

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2023.04.009

连续体机器人工作空间改进分析与仿真

齐 飞^{1,2}, 裴海珊¹, 窦小明², 白东明³, 张 恒¹, 朱 靖¹

(1. 常州大学 机械与轨道交通学院, 江苏 常州 213164; 2. 快克智能装备股份有限公司, 江苏 常州 213000; 3. 金华职业技术学院 机电工程学院, 浙江 金华 321000)

摘要: 首先介绍了连续体机器人的结构形式, 然后对其进行正逆运动学建模, 并利用传统蒙特卡洛法及 Matlab 软件对机器人的工作空间进行仿真分析。考虑到传统蒙特卡洛法散点分布不均匀等缺陷, 通过采用正态分布生成部分边界值点的方法进行改进, 改进后的工作空间散点图分布均匀, 更接近实际工作空间。为进一步验证改进方法的优越性, 将工作空间放置于长方体内并进行分割, 对部分层所包络的工作空间面积进行对比, 结果表明, 总随机点数相当的情况下, 改进方法精度明显优于传统算法, 这为连续体机器人的结构设计和性能分析奠定理论基础。

关键词: 连续体机器人; 运动学建模; 蒙特卡洛法; 工作空间

中图分类号: TP 242

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2023)04-0061-09

Continuum robot workspace improvement analysis and simulation

QI Fei^{1,2}, PEI Haishan¹, DOU Xiaoming², BAI Dongming³, ZHANG Heng¹, ZHU Jing¹

(1. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Quick Intelligent Equipment Co., Ltd., Changzhou 213000, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jinhua Vocational and Technical College, Jinhua 321000, China)

Abstract: The article first introduces the structure of the continuum robot, and then models its forward and inverse kinematics, and uses the traditional Monte Carlo method and Matlab software to simulate and analyze the robot's workspace. Considering the defects such as uneven distribution of scatter points in the traditional Monte Carlo method, the method of generating some boundary value points by using normal distribution was improved. The improved workspace scatter diagram has a uniform distribution and is closer to the actual workspace. In order to further verify the superiority of the improved method, the workspace was placed in a cuboid and divided, and the area of the workspace

收稿日期: 2023-02-15。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52105103); 中国博士后科学基金资助项目(2022M711436); 江苏省教育厅自然科学基金面上资助项目(21KJB460029); 常州市科技厅资助项目(20210116)。

作者简介: 齐飞(1990—), 男, 河南新乡人, 博士, 讲师。E-mail: qifei224@cczu.edu.cn

引用本文: 齐飞, 裴海珊, 窦小明, 等. 连续体机器人工作空间改进分析与仿真[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2023, 35(4): 61-69.

covered by some layers was compared. The results showed that when the total number of random points was equal, the accuracy of the improved method was obviously better than traditional algorithms, which lay a theoretical foundation for the structural design and performance analysis of continuum robots.

Key words: continuum robot; kinematics modeling; Monte Carlo method; workspace

随着科技的发展,人类已经不再满足于工业机器人的应用,随之应运而生一种新型仿生类机器人,即连续体机器人。与传统的关节型工业机器人不同,连续体机器人是以生物的仿生学原理作为基础,从蛇的身体、大象鼻子以及章鱼触手等生物器官上获得设计灵感而研发。

机器人工作空间是指机器人末端参考点所能达到的所有空间点的集合,体现了末端执行器的工作区域范围大小,是判断机器人工作性能的一个重要指标。对连续体机器人的工作空间进行分析有助于优化机器人的设计参数,对研究机械臂的性能、躲避障碍物有着非常重要的意义。机器人工作空间分析方法主要有图解法、解析法以及数值法^[1]。目前,国内外众多学者对连续体机器人的工作空间进行了分析,BURGNER-KAHRS 等^[2]通过蒙特卡洛法对关节空间进行随机采样来表示同心管连续体机器人的工作空间,并将工作空间表示为离散的体积进行计算。CAO 等^[3]提出了一种近似方法来估计肌腱驱动连续体机器人的工作空间,与扫描方法相比,降低了计算复杂度。YUAN 等^[4]提出了一种使用静态分析来分析工作空间的方法,该方法考虑了内部缆索张力、外部有效载荷和重力。还有一些学者在传统方法基础上进行改进,例如,CAO 等^[5]以空间机器人为例,在蒙特卡洛方法基础上,采用 β 分布生成机器人关节随机变量,获得了更精确的工作空间边界点。徐振邦等^[6]在传统蒙特卡洛法生成一个种子工作空间的基础上,对其进行扩展并利用体积求取算法进行仿真,获得了边界光滑、“噪声小”的工作空间。

