

串联机器人机械臂工作空间与结构参数研究*

田海波 马宏伟 魏娟
(西安科技大学机械工程学院, 西安 710054)

摘要: 工作空间的体积可以反映串联机器人运动灵活程度。研究了一种串联机器人机械臂的工作空间问题。首先,提出机械臂的基本结构,进行简化,得到其运动模型;在此基础上对机械臂进行了运动学分析;然后,采用蒙特卡洛法分析该机械臂的工作空间,得出了机械臂末端的工作空间点云图;提出了自适应划分网格方法,并用该方法计算了该工作空间的体积;最后,分析了机械臂结构参数对工作空间体积的影响,为机械臂的参数优化提供了理论依据。

关键词: 串联机器人 机械臂 工作空间 结构优化 蒙特卡洛法 自适应划分网格

中图分类号: TP242; TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0196-06

Workspace and Structural Parameters Analysis for Manipulator of Serial Robot

Tian Haibo Ma Hongwei Wei Juan
(School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The volume of workspace showed the flexibility of a serial robot. The workspace of the manipulator of a serial robot was researched. Firstly, the main structure of the manipulator was given and its kinematical model was proposed. Then, its kinematics analysis was taken. The manipulator's workspace was analyzed by Monte Carlo method and the cloud picture was completed. The adaptive-divided mesh method was brought. The volume of workspace was calculated. At last, the effect of the manipulator's structural parameters on the workspace volume was analyzed, which provided theoretical basis for the manipulator's structural parameter optimization.

Key words: Serial robot Manipulator Workspace Structural optimization Monte Carlo method Adaptive-divided mesh

引言

串联机器人是一类应用非常广泛的机器人。在农业上,它可以通过编程来完成采摘水果和蔬菜等相关作业任务,从而解决劳动力不足的问题,能降低工人劳动强度和采摘成本、减轻农业化肥和农药对人体的危害、提高采摘果蔬的质量、保证果蔬的适时采收,具有很大应用价值^[1]。机械臂是这种串联机器人的主要执行部件,其灵活程度对机器人的工作能力起着至关重要的作用。

机械臂的工作空间是机器人机械臂运动灵活程度的重要指标之一,它是指其末端参考点所能达到的空间点集合^[2]。目前,机器人工作空间的求解方法主要有图解法、解析法以及数值法。图解法直观性强,可以得到工作空间的剖截面或剖截线,但也受到自由度数的限制,对于有些三维机器人无法准确描述^[3]。解析法是通过多次包络来确定工作空间边界,虽然可以把工作空间的边界用方程表示出来,但其直观性不强,十分繁琐,一般只适用于关节数少于3个的机器人^[4]。用数值法计算机器人的工

收稿日期: 2012-04-19 修回日期: 2012-05-08
* 陕西省教育厅专项科学研究资助项目(11JK0874)
作者简介: 田海波, 讲师, 博士, 主要从事机器人结构研究及其运动控制研究, E-mail: ttttian_74@163.com

作空间,实质上就是选取尽可能多的独立的各关节变量组合,再利用机器人的正向运动学方程计算出机器人末端杆件端点的坐标值,这些坐标值就形成了机器人的工作空间^[5]。坐标值的数目越多,就越能反映机器人的实际工作空间。数值法应用简单,可以分析任意形式的机器人结构,随着计算机软硬件的发展,得到了越来越广泛的应用。

工作空间表明了机械臂活动空间的范围,其大小可用投影面积或体积来衡量。用体积最大化作为参数优化的目标,对于机械臂的设计具有重要指导意义。目前国内外对工作空间体积的计算一般都采取先求边界,再用数值积分法求体积的做法。边界的提取主要有双向链表法^[6]和数值解析结合法等^[7]。这几种方法都是在数值方法的基础上,结合微分几何中曲线包络的理论求出工作空间的包络曲线和包络曲面。这一类方法的优点是各步骤意义明确,但也存在曲线和曲面拟合过程繁琐、精度不易控制的缺点。

本文对串联机器人的机械臂进行运动学分析,并求解其工作空间,在图像图形学自适应网格建模方法^[8~9]基础上,提出自适应划分网格方法并采用该方法求出工作空间的体积,分析机械臂结构参数对工作空间体积的影响。

