

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.11.001

基于遗传算法的医药码垛机器人结构参数优化研究*

于天彪, 乔 木, 李 明

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:针对应用在医药包装生产线上的码垛机器人的工作空间狭小和臂长冗余的问题,提出了一种结合图解法和解析法来分析求解的新方法。建立了码垛机器人的 D-H 正运动学理论模型,并验证了模型的正确性。在此基础上考虑实际工况,通过遗传算法工具箱对其臂长和工作空间进行了多目标参数优化,获得了符合工作要求的优化设计变量。最后通过 SimMechanics 模块对码垛机器人进行了结构建模和工作空间仿真。研究表明,所获得的优化设计变量满足预期的设计要求,码垛机器人的有效臂长明显缩短,工作空间显著提高且没有内腔,具有很好的工作性能,同时为码垛机器人的结构设计和参数优化提供了理论依据。

关键词:码垛机器人;遗传算法;多目标优化;工作空间

中图分类号:TP242;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)11-1289-07

Optimization of structure parameters of palletizing robot based on genetic algorithm in medicine

YU Tian-biao, QIAO Mu, LI Ming

(School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Aiming at the problem of the narrow working space and the redundant arm length of the palletizing robot applied in pharmaceutical packaging production line, a new method combining the graphic method and analytic method was proposed to analyze and solve this problem. D-H positive kinematics theory-model of palletizing robot was built and the correctness of the model was verified, on the basis the actual working conditions were considered. Matlab genetic algorithm toolbox was used to complete multi-objective parameter optimization on the arms' length and working space, and the optimal design variables conforming to the job requirement were obtained. Finally, through the SimMechanics modular, the model of palletizing robot was built and the workspace of palletizing robot was simulated. The results indicate that the obtained optimization design variables can meet the expected requirements of the job, the palletizing robot's effective arm length is apparently shortened and its working space is apparently increased without cavity and has good working performance, simultaneously the theory basis is provided for the structural design and optimization of palletizing robot.

Key words: palletizing robot; genetic algorithm; multi-objective optimization; workspace

0 引 言

近年来随着电子、控制、传感器、计算机以及人工智能等技术的高速发展,对机器人的设计开发已然成为人们当下研究的热点问题之一^[1-2]。广泛应用于医

药、食品、饮料、化工等行业的码垛机器人是提升自动化水平的关键装备^[3-4],针对不同生产线很好地实现了大载荷、高速、精确、连续的作业要求,降低了工人劳动强度和生产成本,提高了生产效率和质量。码垛机器人结构优化作为对码垛机器人研究的关键技术之一,

收稿日期:2016-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275084);辽宁省科技攻关资助项目(2012220031)

作者简介:于天彪(1968-),男,吉林榆树人,博士,教授,博士生导师,主要从事磨削与精密加工方面的研究. E-mail: petejoy@126.com

在缩短机器人的有效臂长和增大工作空间等方面具有无可替代的作用。

由于多关节机器人的空间结构相当复杂,对其工作空间问题的研究很困难。Gupta 和 Roth^[5]解决了多关节机器人的基本空间和第二空间的定义问题。Ceccarelli^[6]解决了 3R 机械手的工作空间和结构尺寸的多目标优化问题。国内学者黄清世和廖道训^[7]亦做出较多贡献。

在医药生产线上,码垛机器人完成对药箱的简单搬运,药箱姿态不发生变化,因此只需保持药箱的垂直姿态即可,双平行四边形结构可以很好地实现这一目的。本研究用位姿来描述,小臂末端铰点与末端执行器的相对位置不变^[8],只是相对姿态发生变化。

本研究针对应用医药包装生产线上的码垛机器人的工作空间狭小和臂长冗余的问题,提出一种结合图解法和解析法来分析求解的新方法。

1 正运动学数学模型及验证

笔者要研究的四自由度关节型码垛机器人主要由固定基座、大臂、小臂、末端执行器、4 个关节驱动电机组成^[9],4 个关节电机分别实现基座旋转、大臂和小臂俯仰以及末端执行器的旋转动作,码垛机器人结构简图如图 1 所示。