目前国内大多数学者使用蒙特卡洛法对连续体机器人的工作空间进行了研究,而传统蒙特卡洛法生成的工作空间散点分布不均匀,并且当所取工作点数较少时,模拟工作空间明显小于实际工作空间。因此文章在对连续体机器人进行了运动学建模后,在传统蒙特卡洛法的基础上,使用正态分布生成边界值点的方法对其进行改进,在原来的基础上,适当增加机器人工作空间的边界值点,减少其他区域的工作点。对比分析发现,改进后的算法改善了散点分布不均匀的问题,并且获得的工作空间与实际空间更接近,实验表明改进后的方法对连续体机器人工作空间的描述更准确。

1 连续体机器人

1.1 连续体机器人整体结构设计

针对复杂狭小非结构化的空间环境检测需求,如飞机油箱检修、震后救援、核泄漏检修等,以及人体自然腔道的内窥镜诊断等微创手术问题,传统刚性机器人由于其自身结构的限制,无法满足狭小空间操作要求。文章设计了一款连续体机器人,其整体结构设计如图 1 所示,此机器人包括 2 部分,分别为机械臂弯曲单元和驱动单元。机械臂弯曲单元采用镍钛合金管一体化加工而成,由 2 段关节串联组成,每段关节由 3 根间隔 120°布置的缆索驱动

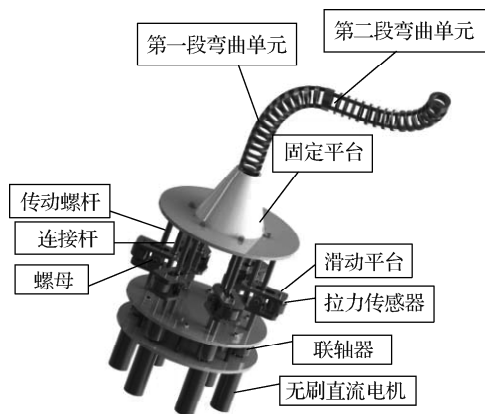


图 1 连续体机器人整体结构设计

Fig.1 Overall structure design of the continuum robot

并具有2个自由度。驱动单元由连接杆、传动螺杆、拉力传感器、联轴器、固定平台、滑动平台以及6个无刷直流电机组成,通过电机转动改变驱动线的长短来实现机械臂的弯曲和旋转,从而控制连续体机器人的运动。

1.2 机器人运动学建模

当完成连续体机器人的整体结构设计后,为实现机器人的实时控制,轨迹规划等任务,需对其进行运动学建模。与工业机器人相比,连续体机器人具有独特的灵活性及超冗余度,对它进行运动学建模相对复杂和困难。同时传统的 Denavit-Hartenberg 参数法不再适用于连续体机器人的运动学建模,为使建模方便,HANNA 等^[7]采用基于常曲率的分析方法对它进行运动学建模,降低了计算难度。

如图2所示,将连续体机器人的工作空间分为驱动空间、关节空间以及操作空间3种。图2驱动空间中的 l_{i1}, l_{i2}, l_{i3} 分别为第 i 段通过第1,2,3绳孔的绳长;关节空间中的 α_i, θ_i 分别为第 i 段弯曲单元的旋转角和弯曲角;操作空间中的 ${}^{i-1}_i\mathbf{T}$ 为第 $i-1$ 段到 i 段弯曲单元的齐次变换矩阵, x, y, z 分别为该节机械臂末端位置坐标。

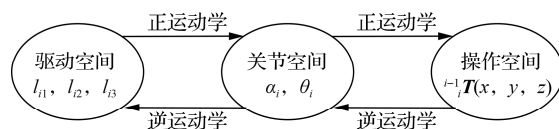


图2 连续体机器人运动空间映射

Fig.2 Motion space mapping of continuum robot

从驱动空间到操作空间的映射为正运动学建模,反之,从操作空间到驱动空间的映射为逆运动学建模。机器人的驱动空间和操作空间之间的直接映射关系是抽象而复杂的,因此,通过添加关节空间实现驱动空间到操作空间的正向映射以及操作空间到驱动空间的逆向映射,然后根据机器人的空间几何关系建立其正逆运动学模型。