1 串联机器人机械臂结构

一个具有 5 个转动关节的串联机器人欠自由度机械臂结构如图 1 所示。5 个关节分别为:腰关节、肩关节、肘关节、腕俯仰关节和腕回转关节。腰关节、肩关节和肘关节用于确定机械手的空间位置,2 个腕关节可以确定机械手的姿态。

机器人用机械手抓取目标物的过程是:机器人先运动到目标位置,然后让腰关节和肩关节转动对

准目标物。接下来肘关节和 2 个腕关节同时运动,机械手从瞄准位置运动至目标物被抓部位进行抓取,这样机械臂就具有良好的空间姿态调节功能。由此可见,机械臂末端的工作空间是由腰关节、肩关节、肘关节和腕俯仰关节来决定的,下面将对这 4 个关节进行分析。

2 机械臂运动学分析

机械臂末端工作空间代表了机器人机械手的活动范围,是机器人运动灵活性的重要指标。理论上讲,前述机械臂末端的运动范围可以覆盖机器人所在位置前后的一个球状区域。但实际上,在关节结构和机构运动奇异性等因素的影响下,机械臂末端的运动空间受到了限制。因此,如何在保证机械臂运动便利的情况下,使其各部分尺寸实现最优化,以扩展机械手的工作空间,增加运动灵活性,是机器人总体设计和运动规划过程中的一个重要课题。运动学分析的是末端执行器(即机械手)的位置和姿态与各关节变量之间的关系,是机械手工作空间研究的基础。

2.1 运动模型简化

该机械臂具有 5 个自由度,末端工作空间是其机械手的工作范围,与前 4 个自由度有关,因此只需研究前 4 个关节。根据机械臂的结构特点和运动特性,各关节参数存在如下约束条件:

(1) 驱动副转角范围。每个关节都是一个转动副。由于受到运动单元零件的限制,除腰关节外,各关节的转角均难实现全周转动,有其转动范围。通过分析计算,确定各关节的转角范围如表 1 所示。

表 1 机械臂各关节的转角范围

Tab.1 Actuated joints angle range of manipulator	
关节转角	转动范围/(°)
腰关节 ψ	$[-180,180]$
肩关节 φ_1	$[-80,75]$
肘关节 φ_2	$[-160,0]$
腕俯仰关节 θ	$[0,90]$

(2) 杆件长度范围。按照运动空间原理,杆件越长,机器人的活动空间越大。但是,要使机器人保持一定环境适应能力,外形必须加以限制,因此杆件长度不能无限增大。

2.2 运动学分析

运动学分析就是在已知各关节运动参数的条件下,求解末端执行器的位置和姿态信息。为了描述机械手各杆的特性参数和相互间的运动关系,坐标系的设定选择 D2H 方法,如图 2 所示。杆件参数和关节转角如表 2 所示。

