一种新型农业机械臂的运动学分析

陈谊超

（耐世特汽车系统（柳州）有限公司，广西柳州 545006）

摘要：针对目前果蔬采摘时机械臂工作空间小和承载能力低的不足，提出了一种工作空间范围大且有较高承载能力的新型农业机械臂。机械臂是一种串并联混合机构，具有平面内转动和移动 2 个自由度，能够实现在较大活动范围内对果蔬的采摘功能。本文首先对机构的组成和自由度进行了分析，并在此基础上，基于闭式运动链子组件法对机构的运动学正反解进行了分析，从而预测机械臂在工作时的空间范围。最后，求解了 5 组机械臂的正反解分析数值算例，验证求解方法和结果的正确性。结果表明，机械臂的工作空间可实现较大范围内的水平移动，为此类机构的分析提供了新的设计思路和参考。

关键词：机械设计；运动学分析；闭式运动链子组件；农业机械臂

中图分类号：TH112.1　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674-2850(2021)01-0008-06

Kinematics analysis of a new agricultural robot arm

CHEN Yichao

(*Nexteer Automotive Systems* (*Liuzhou*) *Co*., *Ltd*., *Liuzhou*, *Guangxi* 545006, *China*)

Abstract: The objective of this study is to propose a new agricultural robot arm with large workspace and high bearing capacity, aiming at the shortage of small workspace and low bearing capacity of the robot arm when picking fruits and vegetables. The robot arm is a series and parallel mixing mechanism and has two degrees of freedom: a motion and a rotation in the plane, which can realize the function of picking fruits and vegetables in wide activity range. Firstly, the composition and degree of freedom of the mechanism were analyzed. And on this basis, the positive and negative kinematics solutions of the mechanism were analyzed by using the closed motion-chain module method to predict the space range of the robot arm at work. Finally, five sets of positive and negative solution analysis numerical examples of the robot arm were given to verify the correctness of the solution method and results. The results show that the workspace of the robot arm can move horizontally in a large range, which provids a new design idea and reference for the analysis of this kind of mechanism.

Key words: mechanical design; kinematics analysis; closed motion-chain module; agricultural robot arm

0 引言

农业作业一般劳动强度大、工作环境恶劣，且容易使人体产生疲劳，导致生产效率低下。其次，由于种植环境限制，农作物收获一般是露天作业，尤其在晴天进行，长时间的户外作业会对劳动者的身体健康造成伤害。因此，农业机器人是一种潜在的社会需求，具有较好的市场发展前景。依靠机器人作业，不仅可以提高工作效率，减少人力、物力消耗，而且在高强度和重复性作业的工况下，劳动者劳动强度低。此外，机器人的关键组成部分是机械臂。机械臂是机器人完成预定动作的执行部分，即实现目标作业的部件。很多学者对于不同用途和不同结构的机械臂做了大量研究工作。冯青春等[1]设计了黄瓜采摘机械臂，且对该机械臂进行了结构优化和运动学分析。陶进伟等[2]对采摘机械臂展开了运动学分析。另

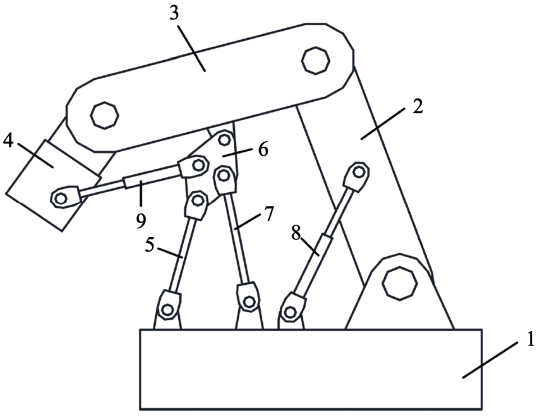
作者简介：陈谊超（1985—），男，工程师，主要研究方向：机械设计与制造. E-mail: yichao.chen@nexteer.com

外，李伟等[3]对苹果采摘机械臂进行了优化设计，并采用 ADAMS 和 Matlab 对其进行了仿真验证。傅隆生等[4]设计了一种用于猕猴桃无损采摘的机械臂，且通过试验验证了该机械臂能实现无损采摘。王红军等[5]提出了香蕉采摘抓取机械臂，构建了其三维模型，并且用 ADAMS 验证了方案的可行性。 此外，赵东辉等[6]利用自动控制技术提出了多手臂水果采摘装置。靳龙等[7]应用 CAD 变量几何法对机械臂进行了运动学分析。