1.2.1 驱动空间到操作空间的正运动学建模

以单关节弯曲单元为例进行运动学建模,几何模型及坐标系的定义如图3所示,连续体机器人采用绳索驱动的方式,以第 i 段弯曲单元的基端连接盘中心 O_{i-1} 为原点建立初始坐标系 $\sum_{i-1}(O_{i-1}-x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1})$,从原点出发连接绳孔1并进行延长作为 x_{i-1} 轴,连接原点作连接盘的垂线并向上延长作为 z_{i-1} 轴,通过右手定则确定 y_{i-1} 轴。同理,以第 i 段顶端连接盘中点 O_i 为原点建立坐标系 $\sum_i(O_i-x_iy_iz_i)$ 。

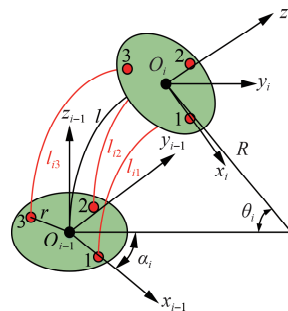


图3 单关节几何模型

Fig.3 Single-joint geometric model

为实现单关节段的初始坐标系 $\sum_{i-1}(O_{i-1}-x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1})$ 到坐标系 $\sum_i(O_i-x_iz_i)$ 的变换,首先将坐标系 $\sum_{i-1}(O_{i-1}-x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1})$ 的 x_{i-1} 轴绕 z_{i-1} 轴旋转 α_i 角度到弯曲平面,然后将原点 O_{i-1} 沿弧线平移到原点 O_i 处,再将坐标系绕 y_{i-1} 轴旋转 θ_i 角度使 z_{i-1} 轴与顶端 z_i 轴重合,最后,绕 z_i 轴旋转 $-\alpha_i$ 角度将新获得的坐标系与坐标系 $\sum_i(O_i-x_iz_i)$ 完全重合,由此可得第 $i-1$ 段到第 i 段弯曲单元的齐次变换矩阵为

$${}^{i-1}_i\mathbf{T} = \text{Rot}(z, \alpha_i) \text{Trans}\left(\frac{l}{\theta_i} \cos \alpha_i (1 - \cos \theta_i), \frac{l}{\theta_i} \sin \alpha_i (1 - \cos \theta_i), \frac{l}{\theta_i} \sin \theta_i\right) \text{Rot}(y, \theta_i) \text{Rot}(z, -\alpha_i) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos^2 \alpha_i \cos \theta_i + \sin^2 \alpha_i & \cos \alpha_i \sin \alpha_i (\cos \theta_i - 1) & \cos \alpha_i \sin \theta_i & \frac{l}{\theta_i} \cos \alpha_i (1 - \cos \theta_i) \\ \cos \alpha_i \sin \alpha_i \cos \theta_i - \cos \alpha_i \sin \alpha_i & \sin^2 \alpha_i \cos \theta_i + \cos^2 \alpha_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & \frac{l}{\theta_i} \sin \alpha_i (1 - \cos \theta_i) \\ -\cos \alpha_i \sin \theta_i & -\sin \alpha_i \sin \theta_i & \cos \theta_i & \frac{l}{\theta_i} \sin \theta_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\alpha_i \in (0, 2\pi)$; $\theta_i \in (0, \pi/2)$ 。

在得到第 i 段弯曲单元在空间中的位置后, 通过链式法则将每两个相邻弯曲单元变换矩阵相乘, 即可获得以下齐次变换矩阵

$${}^0T_i = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \cdots {}^{i-2}T_{i-1} {}^{i-1}T_i \quad (2)$$

式中 iT 为第 i 段弯曲单元相对第 1 段的初始坐标系的齐次变换矩阵。

1.2.2 操作空间到驱动空间的逆运动学建模

由正运动学模型中第 $i-1$ 段到第 i 段弯曲单元的齐次变换矩阵可得机械臂末端位置, 即 x_i , y_i , z_i 为

$$\begin{cases} x_i = \frac{l}{\theta_i} \cos \alpha_i (1 - \cos \theta_i) \\ y_i = \frac{l}{\theta_i} \sin \alpha_i (1 - \cos \theta_i) \\ z_i = \frac{l}{\theta_i} \sin \theta_i \end{cases} \quad (3)$$

