

除草机器人机械臂的逆向求解与控制

郭伟斌^{1,2,3}, 陈勇^{1*}, 侯学贵¹, 胡娜¹

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 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; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 设计了一种基于机器视觉导航和杂草识别的除草机器人模型, 该机器人能沿作物行间自主行走并能准确地识别和“清除”杂草。设计了除草机器人的机械臂除草执行系统, 求取了机械臂运动学逆解, 用 VC++ 开发了控制程序。试验显示, 图像处理算法所需时间少, 能够适应户外自然光线在一定范围的变化, 机械臂能够平稳动作并精确定位杂草目标。

关键词: 机器人编程, 机器视觉, 运动学逆解, 机械臂控制, 除草

中图分类号: TP242, S451.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-4-0108-05

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 with English abstract)

0 引言

随着农业劳动力成本的提高, 发达国家广泛开展了农业机器人研究。近年, 又开始了对除草机器人的研究。瑞典、丹麦、荷兰^[1,2]等欧洲国家以及美国、日本^[3,4]等开展了杂草识别和除草机构的研究。国内对于除草机器人的研究正在起步, 南京林业大学^[5,6]提出了构建自主除草机器人的设想并设计了原理样机, 通过试验完成了机械臂的运动控制^[7]。江苏大学则开展了割草机器人的避障行为以及组合导航研究^[8]。

美国加利福尼亚大学研究出一种基于机器视觉的除草机器人^[9], 该机器人可以识别杂草目标, 并控制喷头定点喷药。丹麦科学家利用机器视觉系统根据形态特征识别杂草, 再采用机械方法除草。瑞典 Halmstad 大学也设计出了用机械方法除草的移动机器人^[10]。该机器人在沿着农作物行方向行进过程中识别并“铲除”行间杂草。丹麦 Sørensen, Claus G 等详细论证了除草机器人开发的经济及技术可行性^[11,12]。

本文提出了基于小型车模的移动除草机器人, 该机器人通过导航摄像头沿“作物”行间自主行走, 并且可以通过“直接施药”的方法有选择地控制机械臂除草。机器人发现杂草目标后停下来执行除草任务, 完成后继续前行。本文着重探讨了系统总体设计, 以及机械臂的运动控制。

1 除草机器人构成

除草机器人硬件部分由本体、多关节机械臂、末端执行器以及摄像头等组成。软件部分包括导航控制和杂草检测。摄像头拍摄的图片送 PC 机处理, 所得结果分别用于控制本体自主行走和机械臂定点除草。

如图 1 所示, 机器人本体高 150 mm, 长 375 mm, 宽 307 mm。机械臂由转动圆板、上臂、前臂和手等组成, 各关节由伺服电机驱动, 手部固定的末端执行器切割杂草并涂抹除草剂。

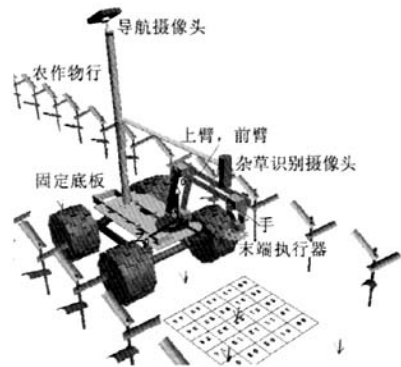


图 1 除草机器人模型

Fig.1 Prototype of the weeding robot

2 机械臂的逆运动学求解

除草机器人的工作范围为一个 300×300mm 的正方形, 编号为 00 到 44 的 25 个有效方格区域。

2.1 机械臂模型和 Denavit-Hartenberg 坐标系的建立

如图 2a, 固定底板为零杆 (基座), 转动圆板为 1 杆, 上臂、前臂和手分别简化成 2 杆、3 杆和 4 杆。简化模型中基系 S_0 的坐标原点 O_0 位于转动圆板中心正下方 30 mm

