相邻连杆的齐次变换矩阵,求解了机械手臂的有效作业空间,可以完全覆盖苗盘区域,并结合机器人小空间内大范围作业需求和植物工厂立体式培育特点,规划出了最优搬运轨迹路线,求解运动学逆解,采用三次样条插值拟合各关节变量随时间的变化函数。

(3)设计控制系统并研制实体进行试验,试验结果表明,机器人搬运成功率大于 99%,平均搬运效率是人工的 200%,解决了狭小空间内人工搬运困难的问题。采用高速摄像技术记录搬运机械手臂实际运动轨迹,试验结果和理论最优结果相符,最大绝对误差为 8 mm,在误差允许范围内,可以满足植物工厂苗盘搬运的作业需求。

参 考 文 献

1 仝宇欣. 设施农业的技术革命——人工光植物工厂[J]. 科技导报, 2014, 32(10): 84.

2 杨其长. 植物工厂的发展策略[J]. 科技导报, 2014, 32(10): 20-24.
Yang Qichang. Developmental strategy of plant factory [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(10): 20-24. (in Chinese)

3 杨其长,张成波. 植物工厂概论[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2005.

4 刘继展,刘炜,毛罕平,等. 面向立柱栽培的移栽机器人设计与协调运动仿真[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 48-53.
Liu Jizhan, Liu Wei, Mao Hanping, et al. Design and coordinated motion simulation transplanting robot for column cultivation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 48-53. (in Chinese)

5 杨丽,刘长青,张铁中. 双臂蔬菜嫁接机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 175-181.
Yang Li, Liu Changqing, Zhang Tiezhong. Design and experiment of vegetable grafting machine with double manipulators [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 175-181. (in Chinese)

6 褚佳,张铁中. 葫芦科营养钵苗单人操作嫁接机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 259-264.
Chu Jia, Zhang Tiezhong. Design and experiment of vegetable grafting robot operated by one-person for cucurbitaceous seeding cultivated in humus pots [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 259-264. (in Chinese)

7 姜凯,郑文刚,张骞,等. 蔬菜嫁接机器人研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 8-14.
Jiang Kai, Zheng Wen'gang, Zhang Qian, et al. Development and experiment of vegetable grafting robot [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 8-14. (in Chinese)

8 张俊峰,李敬亚,张衍林,等. 山地果园遥控单轨运输机设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 90-95.
Zhang Junfeng, Li Jingya, Zhang Yanlin, et al. Design of remote control monorail transporter for mountainous orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 90-95. (in Chinese)

9 欧阳玉平,洪添胜,苏建,等. 山地果园牵引式双轨运输机断绳制动装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 22-29.
Ouyang Yuping, Hong Tiansheng, Su Jian, et al. Design and experiment for rope brake device of mountain orchard traction double-track transporter [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 22-29. (in Chinese)

10 李善军,邢军军,张衍林,等. 7YGS－45 型自走式双轨道山地果园运输机［J］. 农业机械学报, 2011, 42(8)：85－88.
Li Shanjun, Xing Junjun, Zhang Yanlin, et al. 7YGS－45 type self-propelled dual-tack mountain orchard transport［J］. Transactions of the CSAE, 2011, 42(8)：85－88.（in Chinese）

11 高占文. 水稻秧苗搬运机械发展研究［J］. 农业科技与装备, 2014(12)：46－48.
Gao Zhanwen. Research on the development of rice seeding handling machinery［J］. Agriculture Science & Technology and Equipment, 2014(12)：46－48.（in Chinese）

12 辜松,杨艳丽,张跃峰,等. 荷兰蔬菜种苗生产装备系统发展现状及对中国的启示［J］. 农业工程学报, 2013, 29(14)：185－194.
Gu Song, Yang Yanli, Zhang Yuefeng, et al. Development status of automated equipment systems for greenhouse vegetable seedlings production in Netherlands and its inspiration for China［J］. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14)：185－194.（in Chinese）

13 张良安,马寅东,单家正,等. 4 自由度含局部闭链式码垛机器人动力学优化设计［J］. 农业机械学报, 2013, 44(11)：336－341.
Zhang Liang'an, Ma Yindong, Shan Jiazheng, et al. Optimal dynamic design of 4-DOF palletizing robot with closed-chain［J］. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11)：336－341.（in Chinese）

14 付铁,李金泉,杨向东,等. 新型码垛机械手的动态载荷计算与选型［J］. 北京理工大学学报, 2008, 28(1)：24－28.
Fu Tie, Li Jinquan, Yang Xiangdong, et al. Dynamic computation and type-selection design of palletizing manipulator［J］. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(1)：24－28.（in Chinese）

15 蔡自兴. 机器人学［M］. 北京：清华大学出版社, 2009.

16 张立勋,于凌涛,赵继亮,等. 基于微创外科手术机器人操作手的夹持灵活度研究［J］. 机器人, 2009, 31(3)：197－203.
Zhan Lixun, Yu Lingtao, Zhao Jiliang, et al. On clamping dexterity of minimally invasive surgical robot manipulator［J］. Robot, 2009, 31(3)：197－203.（in Chinese）

17 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 Haibo, 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）

18 曹毅,王树新,邱燕,等. 面向灵活工作空间的显微外科手术机器人设计［J］. 机器人, 2005, 27(3)：220－225.
Cao Yi, Wang Shuxin, Qiu Yan, et al. Dexterous workspace oriented design of robotic manipulators for microsurgery［J］. Robot, 2005, 27(3)：220－225.（in Chinese）

19 张建中. 蒙特卡洛方法［J］. 数学的实践与认识, 1974, 42(1)：28－40.

20 朱德峰. 水稻机插育秧技术［M］. 北京：中国农业出版社, 2010.

21 陈鹏,刘璐,余飞,等. 一种仿人机械臂的运动学逆解的几何求解方法［J］. 机器人, 2012, 34(2)：211－216.
Chen Peng, Liu Lu, Yu Fei, et al. A geometrical method for inverse kinematics of a kind of humanoid manipulator［J］. Robot, 2012, 34(2)：211－216.（in Chinese）

22 郭伟斌,陈勇,侯学贵,等. 除草机器人机械臂的逆向求解与控制［J］. 农业工程学报, 2009, 25(4)：108－112.
Guo Weibin, Chen Yong, Hou Xuegui, et al. Inverse kinematics solving and motion control for a weeding robotic arm［J］. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4)：108－112.（in Chinese）

23 李宪华,郭永存,张军,等. 模块化六自由度机械臂逆运动学解算与验证［J］. 农业机械学报, 2013, 44(4)：246－251.
Li Xianhua, Guo Yongcun, Zhang Jun, et al. Inverse kinematics solution and verification of modular 6-DOF manipulator［J］. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4)：246－251.（in Chinese）

24 王金峰,王金武,何剑南. 深施型液态施肥装置施肥过程高速摄像分析［J］. 农业机械学报, 2012, 43(4)：55－59.
Wang Jinfeng, Wang Jinwu, He Jiannan. High-speed capture analysis of fertilization process for deep-fertilization liquid fertilizer device［J］. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4)：55－59.（in Chinese）

25 陈建能,周丽莎,王英,等. 步行式插秧机等径凸轮强制推秧装置反求设计与试验［J］. 农业机械学报, 2013, 44(8)：69－73.
Cheng Jianneng, Zhou Lisha, Wang Ying, et al. Reverse design and experiment of walking-type rice transplanter with equal-diameter cam seeding-pushing mechanism［J］. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8)：69－73.（in Chinese）