如图 4 中连接盘横截面所示, 3 根绳索在圆周上互相间隔均为 120° 。

由几何关系可计算得 R_{i1} , R_{i2} , R_{i3} 的长度分别为

$$\begin{cases} R_{i1} = R - r \cos \alpha_i \\ R_{i2} = R - r \cos \left(\alpha_i - \frac{2}{3} \pi \right) \\ R_{i3} = R - r \cos \left(\alpha_i + \frac{2}{3} \pi \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_{i1} , R_{i2} , R_{i3} 分别为第 i 段弯曲单元上第 1, 2, 3 驱动绳对应的弯曲半径; R 为第 i 段弯曲单元连接盘中心对应的弯曲半径; r 为连接盘的驱动绳索孔中心到盘中心的距离。

由此可得第 i 段弯曲单元上各驱动绳索长度分别为

$$\begin{cases} l_{i1} = l - r \theta_i \cos \alpha_i \\ l_{i2} = l - r \theta_i \cos \left(\alpha_i - \frac{2}{3} \pi \right) \\ l_{i3} = l - r \theta_i \cos \left(\alpha_i + \frac{2}{3} \pi \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: l_{i1} , l_{i2} , l_{i3} 分别为第 i 段弯曲单元的第 1, 2, 3 孔所对应的绳长; l 为各弯曲单元长度。

2 传统蒙特卡洛法原理及仿真

求解机械臂的可达工作空间方法中, 比较有代表性的为迭代法、搜索法以及蒙特卡洛法^[8-10]。其

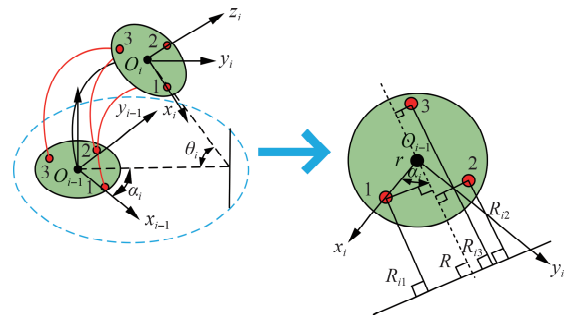


图 4 连接盘横截面

Fig.4 Cross-section of the connection plate

中,蒙特卡洛法的算法比较简单,应用范围广泛,适应性强,常用于并联机器人、串联机器人、冗余机器人等的工作空间分析^[11]。蒙特卡洛法是一种基于随机抽样来解决数学问题的方法,在求解工作空间时,随机抽取大量不同弯曲单元的变量值,将变量组合带入正向运动学模型,从而计算出连续体机器人末端点的坐标值,坐标值包裹的空间代表机器人的工作空间。

利用传统蒙特卡洛法对连续体机器人的工作空间进行仿真,首先给定弯曲单元的固定长度为200 mm,设定各弯曲单元的弯曲角 $\theta_i \in (0, \pi/2)$,旋转角 $\alpha_i \in (0, 2\pi)$,随机点的个数为40 000。根据式(1)和式(2),并通过Matlab软件,绘制第1至第3段弯曲单元可达工作空间三维图及XOZ平面投影图,如图5中蓝色(第1弯曲单元)、红色(第2弯曲单元)、绿色(第3弯曲单元)点所示。

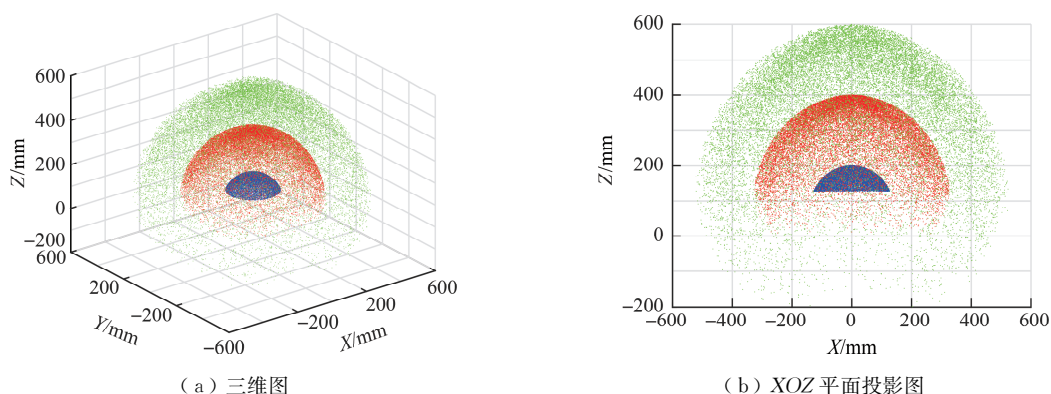


图5 第1~3段弯曲单元工作空间三维图及XOZ平面投影图

Fig.5 3D view and XOZ plane projection view of the working space of the first to third stage bending units