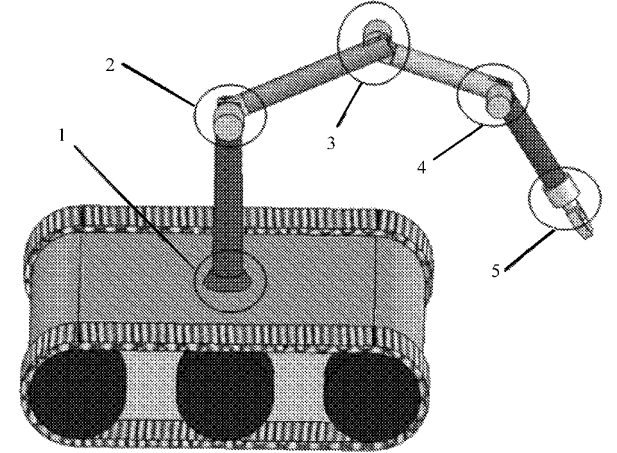


图 1 串联机器人机械臂的结构

Fig.1 Manipulator of explosive-handling robot
1.腰关节 2.肩关节 3.肘关节 4.腕俯仰关节 5.腕回转关节

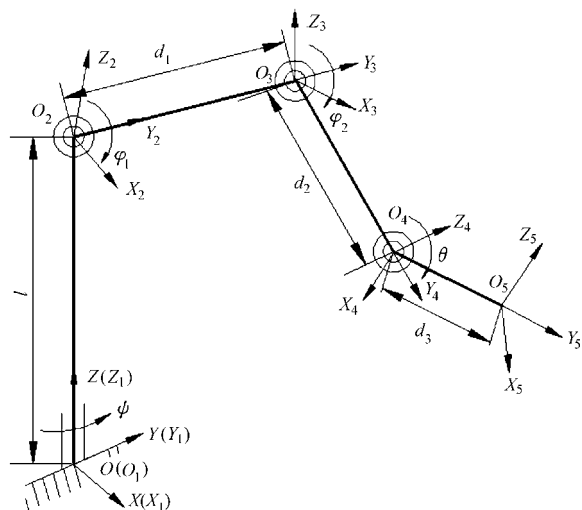


图2 串联机器人机械臂机构及其杆件坐标
Fig.2 Bars and coordinate systems of manipulator

表2 机械臂杆件参数与关节转角

Tab.2 Bar parameters and joint variables of manipulator

连杆	连杆长度/mm	扭转角/(°)	关节转角
l	400	-90	ψ
d_1	320	-90	φ_1
d_2	250	90	φ_2
d_3	150	0	θ

机械臂末端执行器的正运动学方程为

$$T_5^0 = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \cdot T_4^3 \cdot T_5^4 = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中 $P = [p_x \ p_y \ p_z]^T$
式中 R ——末端执行器相对基坐标的姿态矩阵
 P ——末端执行器相对基坐标系的位置向量
解得

$$P =$$

$$\begin{bmatrix} -d_1 \cos \varphi_1 \sin \psi + d_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \sin \psi - d_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \theta) \sin \psi \\ d_1 \cos \varphi_1 \cos \psi - d_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \cos \psi + d_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \theta) \cos \psi \\ l - d_1 \sin \varphi_1 - d_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) - d_3 \sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \theta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

3 机械臂的工作空间分析

3.1 蒙特卡洛法

蒙特卡洛法^[10~11] (Monte Carlo method) 是一种借助于随机抽样来解决数学问题的数值方法,该方法容易实现计算机图形显示功能,计算速度快,适合于任何关节型机械臂工作空间求解,对关节变量的变化范围没有限制,误差也与维数无关。具体求解步骤如下:

- (1) 根据机器人的运动学正解,求出机器人末端执行器在参考坐标系中的位置向量。
- (2) 利用随机函数 $RAND(j)$ ($j = 1, 2, \dots, N$)

产生 N 个 $0 \sim 1$ 之间的随机值,由此产生一随机步长 $(q_{maxi} - q_{mini}) \cdot RAND(j)$,得到机械臂关节变量的伪随机值为

$$q_i = q_{mini} + (q_{maxi} - q_{mini}) \cdot RAND(j) \quad (2)$$

式中 $q_{maxi}、q_{mini}$ ——关节变量的上、下限
 i ——关节数目,取 $1 \sim 4$

(3) 将 N 个关节变量伪随机值组合代入运动学方程,得到末端的坐标值,并将其对应的 x 坐标、 y 坐标、 z 坐标分别存于矩阵 $X、Y$ 和 Z 中;坐标值数目越多,越能反映机器人的实际工作空间。

(4) 将所得位置向量的值用描点的方式显示在图形设备上,就得到了工作空间点集的云图。

3.2 工作空间的仿真与分析

用蒙特卡洛法对机械臂的工作空间进行仿真。取 $N = 80\,000$,则随机坐标点数目为 $80\,000$ 个,可得该机械臂的工作空间形状如图3所示。

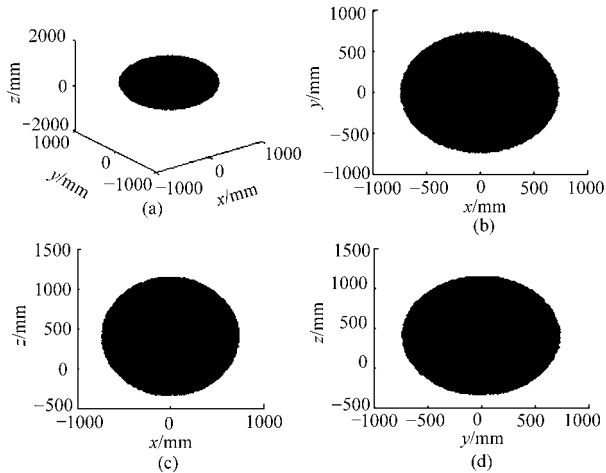


图3 机械臂的工作空间形状

Fig.3 Shape of manipulator workspace

- (a) 末端执行器三维工作空间
- (b) 工作空间在平面 xOy 的投影
- (c) 工作空间在平面 xOz 的投影
- (d) 工作空间在平面 yOz 的投影

