引文格式：杨来浩, 薛晨菲, 文庆, 等. 多约束耦合下绳驱超冗余连续体机器人一体化运动规划方法[J]. 航空制造技术, 2026, 69(20): 26020239.

YANG Laihao, XUE Chenfei, WEN Qing, et al. Integrated motion planning method for cable-driven hyper-redundant continuum robots under multiple coupled constraints[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(20): 26020239.

多约束耦合下绳驱超冗余连续体机器人一体化运动规划方法

杨来浩[1]，薛晨菲[1]，文　庆[2]，李晨铭[1]，杨　宇[3]，王志刚[3]，刘　洋[4]，孙　瑜[1]，陈雪峰[1]

（1. 西安交通大学，西安 710049；2. 北方自动控制技术研究所，太原 030006；
3. 中国飞机强度研究所，西安 710065；4. 大连长丰实业总公司，大连 116200）

[摘要] 针对飞机油箱复杂受限空间内部检测对机器人运动规划提出的高精度、避障及构型约束耦合的需求，提出了一种多约束耦合下绳驱超冗余连续体机器人的运动规划方法。首先，构建了面向任务空间的全局路径规划器，将路径长度、曲率半径、关节角度和避障约束统一纳入优化过程，实现路径可达性、平滑性和安全性的协同规划；其次，提出了融合进给补偿机制的逆运动学快速求解方法，以提高路径跟随控制过程中的求解精度和计算效率。基于此，实现了从任务空间连续路径到关节空间运动参数的一体化运动规划。仿真结果表明，该方法可适应多种复杂环境下的路径规划任务，逆运动学求解时间为0.0008 s。搭建了21自由度绳驱超冗余连续体机器人样机系统，并开展了飞机油箱探测任务中的路径规划与避障试验。试验结果表明，该方法能够实现复杂受限空间内机械臂轨迹的精确拟合与稳定跟随，充分验证了该方法在飞机油箱复杂受限空间检测任务中的有效性和可行性。

关键词：超冗余机器人；连续体机器人；路径规划；逆运动学；优化算法；飞机油箱；受限空间

中图分类号：V232.4　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.16080/j.issn1671-833x.26020239



杨来浩

副研究员，博士，研究方向为航空装备智能运维、软体机器人、触觉传感、具身智能。

绳驱超冗余连续体机器人是一种仿生蛇形机器人，得益于其独特的结构和驱动方式，该类型机器人具备大长径比和高灵活性，适用于复杂狭窄的工作环境[1]。绳驱超冗余连续体机器人可广泛应用于核电站维修[2]、航空发动机原位检测[3]、飞机油箱检测[4]、微创手术[5]和灾害救援[6]等领域。然而，也正是超冗余自由度的特性也为其路径规划和逆运动学求解带来了挑战[7]。

机器人的路径规划主要分为全局路径规划[8]与局部路径规划[9]。全局路径规划通常是指在已知先验环境地图的前提下，对机器人的最优路径进行离线计算；而局部路径规划要求机器人在运动过程中，基于实时感知的环境变化对路线进行动态调整，该过程对机器人的感知精度、算法实时性及避障决策提出了更高挑战。本文主要聚焦于绳驱超冗余连续体机器人的全局路径规划问题。

绳驱超冗余连续体机器人的路径规划本质上是多约束优化问题。现有的全局路径规划算法主要包括启发式搜索算法[10]、随机采样法[11]及智能优化算法[12]等。然而，受限于绳索驱动系统独特的结构与高度冗余

收稿日期：2026-06-12；**退修日期：**2026-07-09；**录用日期：**2026-07-30

基金项目：国家自然科学基金(52475129, 52375125)