由图5可知,机器人的可达工作空间在三维空间中的形状是一个球冠面,内部存在空腔,机器人末端点在运动过程中均不能到达球面包络的内部和外部区域,空间中的随机点数分布不均匀,并且随着弯曲单元数量的增加,其工作空间上的点越聚集于上端部分,在下端的极端部分分布的点相对较少。虽总体点数很大,但一些边界处的随机点分布仍然很低,其主要原因是机械臂的自由度冗余,即机械臂的多重空间构型对应于操作空间的同一点,导致关节空间到操作空间的映射关系是非线性的。用蒙特卡洛法取得的关节角的角度值服从均匀分布,经过映射后,得到工作空间点在整个工作空间的分布就不再满足均匀分布,导致不能生成精确的工作空间边界。

3 通过正态分布法对传统蒙特卡洛法进行改进分析

3.1 对传统蒙特卡洛法进行改进

为了使工作空间随机点分布更均匀,提升边界提取精度,使工作空间更接近实际大小,应重点改进边界部分随机点的分布情况,因此采用正态分布生成边界值的方法对传统蒙特卡洛法进行改进,从而加大边界处随机点的分布密度,优化连续体机器人的工作空间。实验中,首先通过传统蒙特卡洛法随机获得20 000个点,再通过如图6所示的正态分布方法随机获取20 000个点,其中正态分布的方差

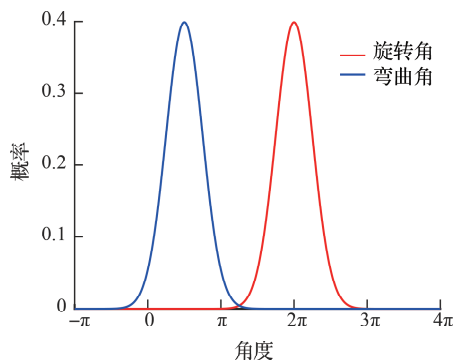


图6 正态分布

Fig.6 Normal distribution

取 0.5 mm, 将上述 40 000 个点中符合要求的变量值带入到正运动学模型进行计算。

利用正态分布改进传统蒙特卡洛法的具体描述为: 首先初始化设定机械臂长为 200 mm, 旋转角为 $[0, 2\pi]$, 弯曲角为 $[0, \pi/2]$, ① for 语句循环 20 000 次; ② 利用 rand 函数随机产生旋转角、弯曲角; ③ 代入式 (1) 和式 (2) 获得第 i 段弯曲单元相对与初始坐标系之间的齐次变换矩阵 0T_i , 并获得末端位置的三维坐标; ④ 结束 for 循环语句; ⑤ for 语句循环 10 000 次; ⑥ 利用 rand 函数随机产生旋转角, 利用正态分布函数 normrnd 随机产生弯曲角, 以 $\pi/2$ 为均值, 0.5 为方差; ⑦ 利用 if 语句判定弯曲角是否满足设定范围; ⑧ 满足则代入式 (1) 和式 (2), 获得末端三维坐标, 不满足则舍弃; ⑨ 结束 if 语句; ⑩ 结束 for 循环语句; ⑪ for 语句循环 10 000 次; ⑫ 利用 rand 函数随机产生弯曲角, 利用正态分布函数 normrnd 随机产生旋转角, 以 2π 为均值, 0.5 为方差; ⑬ 利用 if 语句判定弯曲角是否满足设定范围; ⑭ 满足则代入式 (2) 和式 (3), 获得末端三维坐标, 不满足则舍弃; ⑮ 结束 if 语句; ⑯ 结束 for 循环语句; ⑰ 利用 plot 函数绘制 3 次循环下产生的点。

以三段弯曲单元为例, 在总点数均为 40 000 的情况下, 将正态分布改进后的工作空间三维图, XOZ 平面投影图及截面图与传统蒙特卡洛法进行对比分析, 如图 7~图 9 所示。