4 工作空间体积计算

在图像图形学自适应网格建模^[8~9]基础上,提出自适应划分网格方法求取工作空间的体积。该方法的指导思想是:先建立假想网格,然后根据点云的分布去掉多余的网格,把剩余网格的体积求和得到所求工作空间的体积。其主要步骤如下:

- (1) 建立长方体外包围格。根据已求得点云 $P = \{p_i \in \mathbf{R}^3\}$ ($i = 1, 2, \dots, M$) 各点的 $x、y$ 和 z 值,可以知道该工作空间各方向的最大值 $x_{max}、y_{max}、z_{max}$ 和最小值 $x_{min}、y_{min}、z_{min}$ 。以上述数值为边界可以建立一个长方体,其边长分别为 $a = x_{max} - x_{min}, b = y_{max} - y_{min}, c = z_{max} - z_{min}$,这就是点云的外包围格。
- (2) 空间子网格划分。根据精度要求,分别将

外包围格在 x, y, z 方向边长划分为若干段。假定划分的段数分别为 m, n, p , 则均分后每段的宽度分别为

$$x_m = (x_{\max} - x_{\min}) / m \tag{3}$$

$$y_n = (y_{\max} - y_{\min}) / n \tag{4}$$

$$z_p = (z_{\max} - z_{\min}) / p \tag{5}$$

按照上述划分方法, 对长方体包围盒进行均匀剖切, 得到 $m \times n \times p$ 个小立方体, 可称为空间子网格。注意: 由于下面对边界还要细分(步骤(5)), 此处可以划分得粗略些, 以保证计算资源的合理利用。

(3) 空间点密度均匀化。由蒙特卡洛法的原理可知, 前述点带有一定随机性, 因此会造成云图的疏密程度不一致, 产生局部点云过疏现象, 影响后面的计算结果。引入点密度控制函数, 分析各点与相邻点之间的距离。若两点之间距离

$$d > \sqrt{\left(\frac{x_{\max} - x_{\min}}{m}\right)^2 + \left(\frac{y_{\max} - y_{\min}}{n}\right)^2 + \left(\frac{z_{\max} - z_{\min}}{p}\right)^2} \tag{6}$$

就用插值法在二者之间加一个点。这个点是二点的中点, 其坐标为 $x_{\text{new}} = (x_i + x_j) / 2, y_{\text{new}} = (y_i + y_j) / 2, z_{\text{new}} = (z_i + z_j) / 2$ 。需要指出的是, 这种分析方法会出现将内部空洞误判为局部点云过疏的情况。为了避免这种误判情况, 须增加判断条件, 设置一个阈值, 对距离大于此阈值的情况不再考虑加点点。

(4) 多余空间子网格的去除。采用遍历搜索算法, 把内部及边界中没有随机点的空间子网格去掉, 只剩下那些内部有点的网格, 为寻找边界空间子网格创造条件。

(5) 边界空间子网格的寻找。为了计算精确, 需对边界空间子网格进行细分, 因此要把所有的边界空间子网格找出来。首先, 作降维处理, 利用上面网格划分方式, 将该三维“云图”沿 z 轴划分为 p 层, 每层的高度为 $h = zp$ 。每一层可视为一个二维平面, 从而将三维的空间子网格降维为二维层中的平面网格进行分析。若将此平面网格再沿 y 轴划分为 n 部分, 则可求出每一部分中的 $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 所在的网格以及由内部空洞产生的内部边界的网格; 再将此平面网格沿 x 轴划分为 m 部分, 则可求出每一部分中的 $y_{\min}$ 和 $y_{\max}$ 所在的网格以及内部边界的网格。这两部分的并集就是当前层的边界空间子网格, 如图 4 所示。依此类推, 可以找到 $2 \sim (p - 1)$ 层的边界空间子网格, 再加上 1 层和 p 层的所有包含随机点的网格, 就构成了全部边界空间子网格。