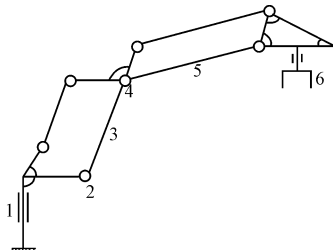


图 1 码垛机器人结构简图

1—基关节;2—大臂关节;3—大臂;4—小臂关节;5—小臂;6—末端执行器

所谓机器人的正运动学是由机器人关节坐标系的坐标到机器人末端位置和姿态之间的映射^[10],如图 2 所示。

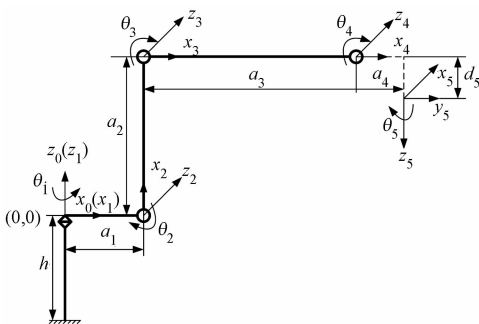


图 2 码垛机器人 D-H 坐标系

图 2 中,基座的高度 h 和基关节变量 θ_1 、连杆 a_1 的杆长、小臂末端铰点与末端执行器相对位置不变,即连杆 a_4 和 d_5 均对机器人在 xoz 截面的工作空间没有影响,这里根据实际工作情况设为定值,对工作空间无影响的结构参数如表 1 所示。

表 1 对工作空间无影响的结构参数

编号	h/mm	a_1/mm	a_4/mm	d_5/mm	θ_1
参数	700	500	100	150	$[-\pi, \pi]$

1.1 正运动学数学模型

本研究利用 D-H 方法^[11-12],按照如下的顺序进行平移和旋转可以得到从 $\{i-1\}$ 变换到 $\{i\}$ 的齐次坐标变换矩阵,记为 ${}^{i-1}T$:

$${}^{i-1}T = T(a_{i-1}, 0, 0)R(x_{i-1}, \alpha_{i-1})T(0, 0, d_i)R(z_i, \theta_i) = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ C\alpha_{i-1}S\theta_i & C\alpha_{i-1}C\theta_i & -S\alpha_{i-1} & -d_iS\alpha_{i-1} \\ S\alpha_{i-1}S\theta_i & S\alpha_{i-1}C\theta_i & C\alpha_{i-1} & d_iC\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $C\theta_i = \cos\theta_i, S\theta_i = \sin\theta_i, C\alpha_{i-1} = \cos\alpha_{i-1}, S\alpha_{i-1} = \sin\alpha_{i-1}$ 。

本研究在对每个关节建立坐标系之后,分析其运动学特性,前 4 个关节的相邻坐标系都是相对于当前坐标系经过四次变换得来的,应该右乘;而关节 5 是由关节 4 相对于基础坐标系变换来的,应该左乘;因此,可以得到机器人末端执行器的位姿矩阵,记为 0_5T :

$${}^0_5T = {}^4_5T({}^0_1T_1T_2T_3T_4T) = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $n_x, n_y, n_z, o_x, o_y, o_z, a_x, a_y, a_z$ —当前坐标系相对于参考坐标系的姿态; P_x, P_y, P_z —当前坐标系相对于参考坐标系的位置。

机器人的 D-H 参数表如表 2 所示。

表 2 机器人的 D-H 参数表

i	a_{i-1}/mm	$\alpha_{i-1}/^\circ$	d_{i-1}/mm	θ/rad
1	0	0	0	θ_1
2	a_1	-90	0	θ_2
3	a_2	0	0	θ_3
4	a_3	0	0	θ_4
5	a_4	90	$-d_5$	θ_5

机器人的正运动学数学模型为:

$$\begin{cases} P_x = \cos\theta_1 [a_1 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos\theta_2] + a_4 \\ P_y = \sin\theta_1 [a_1 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos\theta_2] \\ P_z = -d_5 - a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - a_2 \sin\theta_2 \end{cases} \quad (3)$$