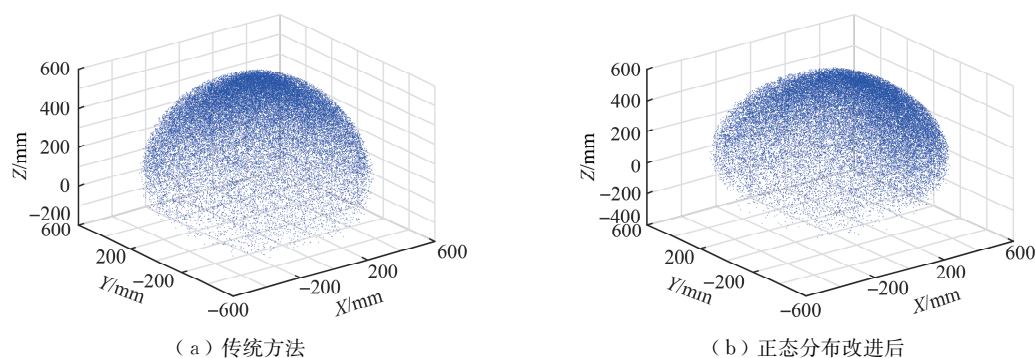


图 7 传统方法与正态分布改进后的工作空间三维图对比

Fig.7 Comparison of the 3D map of the workspace between the traditional method and the improved normal distribution

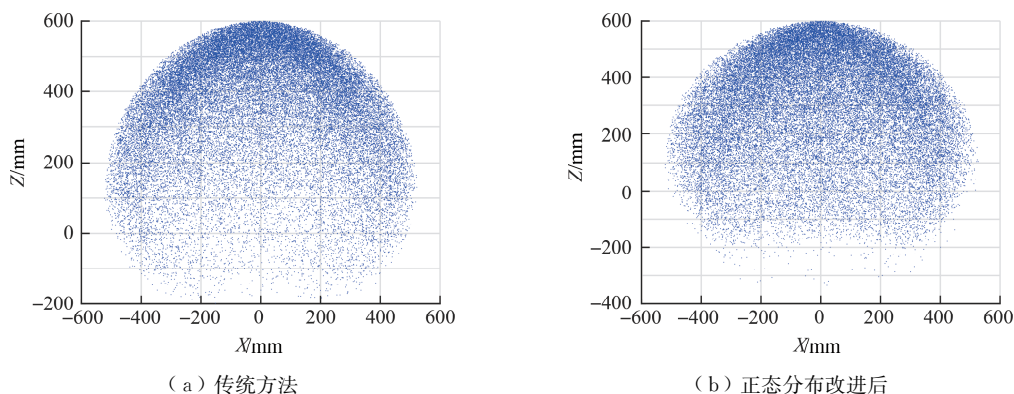


图 8 传统方法与正态分布改进后的工作空间 XOZ 平面投影图对比

Fig.8 Comparison of the XOZ plane projection of the workspace between the traditional method and the improved normal distribution

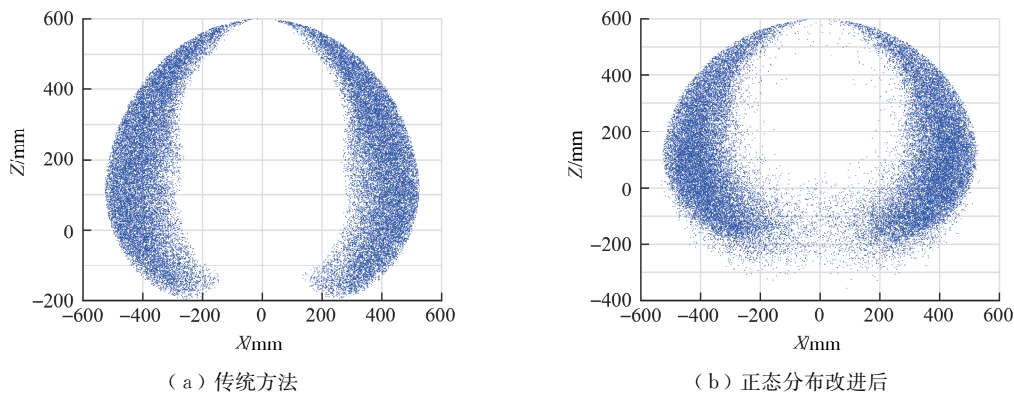


图 9 传统方法与正态分布改进后的工作空间 XOZ 平面截面图对比

Fig.9 Comparison of the XOZ plane cross-sectional view of the workspace between the traditional method and the improved normal distribution