的自由度，传统的路径规划算法在处理该类问题时难以同时兼顾复杂的关节约束与构型限制，呈现出一定的局限性。针对上述挑战，在传统路径规划算法上进行改进，适用于绳驱动超冗余连续体机器人运动的路径规划方法被提出。例如，通过椭球模型代替线段采样的E–RRT*算法[13]；使用粒子群和RRT*结合的智能优化算法[14]；将机器人的运动模型与A*算法结合的规划算法[15]以及改进的人工势场法[16]等，有效提升了传统的算法在绳驱动系统中的适用性。此外，部分学者结合绳索驱动机器人的运动学特性提出了专用规划算法，如基于几何约束的分段规划算法[17]、预测插值算法[18]及基于商空间的规划算法[19]等。然而，现有算法鲜有协同考虑机器人关节限位、路径曲率及避障等多约束耦合的情况。若在规划中忽略关节最大弯曲角度约束[20]，机器人在实际跟随过程中会由于关节超过限制而无法拟合路径；若忽略路径曲率约束，连续体机器人在多段离散拟合时将产生脊线与既定路径的严重偏离，进而导致与障碍物发生碰撞。因此，协同考虑多个约束耦合的影响是确保连续体机器人顺利安全进入超狭窄空间的前提条件。

此外，由于绳驱超冗余连续体机器人的多级传动特性，在确定机器人的运动路径后，需进一步通过逆运动学求解以获取其对应的关节空间变量。现有的逆运动学求解方法主要包括雅可比伪逆法[21]、几何法[22]及神经网络法[23]。其中，雅可比伪逆法和神经网络法虽然通用性较好，但随着机器人自由度增加，计算成本增大，几何法由于求解速度快实时性强已成为研究重点。

在基于几何的逆运动学求解方法中，脊线法[24]通过预设一条路径曲线，将机器人关节拟合到曲线上实现高效逆运动学求解。但是特定的脊线会降低机器人的灵活性。特征向量法[25]通过引入特征向量来避免局部坐标系的建立，但其主要简化动力学建模过程。启发式几何方法FABRIK法[26]虽然具备计算效率优势，但其只能求解5自由度约束下的逆运动学问题，且在目标点超出工作空间时缺乏有效的处理机制。针对这些局限，通过引入进给自由度和指向约束[27]来提升算法的迭代速度和适用范围，或者通过引入滚转自由度迭代及关节联动[28]来突破自由度局限。然而，如何在保证6自由度约束的前提下，实现高精度的路径跟随求解，是目前FABRIK法需要解决的问题。

综上所述，针对绳驱超冗余连续体机器人路径规划和逆运动学求解中存在的问题，本文提出一种结合全局路径规划与逆运动学求解的一体化运动规划方法（Integrated motion planning method，IMP）。在全局路径规划中将关节限位、路径曲率等约束集成至粒子群寻优中，并提出了一种结合导轨进给动态补偿的改进快速逆运动学求解器，实现了绳驱超冗余连续体机器人从任务空间路径到关节空间变量的完整求解，为其相关应用提供理论与技术支持。

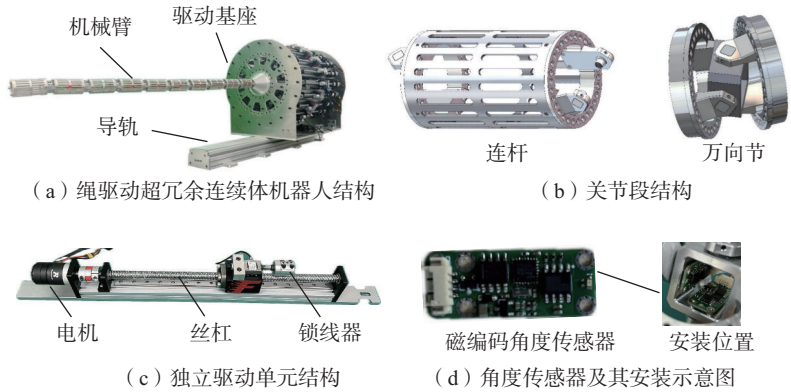
1 机器人结构与运动学模型

为了验证所提出算法的有效性，搭建了21自由度的绳驱超冗余连续体机器人试验平台，并推导了其多级状态空间之间的运动学映射，从而为后续路径规划和逆运动学求解问题奠定硬件和理论基础。