1.2 数学模型的验证

从图 2 中可以得出各个关节的转角,其中 $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = -\pi/2$, $\theta_3 = \pi/2$,代入机器人的正运动学数学模型中,得到 $P_x = a_1 + a_3 + a_4, P_y = 0, P_z = -d_5 + a_2$, 与此同时码垛机器人各个连杆的运动状态一致,因此可以验证所求码垛机正运动学模型的正确性。

2 码垛机器人结构参数的优化

2.1 设计变量

设计变量包括大臂杆长 a_2 ,小臂杆长 a_3 ,大臂旋转角最大值 θ_{2max} 和最小值 θ_{2min} ,小臂旋转角最大值 θ_{3max} 和最小值 θ_{3min} ,共 6 个变量,依次记为 $x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]$ 。

2.2 多目标函数

由于受到工作环境的限制,同时为了进一步减小码垛机器人的自重,提高码垛效率,希望码垛机器人在满足杆长之和最小的情况下,其末端执行器的工作空间能够达到最大。码垛机器人实际上是由大臂和小臂组成的一个平面二级杆,该平面二级杆随着基座关节绕 Z 轴的旋转运动来完成三维空间的码垛任务。当基座关节的旋转角度范围一定时,只要由大臂和小臂所组成的二级杆在平面内的运动范围达到最大,则码垛机器人的三维工作空间即可达到最大^[13]。机器人 xoz 截面工作空间如图 3 所示。

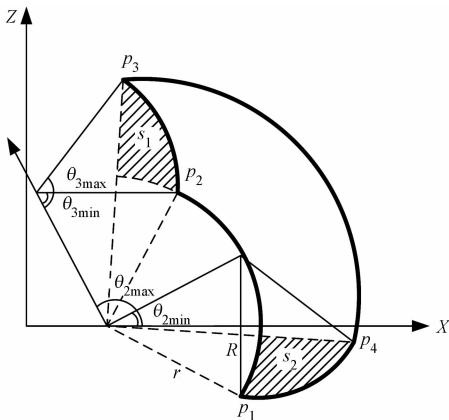


图 3 机器人 xoz 截面工作空间

杆长之和最小的目标函数为:

$$f_1(x)_{\min} = x_1 + x_2 \quad (4)$$

图 3 中,容易得到阴影部分 s_1 和 s_2 全等,因此码垛机器人在 xoz 截面的工作空间实际上是对应外圆半径为 R ,内圆半径为 r ,弧度值为 $\theta_{2max} - \theta_{2min}$ 的部分圆环的面积。

工作空间最大的目标函数为:

$$f_2(x)_{\max} = \left(\frac{x_3 - x_4}{360} \right) (\pi R^2 - \pi r^2) = \frac{\pi}{360} x_1 x_2 (x_3 - x_4) (\cos x_6 - \cos x_5) \quad (5)$$

其中,大圆半径 R 和小圆半径 r 可以表示为:

$$R = \sqrt{(x_1^2 + x_2^2 - 2x_1x_2\cos x_5)} \quad (6)$$

$$r = \sqrt{(x_1^2 + x_2^2 - 2x_1x_2\cos x_6)} \quad (7)$$

由于遗传算法只能求得函数的最小值,笔者将 $f_2(x)_{\max}$ 变为 $-f_2(x)_{\max}$ 。

为了计算的方便,需要对多目标函数归一化处理 $F(x) = \alpha f_1(x)_{\min} - \beta f_2(x)_{\max}$,其中: α, β 为加权系数,且 $\alpha + \beta = 1$,数值大小视两个目标函数的重要程度决定,可以根据具体情况取值,这里取 $\alpha = 0.4, \beta = 0.6$,即:

$$F(x) = 0.4f_1(x)_{\min} - 0.6f_2(x)_{\max} \quad (8)$$

2.3 约束条件的确定

由于码垛机器人为 4 自由度,末端执行器的工作空间的形状简单,本研究采用解析法和图解法来共同确定约束条件,包括轨迹约束、极限角约束和杆长约束。

2.3.1 轨迹约束

为了研究方便,使得基座关节旋转角度 $\theta_1 = 0^\circ$,此时工作空间可以由末端执行器坐标系原点的极限位置所构成的边界曲线来表示。根据机器人的正运动学模型可得 p 点在 xoz 截面的轨迹函数为:

$$\begin{cases} x = a_1 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos \theta_2 + a_4 \\ z = -d_5 - a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - a_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (9)$$