收稿日期: 2007-01-31 修订日期: 2009-02-27

基金项目: 江苏省国际科技合作项目 (BZ2005044); 教育部留学回国人员科研启动基金资助

作者简介: 郭伟斌 (1982—), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 研究方向为机器人技术。南京 南京林业大学机械电子工程学院, 210037

*通讯作者: 陈勇, 教授。南京市龙蟠路 159 号 南京林业大学机械电子工程学院, 210037. Email: chen Yongnj@sohu.com

处，建立的坐标系如图 2b 所示。定义 L_i 为 i 杆杆长，B 向表示俯视，其余为侧视。

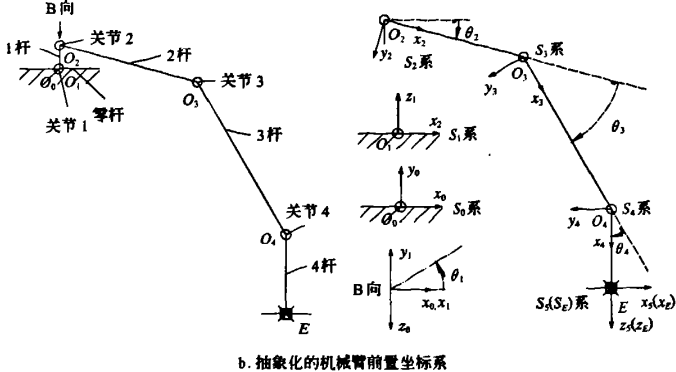


图 2 机械臂原型和坐标系的建立
Fig.2 Prototype and coordinates of the robotic arm

2.2 位姿变换矩阵的求取

由图 2 得到 D-H (Denavit-Hartenberg) 参数如表 1。

表 1 前置坐标系下的 D-H 参数

Table 1 D-H parameters in the pre-positive coordinate

i	扭角 $\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	杆长 a_{i-1}	偏距 d_i	转角 θ_i
1	-90	0	0	θ_1
2	-90	0	0	θ_2
3	0	L_2	0	θ_3
4	0	L_3	0	θ_4

写出 j 系对 k 系的齐次变换矩阵 T_j^k ：

$$\begin{aligned} T_1^0 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_1 & -\cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_2^1 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_3^2 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_4^3 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & L_3 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_5^4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & L_4 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

用 S 代替 $\sin \theta$ 、 C 代替 $\cos \theta$ 、 S_{θ_k} 代替 $\sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ 、 C_{θ_k} 代替 $\cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ 来简化描述。

末端执行器 E 点的齐次坐标矩阵：

$$\begin{bmatrix} x_E \\ y_E \\ z_E \\ 1 \end{bmatrix} = T_4^0 \cdot \begin{bmatrix} L_4 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_4 \cdot C_1 \cdot C_{234} + L_3 \cdot C_1 \cdot C_{23} + L_2 C_1 \cdot C_2 \\ -L_4 \cdot S_{234} - L_3 \cdot S_{23} - L_2 \cdot S_2 \\ -L_4 \cdot S_1 \cdot C_{234} - L_3 \cdot S_1 \cdot C_{23} - L_2 \cdot S_1 \cdot C_2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

研究中，末端执行器工作时垂直地面，故只需得到其在基系 S_0 中的位置，不必建立标识其姿态的 $S_5(S_E)$ 系，从而可简化为取 O_4 作为逆解目标点。用 AutoCAD 建模得到工作区域划分的各方格对应的末端执行器中心 E 点在基系 S_0 中的期望坐标值(E_x, E_y, E_z)，如表 2 所示。

2.3 逆运动学参数的求取

机械臂各杆长为： $L_1=30 \text{ mm}$ ， $L_2=180 \text{ mm}$ ， $L_3=220 \text{ mm}$ ， $L_4=100 \text{ mm}$ 。

1) 求 θ_1 ：用 $(T_1^0)^{-1}$ 左乘等式 $T_4^0 = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \cdot T_4^3$ 的两边^[13]得：

$$\begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & 0 \\ -S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = T_4^1 \quad (1)$$