1.1 机器人结构

本文所设计的绳驱超冗余连续体机器人的结构如图1(a)所示，机器人主要由3部分组成：机械臂、驱动基座及进给导轨。机械臂部分是机器人主要的执行机构，该部分包含10个连杆和10个万向节关节。每个连杆的两端各有一个带驱动绳孔的圆盘，用于引导和固接驱动绳索，相邻两个连杆之间通过一个万向节关节相连，整个机械臂通过一个万向节与驱动基座相连。每个万向节关节提供两个自由度：俯仰和偏航。连杆和万向节的结构如图1(b)所示。

驱动基座主要为机器人提供驱动力。考虑到每个关节具有两个自由度，为实现冗余驱动，每个关节配置3根独立可控的驱动绳。因此，本文所设计的机器人共需要30根独立驱动绳。每个驱动绳均由1个独立的驱动单元驱动，其结构如图1(c)所示。该驱动单元主要由电机、丝杠滑块及锁线器构成。绳索经锁线器固定后，通过滑轮和驱动绳孔被精确导向并作用于关节，以实现驱动。整个驱动基座被固定于一个可以直线进给的导轨上，此设计是为了提高机器人的空间可达性，进而拓展其作业



（a）绳驱动超冗余连续体机器人结构　（b）关节段结构

（c）独立驱动单元结构　（d）角度传感器及其安装示意图

图1 绳驱动超冗余连续体机器人整体结构图

Fig.1 Overall structure diagram of cable-driven hyper-redundant continuum robot

空间。

为了实现对机器人运动状态的实时监测与位姿感知，每个万向节关节的各转轴处均集成了基于磁编码原理的角度传感器，该传感器具有0.01°的角度分辨率，能够满足绳驱超冗余连续体机器人的运动控制精度需求。传感器的通讯线缆通过连杆及万向节中心孔汇集并引导到驱动基座内部，该传感器的结构和安装位置如图1(d)所示。

综上所述，该绳驱超冗余连续体机器人共具有21自由度并且能够实现实时的关节角度检测，该机器人的具体参数如表1所示。

1.2 运动学模型

绳驱超冗余连续体机器人虽然同样使用电机作为驱动力，但与传统的关节型机器人相比，驱动力传递过程更复杂，涉及多级状态空间关系的映射，包括关节空间与驱动空间之间的映射关系；关节空间与任务空间之间的映射关系。这些状态空间之间的映射关系如图2所示。

首先，介绍关节空间与任务空间之间的映射关系。由于绳驱超冗余连续体机器人采用万向节刚性连接，其末端位姿与世界坐标系之间的转换可以使用齐次变化矩阵准确表达。

为建立绳驱超冗余连续体机器人连杆坐标系，以机器人基座为世界坐标系。坐标系原点位于根部关节中心，Z轴与机械臂中心轴线重合，X轴和Y轴分别与根部关节的两个正交转轴重合。各个连杆坐标系位于各个关节中心，Z轴指向下一个关节中心，X轴和Y轴分别与各个关节的两个正交转轴重合，所有坐标轴正方向满足右手定则。为了便于后续描述和避免混淆，本文定义根部关节为1号关节，其余关节编号按照从根部到末端的顺序依次递增。机器人连杆坐标系的空间分布如图3(a)所示。

表1 绳驱动超冗余连续体机器人参数

Table 1 Parameters for the cable-driven hyper-redundant continuum robot

参数名	参数值
自由度	21
总长度/mm	1290
驱动绳直径/mm	1.2
机械臂外径/mm	55
负载能力/kg	1.0
最大弯曲角度/(°)	45

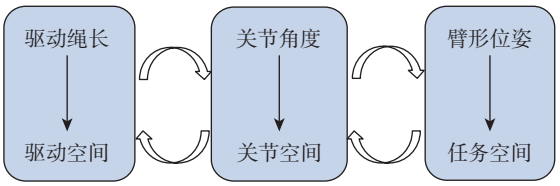


图2 多级状态空间映射关系图

Fig.2 Diagram of multi-level state space mapping relationship

相邻两个连杆坐标系之间的齐次变换矩阵由式(1)得出。

$$ {}^{n-1}_{n}\boldsymbol{T}=\mathbf{Trans}(0,0,L)\,\mathbf{Rot}(y,\psi_{n-1})\,\mathbf{Rot}(x,\varphi_{n-1}) \tag{1} $$