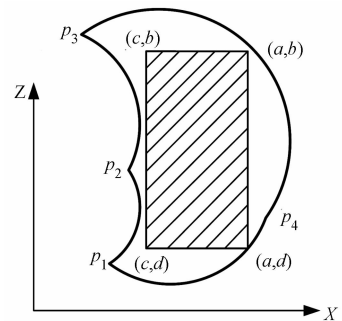


图 4 机器人工作空间边界条件

图 4 中,工作空间由 $p_1p_2, p_2p_3, p_3p_4, p_4p_1$ 这 4 条曲线组成,为了完成对货物的码垛任务,工作空间要包含货堆在 xoz 截面的截面积 $abcd$ (图中阴影部分),根据工作需要,货堆的 xoz 截面坐标为 $a = 2750 \text{ mm}, b = 1500 \text{ mm}, c = 1250 \text{ mm}, d = 0$ 。

曲线 p_1p_2 是当小臂转角 $\theta_3 = \theta_{3min} = x_6$ 时,大臂转角从 θ_{2min} 转到 θ_{2max} 得到的,由式(6)得:

$$\begin{cases} x - a_1 - a_4 = a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos\theta_2 \\ z + d_5 = -a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - a_2 \sin\theta_2 \end{cases} \quad (10)$$

本研究将式(10)左右两边分别平方再相加,根据图2中 θ_2 和 θ_3 的旋转方向,图3中 θ_2 和 θ_3 的旋转起始线分别为 x 轴正向和大臂轴向射线,故将 θ_2 和 θ_3 替换成 $(2\pi - \theta_{2\max})$ 和 $(\pi - \theta_{3\min})$,以后不再赘述。综上可以得到曲线 p_1p_2 轨迹方程为:

$$(x - a_1 - a_4)^2 + (z + d_5)^2 = a_2^2 + a_3^2 + 2a_2a_3 \cos(\pi - \theta_{3\min}) \quad (11)$$

曲线 p_2p_3 是当大臂转角 $\theta_2 = \theta_{2\max} = x_3$ 时,小臂转角从 $\theta_{3\min}$ 转到 $\theta_{3\max}$ 得到的,由式(6)得:

$$\begin{cases} x - a_1 - a_4 - a_2 \cos\theta_2 = a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ z + d_5 + a_2 \sin\theta_2 = -a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)左、右两边分别平方再相加,然后把 θ_2 替换成 $(2\pi - \theta_{2\max})$,综上可得曲线 p_2p_3 轨迹方程为:

$$\begin{aligned} [x - a_1 - a_4 - a_2 \cos(2\pi - \theta_{2\max})]^2 + \\ [z + d_5 + a_2 \sin(2\pi - \theta_{2\max})]^2 = a_3^2 \end{aligned} \quad (13)$$

曲线 p_3p_4 是当小臂转角 $\theta_3 = \theta_{3\max} = x_5$ 时,大臂转角从 $\theta_{2\max}$ 转到 $\theta_{2\min}$ 得到的,曲线 p_3p_4 的轨迹方程为:

$$(x - a_1 - a_4)^2 + (z + d_5)^2 = a_2^2 + a_3^2 + 2a_2a_3 \cos(2\pi - \theta_{3\max}) \quad (14)$$

曲线 p_4p_1 是当大臂转角 $\theta_2 = \theta_{2\min} = x_4$ 时,小臂转角从 $\theta_{3\max}$ 转到 $\theta_{3\min}$ 得到的,曲线 p_4p_1 的轨迹方程为:

$$\begin{aligned} [x - a_1 - a_4 - a_2 \cos(2\pi - \theta_{2\min})]^2 + \\ [z + d_5 + a_2 \sin(2\pi - \theta_{2\min})]^2 = a_3^2 \end{aligned} \quad (15)$$