为解决目前果蔬采摘时机械臂工作空间小和承载能力低的不足，本文提出一种新型农业机械臂，其可以实现在较大的工作空间内对果蔬进行采摘，为此类机构的分析提供新的设计思路和参考。

1 机构的组成与自由度分析

机构的组成与自由度是机构分析的基础。本研究提出了一种新型机械臂，如图 1 所示。该机械臂由以下几部分组成：机架、大臂和小臂、末端执行器、摇杆和连杆、大臂油缸 s_1 和末端油缸 s_2. 机构的联接关系如下：首先，机架（1）与大臂（2）的一端铰接；其次，大臂另一端与小臂（3）铰接，同时小臂的另一端与末端执行器（4）铰接；再次，末端执行器的另一端通过末端油缸（9）与连杆（6）的一端铰接；连杆的另一端与摇杆（5）铰接，摇杆（5）的另一端与机架（1）铰接；此外，连杆（6）的另一部位与摇杆（7）铰接，摇杆（7）的另一端与机架（1）的一部位铰接；最后，大臂油缸（8）的一端与机架（1）铰接，另一端与大臂（2）的一部位铰接。



注：1—机架；2—大臂；3—小臂；4—末端执行器；5，7—摇杆；6—连杆；8—大臂油缸 s_1；9—末端油缸 s_2

图 1 机械臂的三维模型

Fig. 1 3D model of the robot arm

为便于自由度求解，绘制了机械臂的机构示意图（如图 2 所示）。机构的自由度计算公式[8]表示为

$$F = 3n - \left(2P_{\mathrm{L}} + P_{\mathrm{H}}\right), \tag{1}$$

其中，n 为活动构件数目；P_{L} 为低副数目；P_{H} 为高副数目。在该机构中，相应的构件、低副和高副的数目依次为：$n=10$，$P_{\mathrm{L}}=14$ 和 $P_{\mathrm{H}}=0$. 将以上数据代入自由度计算公式（1），即可求得该机构具有 2 个运动自由度。因此，该机构的末端执行器（4）具有完成平面内的一个移动和一个转动自由度的功能，可满足机械臂采摘空间的作业要求。

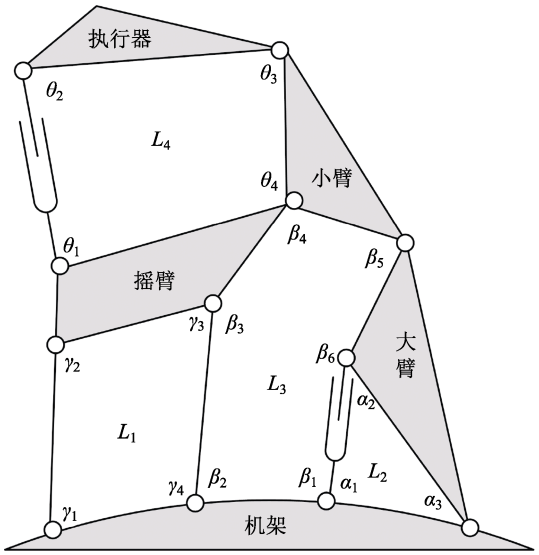
2 机构的运动学正反解分析

运动学分析是验证机构合理性的依据。机构运动学分析的首要环节是确定主动输入构件与从动输出构件之间有确定运动关系，这是运动学分析的本质，也是实现机构可控操作的基础。由图 2 可知，该机械臂属于一种多杆串并联混合机构，本文拟采用解析法对此机构进行运动学求解。但是，直接基于解析法对多杆混联机构进行运动学求解是比较困难的，且需要耗费大量时间。为将复杂问题简单化，本文基于将闭式运动链作为子系统的求解思想，将机械臂看成是由 4 个子组件组成的系统。依次对 4 个简单的子组件进行求解，然后再以各组件之间的几何关系为基础，推导出机械臂的运动学正反解。为方便求解，本文建立了如图 3 所示的直角坐标系。