式中 n 、 o 、 a 、 p ——分别代表机械臂末端的法向矢量、方位矢量、接近矢量和位置矢量。

由式 (1) 两端矩阵元素 (2, 4) 相等求得 θ_1 ， θ_1 的求解验证了解析法和几何法的同一性，研究中只需选取一组解。

2) 求 θ_3 ：选定 θ_1 一组解后，令方程 (1) 两端矩阵元素 (1, 4) 和 (3, 4) 分别相等，化简得到 C_3 ，求得 θ_3 。

3) 求 θ_2 ：对 (b) 步骤中得到的方程变换后，代入 θ_3 和 θ_1 ，化简得到 C_2 ，求得 θ_2 。

4) 求 θ_4 ：在 AutoCAD 中模拟机械臂对空间某点实施定位，会产生 2 种位姿型态。据模型的几何关系并将 θ_2 、 θ_3 代入，可求得 θ_4 。鉴于在模型中的结论和可能引起的干涉、力学稳定性等，舍弃第 2 组解。各方格区域对应的关节转角如表 2 中的 θ_i 数据。

3 除草机器人控制试验

3.1 机械臂运动控制的实现

求逆解的最终目的就是通过期望的位姿求解机械臂的转角，而对机械臂的运动控制是通过伺服电机的控制来实现的。需要把已经求解的机械臂转角参数转换为伺服电机的控制脉冲。设计中采用 HS-475HB 型伺服电

机，以脉冲 1500 作为平衡位置 0°，转角范围为-90°~90°，与对应脉冲 500~2500 呈线性关系。求解时，需要根据电机的安装特性对机械臂的转角和电机转角作相应的转换，限于篇幅，在此不作赘述。求得的工作区域中各方格对应的伺服电机控制参数 P_i (P_i 代表转换后的 i 电机控制脉冲数) 如表 2 所示。

表 2 各关节转角和伺服电机的转动参数
Table 2 Joint angles and the rotating parameters of the servo motors

区域编号	(E_x, E_y, E_z)	$\theta_1(^{\circ})$	P_1	$\theta_2(^{\circ})$	P_2	$\theta_3\theta_4(^{\circ})$	P_3	$\theta_4(^{\circ})$	P_4
00	(382.5,-90,-120)	17	1311	3	2033	0	2500	93	1867
01	(382.5,-90,-60)	9	1400	-18	1800	29	2178	79	1711
02	(382.5,-90,0)	0	1500	-16	1822	34	2122	72	1633
03	(382.5,-90,60)	-9	1600	-18	1800	29	2178	79	1711
04	(382.5,-90,120)	-17	1689	3	2033	0	2500	93	1867
10	(322.5,-90,-120)	20	1278	-36	1600	62	1811	64	1544
11	(322.5,-90,-60)	11	1378	-41	1544	70	1722	61	1511
12	(322.5,-90,0)	0	1500	-37	1589	73	1689	54	1433
13	(322.5,-90,60)	-11	1622	-41	1544	70	1722	61	1511
14	(322.5,-90,120)	-20	1722	-36	1600	62	1811	64	1544
20	(262.5,-90,-120)	25	1222	-52	1422	88	1522	54	1433
21	(262.5,-90,-60)	13	1356	-56	1378	96	1433	50	1389
22	(262.5,-90,0)	0	1500	-51	1433	98	1411	43	1311
23	(262.5,-90,60)	-13	1644	-56	1378	96	1433	50	1389
24	(262.5,-90,120)	-25	1778	-52	1422	88	1522	54	1433
30	(202.5,-90,-120)	31	1156	-65	1278	109	1289	46	1344
31	(202.5,-90,-60)	17	1311	-71	1211	117	1200	44	1322
32	(202.5,-90,0)	0	1500	-64	1289	120	1167	34	1211
33	(202.5,-90,60)	-17	1689	-71	1211	117	1200	44	1322
34	(202.5,-90,120)	-31	1844	-65	1278	109	1289	46	1344
40	(142.5,-90,-120)	40	1056	-77	1144	126	1100	41	1289
41	(142.5,-90,-60)	23	1244	-86	1044	136°	989	40	1278
42	(142.5,-90,0)	0	1500	-77	1144	139	956	27	1133
43	(142.5,-90,60)	-23	1756	-86	1044	136	989	40	1278
44	(142.5,-90,120)	-40	1944	-77	1144	126	1100	41	1289