对于 p_1p_2 曲线:

最大值为: $a_1 + r \leq c$

$$\begin{aligned} g_1(x) = a_1 + (x_1^2 + x_2^2 - 2x_1x_2 \cos x_6)^{\frac{1}{2}} - \\ c \leq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

对于 p_2p_3 曲线:

最大值为: $a_1 + a_3 - a_2 \sin\left(\theta_{2\max} - \frac{\pi}{2}\right) \leq c$

$$g_2(x) = a_1 + x_2 + x_1 \cos x_3 - c \leq 0 \quad (17)$$

对于 p_3p_4 曲线:

当 $x = a$ 时, $z \geq b$

$$\begin{aligned} g_3(x) = b + d_5 - [x_1^2 + x_2^2 + 2x_1x_2 \\ \cos(\pi - x_5) - (a - a_1 - a_4)^2]^{\frac{1}{2}} \leq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

当 $x = a$ 时, $z \leq d$,此时恒成立

当 $z = b$ 时, $x \geq a$

当 $z = d$ 时, $x \geq a$

$$\begin{aligned} g_4(x) = a - a_1 - a_4 - [x_1^2 + x_2^2 + \\ 2x_1x_2 \cos(\pi - x_5) - (b + d_5)^2]^{\frac{1}{2}} \leq 0 \end{aligned} \quad (19)$$

对 p_4p_1 曲线:

当 $x = a$ 时, $z \leq d$

$$\begin{aligned} g_5(x) = -d_5 - x_1 \sin(2\pi - x_4) - [x_2^2 - \\ (a - a_1 - a_4 - x_1 \cos(2\pi - x_4))^2]^{\frac{1}{2}} - d \leq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

当 $x = c$ 时, $z \leq d$

$$\begin{aligned} g_6(x) = -d_5 - x_1 \sin(2\pi - x_4) - [x_2^2 - \\ (c - a_1 - a_4 - x_1 \cos(2\pi - x_4))^2]^{\frac{1}{2}} - d \leq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

当 $z = d$ 时, $x \geq a$

$$\begin{aligned} g_7(x) = a - a_1 - a_4 - x_1 \cos(2\pi - x_4) - \\ [x_2^2 - (d + d_5 + x_1 \sin(2\pi - x_4))^2]^{\frac{1}{2}} \leq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

当 $z = d$ 时, $x \leq c$

$$\begin{aligned} g_8(x) = a_1 + a_4 + x_1 \cos(2\pi - x_4) - [x_2^2 - \\ (d + d_5 + x_1 \sin(2\pi - x_4))^2]^{\frac{1}{2}} - c \leq 0 \end{aligned} \quad (23)$$

2.3.2 极限角约束

根据设计要求,各个驱动关节变化范围如表3所示。

表3 驱动关节参数

关节角	$\theta_{2\max}$	$\theta_{2\min}$	$\theta_{3\max}$	$\theta_{3\min}$
范围	$[\pi/2, \pi]$	$[\pi/6, \pi/2]$	$[\pi/2, \pi]$	$[\pi/6, \pi/2]$