2.1 运动学正解分析

运动学正解问题是已知机构的输入参数求输出参数的过程。在本研究中，拟将机构的油缸驱动尺寸

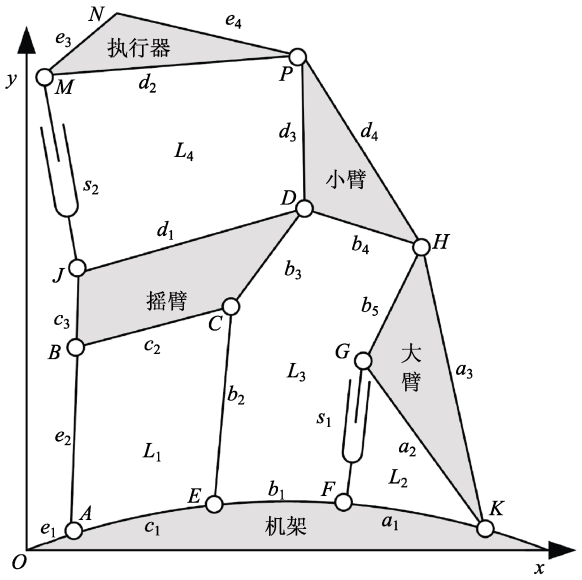
作为已知输入量，通过给定的驱动尺寸对末端执行器的位置和姿态进行求解，从而预测机械臂的工作情况，说明机构设计的合理性。根据提出的分析思想，机构由4个子组件构成。首先，依次进行4个子组件（闭式运动链）运动学的正解分析；然后，基于各个子组件之间的几何关系推导出整个机械臂的运动学正解。具体求解过程如下。



注：L_i(i=1,2,3,4)—闭式运动链；α_i(i=1,2,3)—闭式运动链 L_2 的几何夹角；β_i(i=1,2,3,4,5,6)—闭式运动链 L_3 的几何夹角；γ_i(i=1,2,3,4)—闭式运动链 L_1 的几何夹角；θ_i(i=1,2,3,4)—闭式运动链 L_4 的几何夹角

图 2 机械臂的结构图

Fig. 2 Structure diagram of the robot arm



注：α_i(i=1,2,3)、b_i(i=1,2,3,4,5)、c_i(i=1,2,3)、d_i(i=1,2,3,4)、e_i(i=1,2,3,4)、s_i(i=1,2)—各构件尺寸；A、B、C、D、E、F、G、H、J、K、M、P—转动副代码

图 3 机械臂的结构参数图

Fig. 3 Structural parameter diagram of the robot arm

1）闭式运动链 L_2

闭式运动链 L_2 属于平面四杆机构（如图2所示），其自由度数目为1. 动力由液压缸 s_1 提供，基于三角余弦定理可得

$$\cos\alpha_1 = \frac{a_1^2 + s_1^2 - a_2^2}{2a_1 s_1}, \tag{2}$$

同理求得 α_2、α_3.

2）闭式运动链 L_3

同样，闭式运动链 L_3 是一个具有3自由度的平面七杆机构。根据 L_2、L_3 之间的几何关系，可推出 L_2、L_3 之间的关系表达式为

$$\alpha_1 + \phi_3 + \beta_1 = 360°, \tag{3}$$

其中，ϕ_3 为机构的固定几何参数。因为 α_1 已经求出，所以当给定一个驱动角度 β_1 时，即可完成机械臂模块的求解。由余弦定理得

$$EG = \sqrt{b_1^2 + s_1^2 - 2b_1 s_1 \cos\beta_1}, \tag{4}$$

$$\angle FEG = \arccos\frac{b_1^2 + EG^2 - s_1^2}{2b_1 \cdot EG}, \tag{5}$$

$$\angle CEG = \arccos\frac{{b_2}^2 + EG^2 - CG^2}{2b_2 \cdot EG}, \tag{6}$$

$$\beta_2 = \angle FEG + \angle CEG. \tag{7}$$

同理得到 β_3、β_4、β_5，从而可完成对闭式运动链 L_3 的求解。此外，依据闭式运动链之间的几何传递关系，依次求得 L_1、L_4 闭式运动链，详细求解过程不再赘述。