式中，**Trans**()为平移矩阵；**Rot**()为旋转矩阵；L为两个坐标系原点之间的距离；ψ_n、φ_n分别为第n个关节段绕万向节2个旋转轴的旋转角度；x、y分别为万向节关节的2个旋转轴。

则机器人末端位姿与世界坐标系之间的变化矩阵可以通过式(2)得到。

$$ {}^{0}_{n}\boldsymbol{T}=\prod_{i=1}^{n}{}^{i-1}_{i}\boldsymbol{T} \tag{2} $$

随后，阐述关节空间与驱动空间之间的映射关系。该映射描述的是关节角度与驱动绳长之间的关系，主要通过计算机器人连杆上驱动绳固定点之间的几何距离得到。

为构建机器人关节坐标系，考虑到机器人每个关节的结构相同，因此，只需要分析单一关节即可。首先，定义连杆两端带驱动绳孔的圆盘，将靠近机器人根部的圆盘定义为下圆盘；靠近机器人末端的定义为上圆盘。在一个关节单元内，建立3个局部坐标系，3个坐标系原点分别位于上圆盘中心、下圆盘中心和关节中心。下圆盘坐标系Z轴指向关节中心；关节中心坐标系Z轴指向上圆盘中心；上圆盘坐标系Z轴指向下一个关节中心，X和Y轴分别与关节的两个正交转轴平行或重合。关节坐标系如图3(b)所示。

在图3(b)中，${}^{\mathrm{D}}A_k$表示下圆盘上第k根驱动绳孔在坐标系$\{D\}$中的位置矢量；${}^{\mathrm{T}}B_k$表示上圆盘上第k根驱动绳孔在坐标系$\{T\}$中的位置矢量。由于两个位置矢量定义在不同的局部坐标系中，因此要使用式(1)将它们转换到共同参考坐标系$\{U\}$中表示，具体计算为

$$ {}^{\mathrm{U}}A_k={}^{\mathrm{U}}_{\mathrm{D}}T\,{}^{\mathrm{D}}A_k \tag{3} $$

$$ {}^{\mathrm{U}}B_k={}^{\mathrm{U}}_{\mathrm{T}}T\,{}^{\mathrm{T}}B_k \tag{4} $$

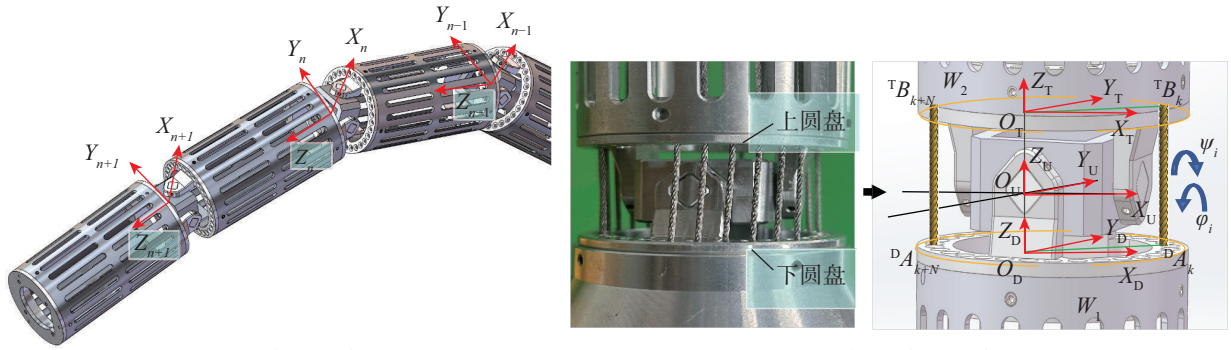
之后，对这两个已经转换到同一参考坐标系下的位置矢量求取欧式距离，即可得到关节角度和驱动绳长之间的关系，表达式为

$$ l_{i,k}=\left\|{}^{\mathrm{U}}A_k-{}^{\mathrm{U}}B_k\right\|^{1/2}=f(\varphi_i,\psi_i) \tag{5} $$