与传统蒙特卡洛法相比,通过正态分布改进后的工作空间顶端部分极值即 Z 轴最大值为 600 mm 保持不变,见表 1,在 X 轴及 Y 轴方向上左右宽度基本保持不变,但 Z 轴方向上所能到达的最小值发生了显著变化,由原来的-193 mm 变为-346 mm,下半部分工作空间随机点明显增加,使得此工作空间到达范围更广。并且与传统蒙特卡洛法获得的工作空间相比,改进后的工作空间散点分布更加均匀,其平面投影图整体更接近一个圆形,而原来的工作空间下端有明显缺口,并对 XOZ 平面投影图的面积进行求取,分别为 $6.615 \times 10^5 \text{ mm}^2$ 和 $7.356 \times 10^5 \text{ mm}^2$,故通过改进后的蒙特卡洛法获得的工作空间图形效果更好,更接近实际的工作空间。

表 1 传统方法与正态分布改进后工作空间对比分析

Table 1 Comparative analysis of traditional method and improved normal distribution workspace						mm
方法	X 轴最大值	X 轴最小值	Y 轴最大值	Y 轴最小值	Z 轴最大值	Z 轴最小值
传统蒙特卡洛法	520	-521	521	-519	600	-193
正态分布改进后	516	-520	520	-521		-346

3.2 工作空间改进效果分析

为进一步验证改进算法的优越性,在随机点数相同情况下产生机器人的工作空间,并将其放入长方体空间中,对长方体进行分割,对每层空间中的随机点所包围的面积进行对比。

工作空间分层方式为:沿基础坐标系 Y 轴方向的-600 mm 到 600 mm 平均分为 60 层,即每层宽度为 20 mm,如图 10 (a) 所示,并将机器人的可达工作空间放置在长方体内进行分割,如图 10 (b) 所示。

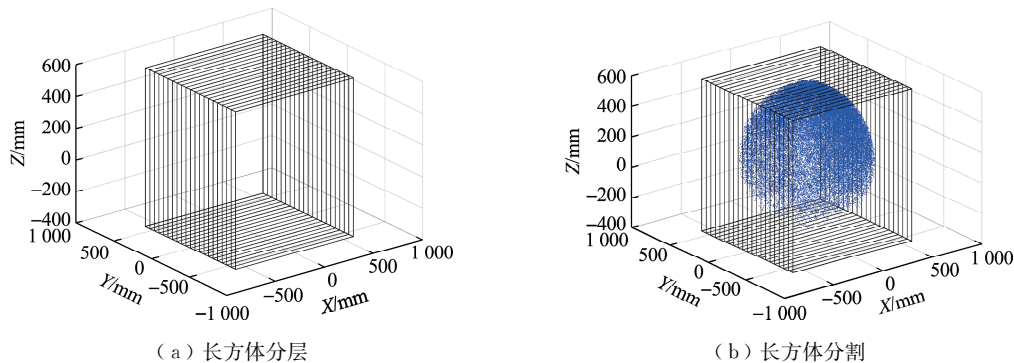


图 10 长方体分层与长方体分割展示

Fig.10 Layered display of cuboid and cuboid segmentation

对分割后的第 20 层和第 30 层工作空间进行对比，具体如图 11 和图 12 所示。原始随机点数均为 40 万时，分别对第 20 层和第 30 层 XOZ 平面投影图进行对比，对比效果显示改进算法生成的工作空间都明显优于传统方法所生成的工作空间。