$$g_9(x) = x_3 - \pi \leq 0 \quad (24)$$

$$g_{10}(x) = \frac{\pi}{2} - x_3 \leq 0 \quad (25)$$

$$g_{11}(x) = x_4 - \frac{\pi}{2} \leq 0 \quad (26)$$

$$g_{12}(x) = \frac{\pi}{6} - x_4 \leq 0 \quad (27)$$

$$g_{13}(x) = x_5 - \pi \leq 0 \quad (28)$$

$$g_{14}(x) = \frac{\pi}{2} - x_5 \leq 0 \quad (29)$$

$$g_{15}(x) = x_6 - \frac{\pi}{2} \leq 0 \quad (30)$$

$$g_{16}(x) = \frac{\pi}{6} - x_6 \leq 0 \quad (31)$$

2.3.3 杆长约束

$$g_{17}(x) = -x_1 \leq 0 \quad (32)$$

$$g_{18}(x) = -x_2 \leq 0 \quad (33)$$

$$g_{19}(x) = x_1 + x_2 - L \leq 0 \quad (34)$$

2.4 遗传算法优化

码垛机器人的结构参数优化是多目标非线性优化问题,其中有2个目标函数,6个设计变量,19个约束条件,且都是不等式约束,因此求解过程非常复杂。本研究采用 Matlab 遗传算法工具箱(GATOOBOX)来进行编程计算。

遗传算法求解步骤如下:

步骤一:对目标函数和约束函数进行编程,分别命名为@ my_fit 和@ my_c;

步骤二:在 Matlab 命令窗口中输入命令 gatool 打开遗传算法工具箱,设置 Solver 为 ga - Genetic Algorithm, Fitness function 为@ my_fit, Number of variable 为 6, Nonlinear constraint function 为@ my_c。群体规模 (Population) 的大小直接影响到遗传算法的收敛性和计算效率,为防止算法提前收敛并具有较高的运算速度,设置 PopulationSize 为 500。为防止算法未达到最优解就迭代结束,设置 Generations 为 200。一般交叉概率的建议范围为 0.4 ~ 0.99,设置 CrossoverFraction 为 0.85。变异概率的建议范围为 0.000 1 ~ 0.2^[14],设置 MigrationFraction 为 0.15;

步骤三:参数设置完成,点击 start 开始运行。

遗传算法优化结果,如表 4 所示。

表 4 遗传算法优化结果

变量	x_1/mm	x_2/mm	x_3/rad	x_4/rad	x_5/rad	x_6/rad
结果	1 258.834	1 483.472	5.720	3.369	2.817	0.698

优化结果显示大臂长 $a_2 = 1\ 258.834\ \text{mm}$,小臂长 $a_3 = 1\ 483.472\ \text{mm}$,大臂摆角 $\theta_{2\max} = 5.720\ \text{rad}, \theta_{2\min} = 3.369\ \text{rad}$,小臂摆角 $\theta_{3\max} = 2.817\ \text{rad}, \theta_{3\min} = 0.698\ \text{rad}$ 。

3 码垛机器人工作空间仿真

3.1 SimMechanics 结构建模

本研究利用 Matlab/Simulink 中的 SimMechanics 模块,根据码垛机器人结构简图进行结构建模,利用仿真跟踪末端执行器的轨迹并记录其空间位置,绘制出工作空间^[15],建模结果如图 5 所示。