利用 VC++开发了运动控制程序，通过 Lynx motion 公司的 SSC-32 型控制板控制多关节机械臂动作。杂草识别摄像头拍摄的图像经 USB 采集到 PC 机控制系统中，处理得到的结果经串口与伺服控制板通信并实现对机械臂的控制。控制试验显示，该机械臂能够平稳运动并精确定位杂草目标^[14]。

3.2 除草机器人导航线和杂草识别试验

为降低成本，采用了 3COM (美国) 公司和环宇飞扬 (北京) 公司 USB 接口摄像头分别进行导航和杂草图

像的获取。采用 IBM 1834KCC 型便携式计算机，主频为 116GHz，内存为 256MB，软件系统基于 Visual C++开发，提出了利用杂草颜色特征在 RGB 空间直接将杂草从土壤背景中区分出来的图像分割算法。导航识别利用优化的 Hough 变换检测出农作物行中心线，根据摄像头姿态和透视变换原理确定除草机器人位姿。杂草检测与导航线检测结果如图 3、图 4 所示。试验具体数据及可行性分析请参见文献[15]。

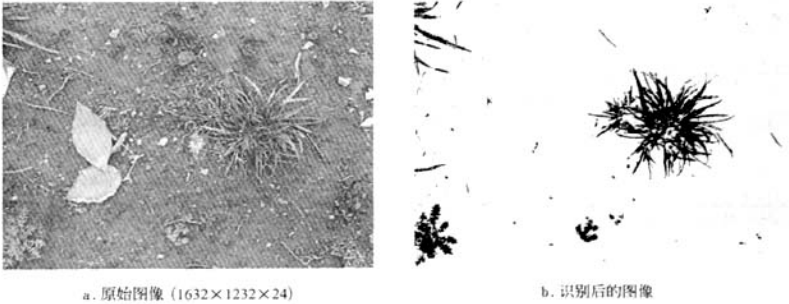


图 3 杂草检测
Fig.3 Weeds recognition

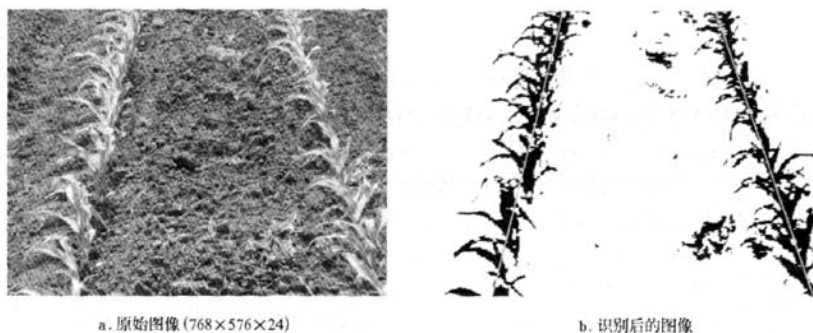


图4 导航线检测

Fig.4 Navigation detection

4 结 论

设计制作了一种由廉价组件构成的除草机器人模型,用 Visual C++开发了机器人控制程序。通过数学解析和几何建模结合的方法简化了求逆解的运算。获得了控制机械臂的参数,并分析其运动控制问题。试验表明,图像分割算法所需时间少,处理一幅分辨率为 320×240 的图像需要 108 ms,并能够适应户外自然光线变化;运动控制实现了机械臂对目标的准确定位;导航识别运算时间少,并保证了较高的位姿计算精度。