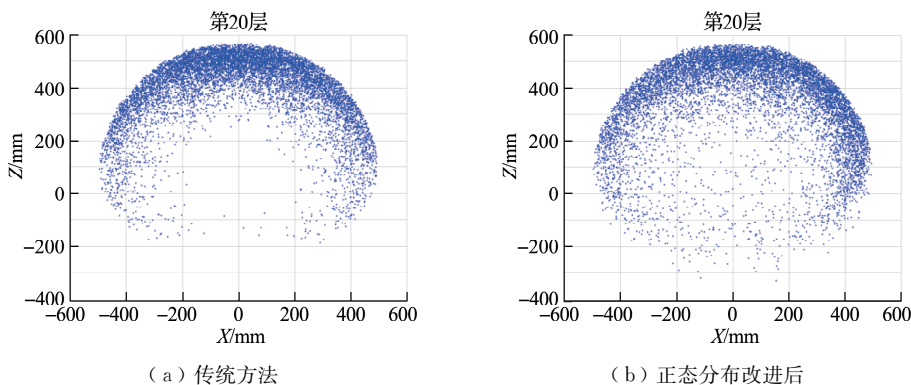


图 11 第 20 层效果展示

Fig.11 Effect display of the 20th layer

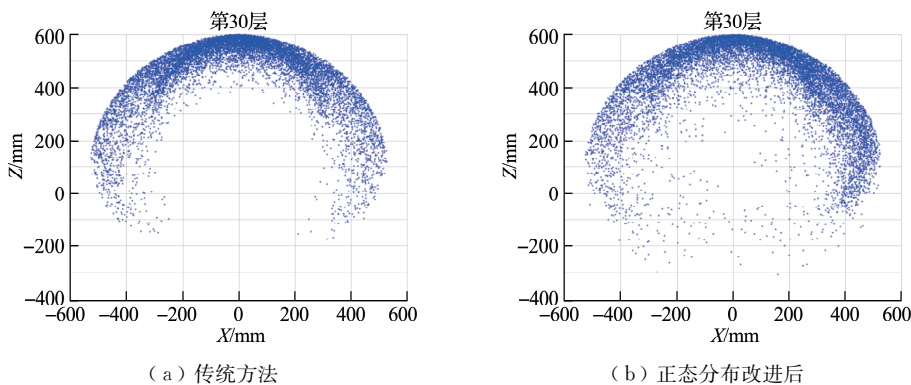


图 12 第 30 层效果展示

Fig.12 Effect display of the 30th layer

第 10 层到第 50 层的 XOZ 平面投影图中随机点包裹的面积计算结果见表 2。由表 2 可知，改进方法生成的工作空间从第 10 层到第 50 层的面积均大于传统方法的面积，结果表明总随机点数相当的情况下，改进方法获得的工作空间精度明显优于传统方法所得工作空间的精度。

表 2 部分层的面积计算结果

Table 2 Area calculation results of some floors

mm²

方法	10 层	20 层	30 层	40 层	50 层
传统方法	379 880	584 730	633 640	580 810	335 320
改进方法	407 960	680 740	724 700	647 590	351 160

4 结 论

基于改进的蒙特卡洛法对连续体机器人进行了工作空间的研究。首先对连续体机器人的结构进行分析，利用几何分析法建立其正逆运动学模型，获得弯曲单元坐标系变换的齐次变换矩阵，然后通过齐次变换矩阵中的位置公式，在现有的研究机器人工作空间的蒙特卡洛法基础上，提出了利用正态分

布生成部分边界点的优化方法,并在 Matlab 软件上进行了仿真。实验表明,改进方法获得的工作空间中的随机点分布更均匀,图形效果更好,更接近实际工作空间。

参考文献:

- [1] 崔玉洁,张祖立,范磊. 基于蒙特卡洛方法的采摘机械手工作空间分析[J]. 农机化研究, 2007, 29(12): 62-63, 94.
- [2] BURGNER-KAHR J, GILBERT H B, GRANNA J, et al. Workspace characterization for concentric tube continuum robots[C]//2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago: IEEE, 2014: 1269-1275.
- [3] CAO K, KANG R J, BRANSON D T, et al. Workspace analysis of tendon-driven continuum robots based on mechanical interference identification[J]. Journal of Mechanical Design, 2017, 139(6): 062303.
- [4] YUAN H, LI Z. Workspace analysis of cable-driven continuum manipulators based on static model[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 49: 240-252.
- [5] CAO Y, LU K, LI X J, et al. Accurate numerical methods for computing 2D and 3D robot workspace[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2011, 8(6): 76.
- [6] 徐振邦,赵智远,贺帅,等. 机器人工作空间求解的蒙特卡洛法改进和体积求取[J]. 光学精密工程, 2018, 26(11): 2703-2713.
- [7] HANNAN M W, WALKER I D. Kinematics and the implementation of an elephant's trunk manipulator and other continuum style robots[J]. Journal of Robotic Systems, 2003, 20(2): 45-63.
- [8] DIAO X M, MA O. Workspace analysis of a 6-DOF cable robot for hardware-in-the-loop dynamic simulation[C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing: IEEE, 2007: 4103-4108.
- [9] PIAO M B, FU Y L, WANG S G. Research on workspace of a two-arm surgical robot[C]//2007 International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin: IEEE, 2007: 1067-1072.
- [10] 傅绍文,姚郁. 六自由度 Stewart 平台四维工作空间搜索方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(1): 11-13.
- [11] 刘志忠,柳洪义,罗忠,等. 机器人工作空间求解的蒙特卡洛法改进[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 230-235.

(责任编辑:谭晓荷)