式中，φ_i为第i个关节短绕x轴的转角；φ_i为绕y轴的转角。

2 多约束全局路径规划

绳驱超冗余连续体机器人的全局路径规划是一个涉及多重约束的复杂问题，为了实现机械臂能够拟合路径曲线，其求解需要综合考虑路径长度、曲率、关节角度和避障等关键因素。针对这一问题，提出了一种综合考虑多约束的粒子群优化的全局路径规划器。该规划器以粒子群算法为基础，通过设计适应度函数的惩



（a）连杆坐标系示意图　　（b）关节坐标系示意图

图3　机器人坐标系示意图

Fig.3　Diagram of robot coordinate system schematic

罚项，从而实现对最优路径的有效3索和求解。

2.1　路径规划问题描述

针对绳驱超冗余连续体机器人，其路径规划问题可以概括为以下数学模型。

$$\begin{aligned}&\min f(P)=\sum_{i=1}^{n-1}\left\| p_{i+1}-p_i \right\| \\ &\text{s.t.}\quad P\cap O=\varnothing \\ &\qquad \kappa(P)\leqslant\kappa_{\max} \\ &\qquad \theta_i\leqslant\theta_{\max},\ i=1,2,\cdots,n\end{aligned} \tag{6}$$

式中，$f(P)$为路径长度函数；P为路径函数；O为障碍物函数；$\kappa(P)$为路径曲率函数；$\kappa_{\max}$为路径曲率的最大值；θ_i为第i个关节角度；$\theta_{\max}$为关节角度的最大值。

具体而言，该数学模型旨在以路径长度最小化为优化目标，在满足无碰撞避障的前提下，同时满足路径最大曲率限制及机器人关节角物理极限约束，从而求解出最优的路径曲线。

2.2　约束条件

绳驱超冗余连续体机器人路径规划问题中的关键约束包括关节角度、路径曲率、避障及路径长度。为了有效利用粒子群算法进行路径求解，需要将物理约束转换为代数约束，进而进行路径求解。

（1）路径曲率约束。由于机器人关节存在角度范围限制，为了确保机械臂能够精准拟合路径曲线，其路径曲率必然存在上限。一旦路径曲率超出此上限时，机械臂将无法拟合既定路线，进而导致偏离。

机械臂实现对预设路线的精确拟合的前提是其所有关节节点均能位于该路径上。其中，任意相邻3个关节节点即可以确定一段局部路径曲率。通过这3个节点构建外接圆，并推导出该圆的半径，即可得到路径曲率的极限值的表达式为

$$\kappa\leqslant\frac{2\sin\left(\theta_{\max}/2\right)}{L} \tag{7}$$

（2）关节角度约束。绳驱动超冗余连续体机器人在设计时就考虑了最大关节转角，当求解转角大于最大值时，机器人就无法运动到目标点。从式（7）中可以看出，路径曲率的上限与关节角度的极限值直接关联。因此，在路径规划的求解过程中，对路径曲率施加约束，便能同时隐式的约束了关节角度，从而简化了求解过程。

（3）避障约束。考虑到绳驱超冗余连续体机器人需要进入复杂狭窄的空间中并执行相应任务，且不能对周边设备造成破坏，因此需要预设足够的安全裕度。同时，对于该类机器人来说，避障不仅要求关节节点避开障碍物，机械臂连杆部分也不能与障碍物发生碰撞。

由于机器人对曲线拟合精度要求较高，可认为所规划的曲线为机械臂的中心轴线。基于这一简化假设，则全臂型避障条件就转换为路径曲线到障碍物之间的最小距离限制，其数学表达式为

$$\Delta d\geqslant r+\delta \tag{8}$$

式中，Δd为路径曲线到障碍物的距离；r为机械臂自身半径；δ为安全阈值。

（4）路径长度设定为优化目标。由于机器人的运动路径直接决定了后续跟随过程中的关节数量与进给位移量，因此需将路径长度作为核心优化目标进行最小化，以提升系统的能量效率并降低作业功耗。粒子群算法将利用适应度函数在候选路径中搜索并确定最短的满足要求的路径曲线。