(6) 边界空间子网格的细分。把边界空间子网格, 按照等分原则进行网格的剖分, 分为 8 个体积相

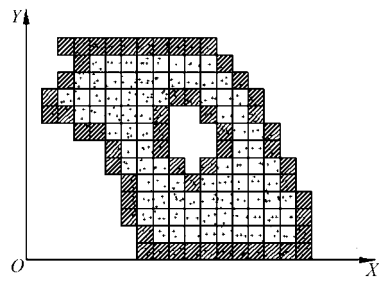


图 4 边界空间子网格寻找示意图

Fig. 4 Concept map of boundary sub-meshes seeking

等的小空间子网格, 如图 5 所示。

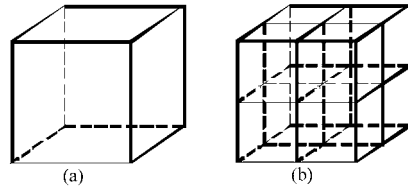


图 5 空间子网格细分示意图

Fig. 5 Concept map of boundary sub-meshes divided

(a) 细分前的空间子网格 (b) 细分后的空间子网格

(7) 多余边界空间子网格去除。采用遍历搜索算法, 把边界空间子网格中没有随机点、且居于空间边界外侧的去掉。

(8) 空间体积的求解。求剩余子网格的体积并求和, 即得所求工作空间的体积

$$V = n_s V_i + \sum_{j=1}^r n_j V_j \tag{7}$$

式中 n_s ——内部空间子网格的个数

V_i ——单个内部空间子网格的体积

r ——边界网格细分的次数

n_j ——经 j 次细分并去除后, 边界空间子网格个数

V_j ——经 j 次细分后单个边界空间子网格的体积

(9) 体积解出值的修正。先消除网格划分精确度对计算结果的影响。通过数次自适应划分, 再采用步骤(7)中的方法把多余的空间子网格去掉, 用步骤(8)中的方法计算体积值, 对前后两次的结果相比较, 当差值小于 2% 时终止。然后消除随机点数目对结果的影响。按一定规律增大随机点的数目(如每次增加 10 000 个点), 不断求解, 并将所得值与前次值比较, 直到前后两次的差异值小于 2% 为止。此时, 最后一次求得的体积值即为工作空间的近似值。

本方法利用网格的自适应划分来完成, 能保证内部空洞的切除。但该方法也存在一定的误差。经过分析, 误差产生的主要原因为: ①蒙特卡罗方法给出的随机点只能产生在工作空间的内部, 与实际的

工作空间边界具有一定的误差,随机点的数目对精度会产生影响。②对于工作空间面积(每层)和体积采用数值方法逼近的时候,无论是矩形逼近面积或是长方体逼近体积,都会出现一定的误差。③空间子网格的划分问题,若子网格划分过粗会导致不精确;而划分过细,则影响计算速度。在实际问题中,精度与速度需要兼顾。

经计算,该机械臂末端工作空间的体积为 $1.3575 \times 10^9 \text{ mm}^3$ 。此时随机点数同前,划分层数为26层,每层各有26列和26行,采用的计算机主频为1.66 GHz,内存为1 GB,所用时间为51.985 s。

5 机器人结构参数的影响分析

5.1 各杆件长度影响

从图6中可以看出,在其他参数不变的情况下,机器人连杆长度 l 的取值对工作空间体积没有影响;而在其他杆长不变时,机器人连杆长度 d_1 、 d_2 和 d_3 的增长都会使工作空间体积变大, d_3 尤为明显。当然,连杆长度的确定还要参考其他因素,如机器人的外形尺寸、重心位置等。