[参 考 文 献]

- [1] Jacobsen B H, Madsen N, Ørum J E. Organic farming at the farm level-scenarios for the future development[R]. Copenhagen: Food and Resource Economic Institute, 2005.
- [2] Fredrik Fogelberg. Research on pest control and pesticide reduction in Sweden, Denmark and the Netherlands-ongoing work and new ideas for the future[R]. Uppsala: Department of Agricultural Engineering in Swedish University, 2001.
- [3] Blackmore B S, Stout W, Wang M, et al. Robotic agriculture-the future of agricultural mechanization[A]. J Stafford, V. 5th European Conference on Precision Agriculture[C], The Netherlands, Wageningen Academic Publishers. 621-628.
- [4] Terawaki M, Kataoka T, Okamoto H, et al. Development of automatic weeding thinner for sugar beet[A]. 2003 ASAE Annual International Meeting[C]. Las Vegas, USA, Hokkaido University, 60-66.
- [5] 陈 勇, 田 磊, 郑加强. 基于直接施药方法的除草机器人[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 91-93.
Chen Yong, Tian Lei, Zheng Jiaqiang. Development of weeding robot based on direct herbicide application method [J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 91-93. (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈 勇. 自动施药机器人及可变量控制系统研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2005.
Chen Yong. Researches on Autonomous Robot for Weed Control and Smart Spray System Based on Variable Rate Technology[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈 勇, 郑加强, 郭伟斌. 除草机器人机械臂运动分析与控制[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 105-108.
Chen Yong, Zheng Jiaqiang, Guo Weibin. Kinematics analysis and motion control for a weeding robotic arm[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 105-108. (in Chinese with English abstract)
- [8] 邱白晶, 钱国宏, 周 宁, 等. 割草机器人避障控制[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2005, 26(4): 285-288.
Qiu Baijing, Qian Guohong, Zhou Ning, et al. Avoiding barriers control of mowing robot[J]. Journal of Jiangsu University (National Science Edition), 2005, 26(4): 285-288. (in Chinese with English abstract)
- [9] Lee W S, David C S, Giles D K. Robotic weed control system for tomatoes[J]. Precision Agriculture, 1999, 1(1): 95-113.
- [10] Astrand B, Baerveldt A J. An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control[J]. Autonomous Robots, 2002, 13(1): 21-35.
- [11] Sørensen C G, Nørremark M, Jørgensen R N, et al. Hortibot: Feasibility study of a plant nursing robot performing weeding operations -part IV[A]. 2007 ASABE Annual Meeting[C]. Minneapolis, Minnesota, 2007: 1-12.
- [12] Sørensen C G, Michael N, Jørgensen R N, et al. User-centered and conceptual technical guidelines of a plant nursing robot[A]. 2008 ASABE Annual Meeting, Providence[C]. USA, the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2008.
- [13] 马香峰. 机器人机构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [14] 郭伟斌. 除草机器人设计与控制[D]. 南京: 南京林业大学, 2008.
Guo Weibin. Researches on design and control of the weeding robot[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [15] 侯学贵, 陈 勇, 郭伟斌. 除草机器人田间机器视觉导航[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 106-108.
Hou Xuegui, Chen Yong, Guo Weibin. Machine vision based navigation for a weeding robot[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 106-108. (in Chinese with English abstract)

Inverse kinematics solving and motion control for a weeding robotic arm

Guo Weibin^{1,2,3}, Chen Yong^{1*}, Hou Xuegui¹, Hu Na¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A weeding robot model based on machine vision was constructed. The robot could detect and remove weeds by walking autonomously along crop rows. The weeding robotic arm was designed and its inverse kinematics solution was analyzed. Computer programs for robot control were compiled. Experiments showed that the image processing algorithm was timesaving and robust for the lightness variation; the weeding robotic arm could move steadily and orient weeds precisely.

Key words: robot programming, computer vision, inverse kinematics, robotic arm control, weeding