3）整机运动学正解分析

在顺利完成机构各子系统的运动学正解分析后，现对整个系统进行分析。图 3 坐标系中，构件用矢量表示。基于矢量关系，可导出机构的封闭矢量多边形方程。此外，驱动件（油缸）的驱动尺寸 s_1 和 s_2 及各构件的长度作为已知量。假设 x 轴与 $\overrightarrow{OA}$、$\overrightarrow{AB}$、$\overrightarrow{BJ}$、$\overrightarrow{JM}$、$\overrightarrow{MN}$、$\overrightarrow{AE}$、$\overrightarrow{ED}$、$\overrightarrow{DP}$ 的夹角分别为 φ_1、φ_2、φ_3、φ_4、φ_5、φ_6、φ_7、φ_8，则

$$\begin{cases} x_A = e_1\cos\varphi_1, \\ y_A = e_1\sin\varphi_1, \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} x_B = x_A + e_2\cos\varphi_2, \\ y_B = y_A + e_2\sin\varphi_2, \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} x_M = c_3\cos\varphi_3 + s_2\cos\varphi_4, \\ y_M = c_3\sin\varphi_3 + s_2\sin\varphi_4, \end{cases} \tag{10}$$

最后，联立方程组（8）～（10），求出机构末端执行器的位置坐标和姿态角如式（11）所示。

$$\begin{cases} x = e_3\cos\varphi_5 + x_M, \\ y = e_3\sin\varphi_5 + y_M, \\ \psi = \varphi_5. \end{cases} \tag{11}$$

利用闭式运动链的子组件的求解思想，得到了整个机构的运动学的正解求解结果，求解过程顺利且耗时短，说明此方法对于多杆混联机构是可行的。

2.2 运动学反解分析

运动学反解是已知输出求输入，通过此问题的求解，可以对驱动件的驱动尺寸进行预测。该问题的已知条件为：末端执行器的位置和姿态。以此为基础，可求解出在给定输出条件下的两个驱动液压缸的驱动尺寸。具体求解过程如下：

$$\begin{cases} x_E = x_A + c_1\cos\varphi_6, \\ y_E = y_A + c_1\sin\varphi_6, \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases} x_P = x_E + l_{\overline{ED}}\cos\varphi_7 + d_3\cos\varphi_8, \\ y_P = y_E + l_{\overline{ED}}\sin\varphi_7 + d_3\sin\varphi_8, \end{cases} \tag{13}$$

$$\begin{cases} x_P = x - e_4\cos\psi, \\ y_P = y - e_4\sin\psi. \end{cases} \tag{14}$$

由式（12）～式（14）可求得 φ_7 和 φ_8，分别由 φ_7 和 φ_8 可以求出 β_2 和 β_4，从而求出两个液压缸的驱动尺寸。

2.3 具体求解验证示例

基于以上分析和求解过程，现给出具体的计算示例，以验证求解的正确性。以机构中相邻铰点之间

的尺寸值作为已知条件，具体的数值如表1所示。此外，各杆件之间的夹角关系如下：$\phi_1=100°$（e_1与c_1之间的夹角）；$\phi_2=120°$（c_1与b_1之间的夹角）；$\phi_3=140°$（a_1与b_1之间的夹角）；$\phi_4=45°$（e_1与x轴方向之间的夹角）；$\phi_5=50°$（a_2与a_3之间的夹角）。为验证和比对正反解求解结果，本文给定5组液压缸的长度尺寸（如表2所示）进行算例验证。该机械臂的末端执行器的位置坐标和姿态角的求解结果如表3所示（结果均保留整数）。最后，以表3中的5组末端执行器的位置和姿态作为机械臂反解的已知值，求解的两个液压缸的5组驱动尺寸如表4所示。在表3和表4都取整数值的情况下，由表2和表4的数值对比可知，两个液压缸的尺寸数值是完全一致的，表明上述运动学分析是正确的。

表1　相邻铰点间的尺寸（mm）

Tab. 1　Dimension between adjacent hinge points (mm)

i	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	i	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i
1	900	1 000	1 200	2 200	500	4	—	1 200	—	1 600	1 200
2	1 200	1 500	1 500	2 400	2 800	5	—	1 000	—	—	—
3	2 000	1 300	1 100	1 900	1 300						