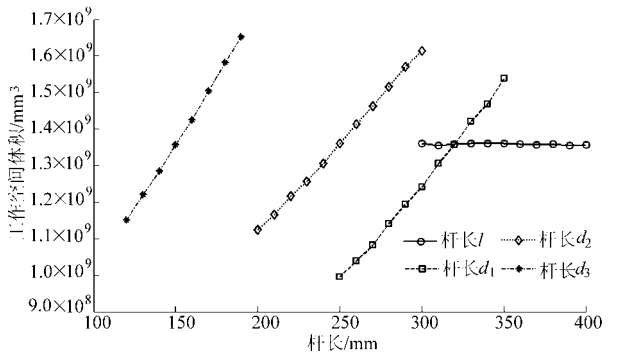


图6 连杆长度对工作空间体积的影响
Fig.6 Effect of bar length on workspace volume

5.2 各关节限位角的影响

图7为腰关节转角对工作体积的影响。从图中可以看出,在其他参数不变的情况下,随着机器人腰关节的转角范围变大,机器人工作空间的体积也

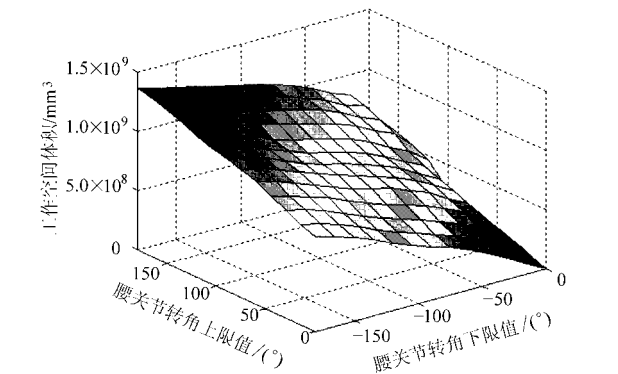


图7 腰关节的转角范围对工作空间体积的影响
Fig.7 Effect of waist joint rotating angle on workspace volume

增大。当腰关节的转角范围为 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 时,工作空间体积最大。

图8~10为肩关节、肘关节和腕关节转角对工作空间体积的影响。从图中可以看出,肩关节、肘关节和腕关节的转角范围变大,机器人工作空间的体积尽管变化的程度不尽相同,却都呈增大趋势。当然,各关节的转角范围不可避免地会受到现实条件的制约,但该结果也可为关节的设计提供有意义的参考。

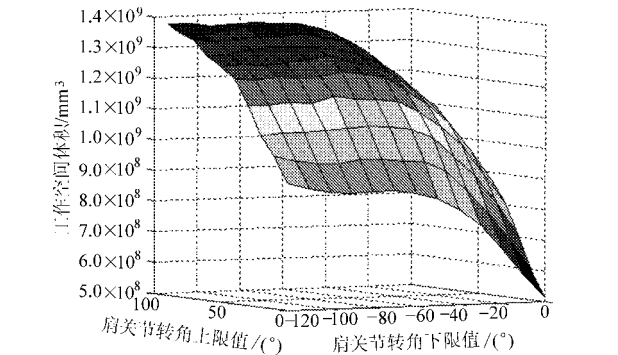


图8 肩关节的转角范围对工作空间体积的影响
Fig.8 Effect of shoulder joint rotating angle on workspace volume

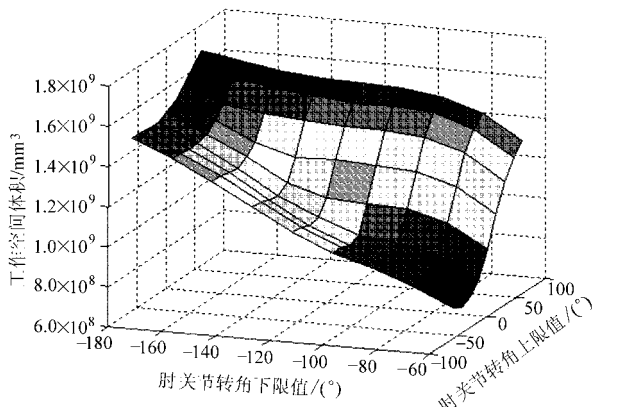


图9 肘关节的转角范围对工作空间体积的影响
Fig.9 Effect of elbow joint rotating angle on workspace volume

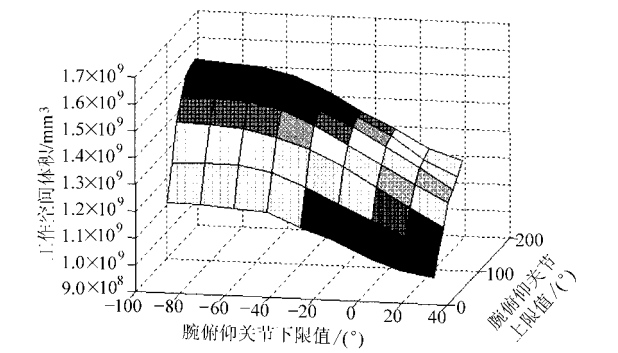


图10 腕俯仰关节的转角范围对工作空间体积的影响
Fig.10 Effect of wrist pitching joint rotating angle on workspace volume