2.3　适应度函数设计

适应度函数的核心作用在于精确引导种群的演化方向。通过一种预设的映射机制，将解空间中的每条路径映射为一个量化的适应度值。该值用于衡量求解路径的质量，其数值的值越小则对应路径越优。由式（6）可知，该优化问题的核心目标在于最小化路径长度。因此，为了直接引导算法达成该目标，将路径长度设置为适应度函数。通过这种设计，算法在寻优的过程中所找到的具有最低适应度值的路径，即为满足所有约束条件下的最短路径，路径长度函数的表达式为

$$f(P)=\sum_{i=1}^{n-1}\left\| p_{i+1}-p_i \right\| \tag{9}$$

式中，p_i为第i个路径点在世界坐标系中的坐标。

为了在算法寻优过程中，淘汰不满足约束条件的路径，需要设计适应度函数的惩罚项。即对一条候选路径而言，通过式(9)求出路径长度后，再将路径曲线函数代入式(7)和(8)中判断是否满足约束，若不满足，则对该路径的适应度函数施加显著惩罚，将其乘以一个较大的惩罚因子。由于优化目标是找到最小的适应度函数，该惩罚将使得该路径被算法剔除。最终适应度函数表达式为

$$F=\begin{cases} f(P) & \text{flag}=0 \\ 1000*f(P) & \text{flag}=1 \end{cases} \tag{10}$$

式中，F为适应度函数；flag为路径标签，当满足约束条件时其值为0，否则其值为1。

综上所述，通过基于粒子群的多约束路径规划算法，最终能够找到一条满足所提约束条件并且路径长度最短的最优路径曲线。多约束路径规划算法如下

输入：起点、目标点、约束、粒子群参数

输出：路径点的位置

1： While 未满足约束条件或未到达循环次数 do
2： for 每个粒子 do
3： 计算适应度、更新粒子、全局最佳位置
4： End for
5： 更新每个粒子的速度、位置
6： End while
7： Return 路径点

3 路径跟随逆运动学求解

在获得满足约束条件的路径曲线后，还需要进一步确定该路径曲线上机器人关节角度配置，即机器人的逆运动学求解。本文对传统的FABRIK算法进行改进，通过引入进给量补偿机制，避免了传统双向往复迭代过程，同时有效解决了路径拟合过程中因路径长度与连杆总长不匹配而导致的求解失效的问题，提升了绳驱动超冗余连续体机器人在路径跟随任务中的求解精度与计算效率。

3.1 关节节点位置求解

为了使机械臂能够精确拟合所得到的路径，关键是要使机械臂上每个关节节点分布在路径曲线上。为了高效获取关节节点在路径上的分布，使用类似FABRIK算法的前向迭代过程。首先，提取目标点的位置，将机器人末端中心拟合到目标点处，之后沿着路径曲线向后回溯，找到距离目标点一个连杆长度的位置，即为末端关节的节点位置。再从末端关节节点位置出发，依次类推，一直搜索到路径起点，或者根部关节。

传统的FABRIK算法在此之后需要重新向后搜索，即将根部关节拟合到路径起点，再使用与前向迭代同样的方式搜索，直到末端中心位于目标点，根部位于基座处。但是该过程迭代时间长，且规划的路径曲线长度可能不等于连杆长度的整数倍，造成求解位置不准确。

为了避免再次向后迭代过程，通过引入进给补偿来直接确定关节位置。该策略的核心在于当前向迭代获取到的关节节点位置与路径起点位置小于一个连杆长度时或者下一个关节节点为根部关节节点时，将该节点设置为锚点节点。由于机器人的世界坐标系Z轴与机械臂中心轴线对齐且基座可沿着Z轴移动，直接将锚点节点的下一个关节节点定位于世界坐标系Z轴上。通过进给驱动基座将缺少的路径距离补偿，从而避免二次迭代。其中，当锚点关节与路径起点的距离等于一个连杆长度时，此时，直接将路径起点作为下一个关节的位置；若锚点关节的下一个节点为根部关节，则结束搜索；若不是根部节点，则将剩余关节节点沿着中心轴线等连杆长度分布即可。该过程如图4所示。关节确定为锚点关节的条件为

$$\begin{cases} \left\| r_{\text{start}}-r_i \right\| < L \\ i=2 \end{cases} \quad \text{or} \tag{11}$$