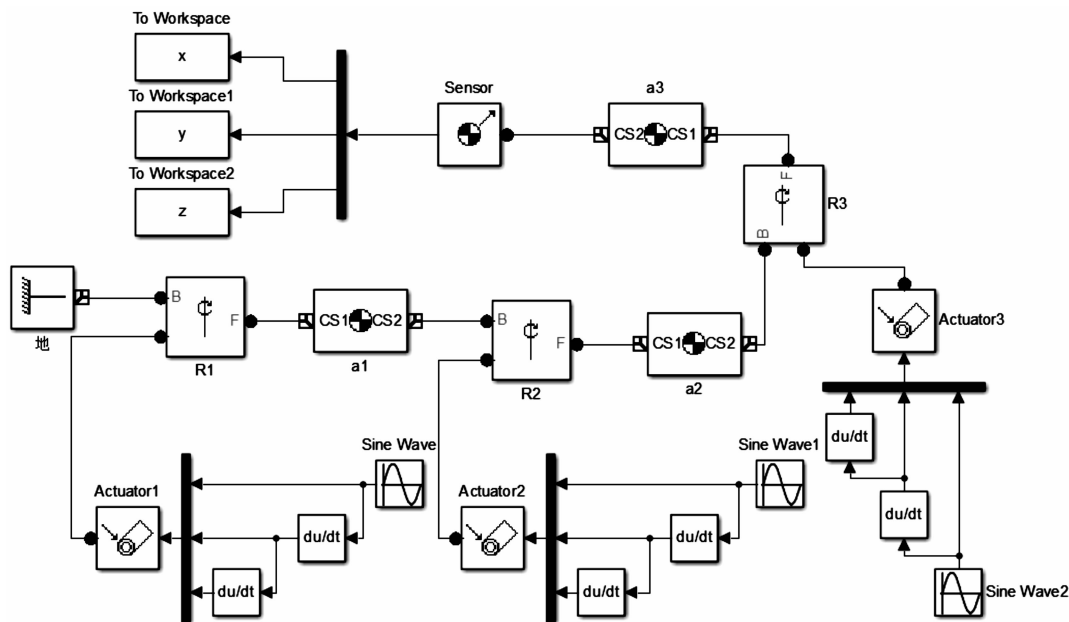


图 5 码垛机器人结构建模

该 SimMechanics 模型主要由 1 个地模块,3 个刚体模块,3 个关节模块,3 个驱动模块及 1 个传感器模块组成。地模块表示固定基座,刚体模块 a_1, a_2, a_3 表示机器人 3 个杆长,关节模块 R_1, R_2, R_3 表示 3 个转动关节,驱动模块 Actuator1, Actuator2, Actuator3 分别驱动 3 个转动关节,传感器模块 Sensor 记录末端执行器到达的坐标。

地模块需要设置基座的坐标,刚体模块需要设置杆长、质量、转动惯量、初始位置以及姿态,关节模块需要设置各个关节的转轴,驱动模块需要设置角位移、角速度及角加速度。本研究对角位移的表示选用正弦信号,通过改变幅值和偏移量来适应各个关节角的转动

范围。同时,通过改变频率和相位角来得到不同关节的关节角组合。传感器模块利用位置传感器跟踪记录末端执行器到达的位置坐标,并将数据反馈到 Matlab 主界面的 Workspace 中,方便后续处理。

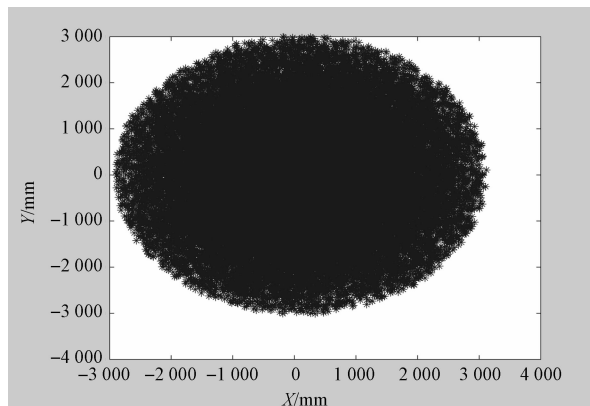
3.2 工作空间仿真

当 SimMechanics 建模仿真结束之后,传感器记录的末端执行器到达的位置坐标已经反馈到 Workspace 中,此时通过调用命令 plot(x, y), plot(x, z), plot3(x, y, z, ' * ') ,可以分别得到码垛机器人末端执行器在 xoy 平面的投影、xoz 平面的投影以及在三维空间 xyz 的三维图,如图 6(a ~ c)所示。