6 结束语

采用 D2H 坐标系,通过齐次变换法求解串联机器人机械臂的运动学方程,获得了姿态向量和位置向量。用蒙特卡洛法分析了该机械臂末端的工作空

间,提出并采用自适应划分网格方法求取了该工作空间的体积。最后,在前述方法的基础上,对机器人的结构参数对工作空间体积的影响进行了分析,为机器人的参数优化提供了理论依据。

参 考 文 献

1 张洁,李艳文. 果蔬采摘机器人的研究现状、问题及对策[J]. 机械设计,2010,27(6):1~5.
Zhang Jie, Li Yanwen. Research situation, problems and solutions of fruit-vegetable picking robots [J]. Journal of Machine Design, 2010,27(6):1~5. (in Chinese)

2 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(5):220~225.
Cao Yi, Wang Shuxin, Qiu Yan, et al. Dexterous workspace oriented design of robotic manipulators for microsurgery [J]. Robot, 2005,27(5):220~225. (in Chinese)

3 Abdel-Malek K, Yeh H J. Analytical boundary of the workspace for general 3-DOF mechanisms [J]. The International Journal of Robotics Research,1997,16(2):198~213.

4 Botturi D, Martelli S, Fiorini P. A geometric method for robot workspace computation [C]//Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Robots and System, Verona: Verona University Publications, 2003.

5 Rastegar J, Fardanesh B. Manipulator workspace analysis using the Monte Carlo method [J]. Mechanism and Machine Theory, 1990,25(2):233~239.

6 赵杰,王卫忠,蔡鹤皋. 可重构机器人工作空间的自动计算方法[J]. 天津大学学报,2006,39(9):1082~1087.
Zhao Jie, Wang Weizhong, Cai Hegao. Algorithms for automatically determining workspace of reconfigurable robots [J]. Journal of Tianjin University, 2006,39(9):1082~1087. (in Chinese)

7 Cao Yi, Qi Suiping, Lu Ke, et al. Shape and size computation of planar robot workspace [C]//2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering, Los Angeles, USA: IEEE, 2009,2:126~130.

8 Prince C. Progressive meshes for large models of arbitrary topology [D]. Seattle: University of Washington, 2000.

9 钱归平,童若锋,彭文,等. 保持特征的点云自适应网格重建[J]. 中国图像图形学报,2009,14(1):148~154.
Qian Guiping, Tong Ruofeng, Peng Wen, et al. Adaptive mesh reconstruction of point cloud with feature preserved[J]. Journal of Image and Graphics, 2009,14(1):148~154. (in Chinese)

10 梁喜凤,王永维,苗香雯,等. 番茄收获机械手工作空间分析与仿真[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2005,31(6):807~811.
Liang Xifeng, Wang Yongwei, Miao Xiangwen, et al. Analysis and simulation of the workspace of a tomato harvesting manipulator [J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci., 2005,31(6):807~811. (in Chinese)

11 赵大兴,周小明,李九灵. 集装箱喷漆机械手工作空间分析与仿真[J]. 机械设计,2008,25(2):15~17.
Zhao Daxing, Zhou Xiaoming, Li Jiuling. Working space analysis and simulation of container spray-painting manipulator [J]. Journal of Machine Design,2008,25(2):15~17. (in Chinese)

(上接第 212 页)

9 郑文刚,孙纲,申长军,等. 可见-近红外作物氮素光电测量仪开发[J]. 农业工程学报,2010,26(3):178~182.
Zheng Wengang, Sun Gang, Shen Changjun, et al. Development of a visible-infrared photoelectric instrument for measuring crop nitrogen [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(3):178~182. (in Chinese)

10 Zhang Xijie, Li Minzan, Liu Gang, et al. Development of a multi-spectral detector determining leaf chlorophyll content of the cucumber in a greenhouse[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008,24(6):869~876.

11 孙刚,刘良云,郑文刚,等. 基于夫琅和费暗线原理的太阳诱导叶绿素荧光仪[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):248~251.
Sun Gang, Liu Liangyun, Zheng Wengang, et al. Development of a solar induced chlorophyll fluorescence monitor based on Fraunhofer line principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(Supp.):248~251. (in Chinese)

12 倪军. 作物生长信息采集系统研究与开发[D]. 南京:南京农业大学,2011.
Ni Jun. Research and development of crop growth information collection system [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)