表2　5组不同的液压缸驱动尺寸（mm）

Tab. 2　Five groups of hydraulic cylinder driving size (mm)

液压缸	5组尺寸值					液压缸	5组尺寸值				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
s_1	1 300	1 350	1 400	1 450	1 500	s_2	2 000	2 200	2 400	2 500	2 600

表3　铲斗的位置和姿态

Tab. 3　Position and attitude of bucket

液压缸	位置和姿态角			液压缸	位置和姿态角		
	x/mm	y/mm	ψ/°		x/mm	y/mm	ψ/°
1	–530	3 351	145	4	–659	4 560	201
2	–585	3 651	162	5	–759	4 962	235
3	–625	4 015	192				

表4　反解得到的液压缸驱动尺寸（mm）

Tab. 4　Driving size of hydraulic cylinder obtained from reverse solution (mm)

液压缸	5组尺寸值					液压缸	5组尺寸值				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
s_1	1 300	1 350	1 400	1 450	1 500	s_2	2 000	2 200	2 400	2 500	2 600

3　结论

为解决果蔬采摘时机械臂工作空间小和承载能力低的问题，本文提出了一种工作空间大和承载能力高的新型串并联混合机械臂。该机械臂具有一个移动自由度和一个转动自由度。为验证机构的合理性，本文基于子组件的解析法对该机构进行了运动学正解和反解分析。最后，给出了具体的验证算例，由此说明该机械臂的运动学正反解的求解过程和结果是正确的。求解方法有效且耗时短，也说明了在求解过程中运用的闭式运动链子组件求解思想是可行的。该求解思想对于求解较复杂的多杆混联机构比直接用解析法有更好的优势，使得求解问题更有序，从而为此类机构的分析提供了新的设计思路和参考。

[参考文献] (References)

[1] 冯青春，纪超，张俊雄，等. 黄瓜采摘机械臂结构优化与运动分析[J]. 农业机械学报，2010，41 (Z1): 244-248.
FENG Q C, JI C, ZHANG J X, et al. Optimization design and kinematic analysis of cucumber-harvesting-robot manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Z1): 244-248. (in Chinese)

[2] 陶进伟，林睿，王振华. 果蔬采摘机械臂运动学分析[J]. 机器人技术与应用，2015（1）：39-43.
TAO J W, LIN R, WANG Z H. Kinematics analysis of fruit and vegetable picking manipulator[J]. Robot Technique and Application, 2015(1): 39-43. (in Chinese)

[3] 李伟，李吉，张俊雄，等. 苹果采摘机器人机械臂优化设计及仿真[J]. 北京工业大学学报，2009，35（6）：721-726.
LI W, LI J, ZHANG J X, et al. Optimization design and simulations of the apple-picking-robot arm[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(6): 721-726. (in Chinese)

[4] 傅隆生，张发年，槐岛芳德，等. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报，2015，46（3）：1-8.
FU L S, ZHANG F N, HUAIDAO F D, et al. Development and experiment of end-effector for kiwifruit harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 1-8. (in Chinese)

[5] 王红军，李馨富，黄国钢，等. 香蕉采摘机械手抓取机构设计及仿真[J]. 湘潭大学自然科学学报，2012，34（3）：114-117.
WANG H J, LI X F, HUANG G G, et al. Design and simulation of crawl institutions for picking bananas manipulator[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2012, 34(3): 114-117. (in Chinese)

[6] 赵东辉，张慧. 基于自动控制技术的多手臂水果采摘装置的设计[J]. 农机化研究，2015（9）：135-138.
ZHAO D H, ZHANG H. Based on the automatic control of agricultural manipulator with many arms design[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(9): 135-138. (in Chinese)

[7] 靳龙，邱敏敏，胡迎春. 基于 CAD 变量几何法的采摘机器人运动学分析[J]. 农机化研究，2013（12）：52-55.
JIN L, QIU M M, HU Y C. Based on the CAD variable geometric method for solving kinematics analysis of harvesting robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(12): 52-55. (in Chinese)

[8] 高志. 机械原理[M]. 广州：华东理工大学出版社，2011.
GAO Z. Mechanical principles[M]. Guangzhou: East China University of Science and Technology Press, 2011. (in Chinese)

（责任编辑：段桃）