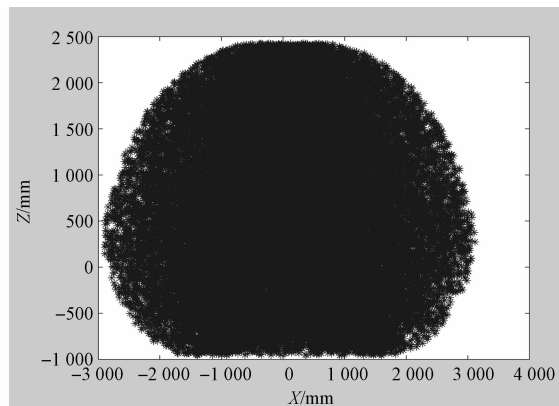
为了求得末端执行器在 xoz 的截面图,可以将基

座关节 R_1 的驱动信号 Actuator1 的幅值设置为 0, 则此时末端执行器就只会在 xoz 平面内运动, 通过调用 plot

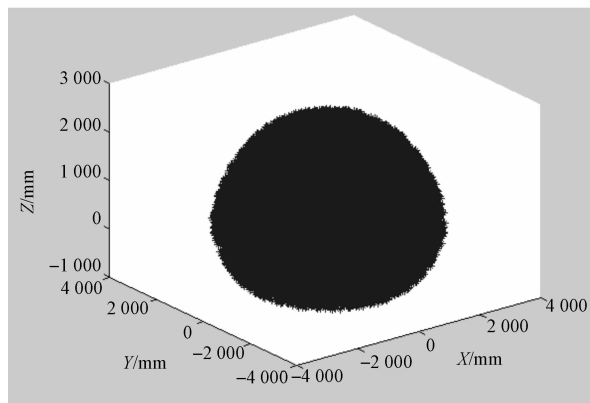
($x, z, ' * '$) 命令, 可以得到工作空间在 xoz 截面图, 如图 6(d) 所示。



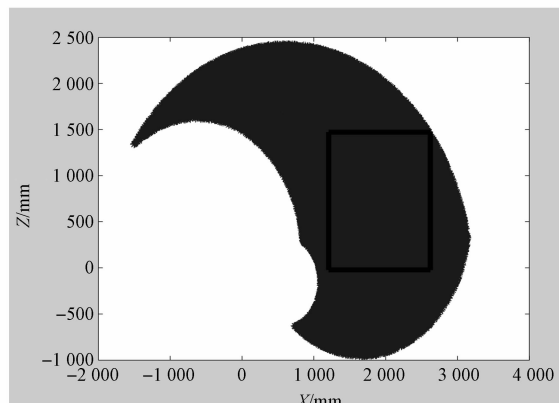
(a) 工作空间 xoy 平面投影



(b) 工作空间 xoz 平面投影



(c) 工作空间三维图



(d) 工作空间在 xoz 的截面图

图 6 工作空间仿真图

从图 6(d) 可以看出, 通过 SimMechanics 模块仿真的机器人的工作空间与图解法描绘图形形状基本一致。黑框表示货堆的 xOz 截面图, 亦包含在机器人的工作空间之内, 满足医药包装生产线的实际工况要求;

基于 D-H 参数法, 结合码垛机器人的连杆和关节参数建立了正运动学模型, 利用遗传算法对码垛机器人进行以臂长最小和工作空间最大为目标的多目标优化, 获得了符合工作要求的优化设计变量, 可减小运动部件的自重, 提高了码垛机器人的工作效率。

图 6(a) 和图 6(b) 表明, 码垛机器人工作空间沿 x 轴方向距离基座的最大距离为 3 000 mm, 沿 y 轴方向距离基座的最大距离为 3 000 mm, 沿 z 轴方向的最大高度为 2 500 mm, 有效增大了工作空间;

(2) 本研究利用 SimMechanics 模块完成了对码垛机器人的结构建模和工作空间的仿真, 实验结果验证了优化设计变量合理可靠, 工作空间无空腔, 并有效增大了工作空间和降低有效臂长, 为码垛机器人的结构设计提供理论依据, 同时该优化模型的建立以及优化方法的运用对同类码垛机器人的优化设计有一定参考价值。

图 6(c) 表明, 三维工作空间形状规则且均匀, 没有空腔, 证明码垛机器人具有很好的活动范围。

综合上述仿真结果, 可以验证经遗传算法分析求解出的 6 个优化设计变量合理可靠。

4 结束语

(下转第 1308 页)

(1) 本研究根据医药包装生产线的工作要求,

本文引用格式:

于天彪, 乔木, 李明. 基于遗传算法的医药码垛机器人结构参数优化研究[J]. 机电工程, 2016, 33(11): 1289-1294, 1308.

YU Tian-biao, QIAO Mu, LI Ming. Optimization of structure parameters of palletizing robot based on genetic algorithm in medicine[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(11): 1289-1294, 1308. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>