式中，r_{start}为起点的坐标；r_i为第i个关节节点的坐标；L为连杆长度。

通过上述求解搜索后，就可以得到目标点与路径起点之间的所有关节位置。为了实现机械臂的路径跟随拟合，采用一种目标点渐进更新策略，将已处理目标点从路径曲线中去除，选取路径曲线上紧邻原目标点的下一个路径点当做新的目标点，再次搜索求解。此迭代过程重复运行，直

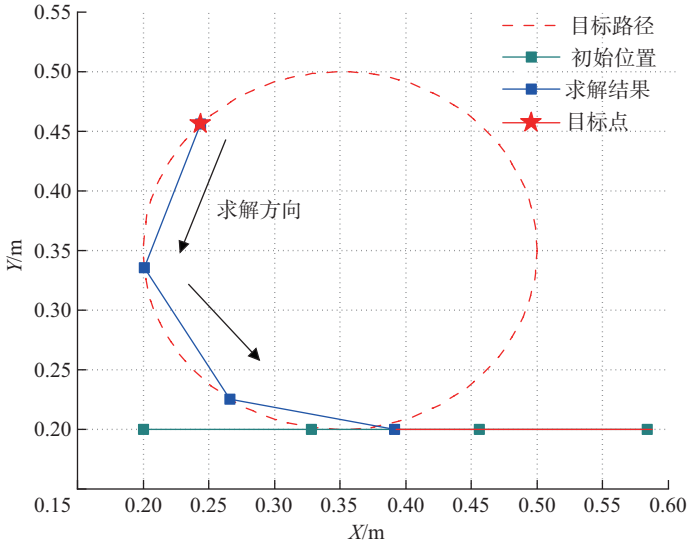


图4 关节节点位置求解过程图

Fig.4 Diagram of joints node position solving process

到所有路径点被遍历，即最终新的目标点与路径起点重合。这样就得到了一个机械臂末端位于路径曲线上每个点时，机械臂关节的位置序列，从而完成了机械臂的路径跟随拟合。路径跟随算法求解的过程如下

输入：路径点、连杆长度

输出：关节角度与进给量

1： While 完成路径点的遍历 do

2： 反向遍历，路径的最后一点为起始点

3： for 每个粒子 do

4： 计算粒子距离、确定关节位置、确定进给量

5： End for

6： 去除第一个路径点的位置

7： End while

8： Return 关节角度、进给量序列

3.2 进给量与关节角度求解

在得到各个关节位置后，求解各个关节段的关节角度和进给量。首先，求解每个关节序列对应的进给量，设根部关节的初始位置为 $Q_0=\{x_0,y_0,z_0\}$，求解后的根部关节位置为 $Q_1=\{x_1,y_1,z_1\}$，则该序列的进给量表达式为

$$\text{feed}=z_1-\sqrt{L^2-\left(x_1^2+y_1^2\right)}-z_0 \quad (12)$$

之后，求解各个关节角度。由式(1)可知，当相邻两个关节位置已知时，相邻两个关节的运动角度解一个单段的逆运动学方程即可。对于进给量的求解，由于锚点关节的选择，单个序列的进给量不超过一个关节段的长度。总体运动序列的总进给量不超过导轨的有效行程，这样可以保证运动的稳定性。

同时在求解关节角度的过程中，为了满足六自由约束，增加了一个滚转角度的求解，首先计算在当前关节角度下姿态到目标姿态的差异矩阵。

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{d}}=\boldsymbol{R}_{\mathrm{path}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{\mathrm{t}} \quad (13)$$

式中，$\boldsymbol{R}_{\mathrm{d}}$ 为差异矩阵；$\boldsymbol{R}_t$ 为目标滚转位姿；$\boldsymbol{R}_{\mathrm{path}}^{\mathrm{T}}$ 为当前关节角度下的位姿矩阵。得到差异矩阵后，即可求解出滚转角度，具体表达式为

$$\theta_{\mathrm{r}}=\arctan(R_{\mathrm{d21}},R_{\mathrm{d11}}) \quad (14)$$

式中，R_{dij} 为矩阵的第 i 行第 j 列元素。

通过求解出滚转角度结合万向节的运动角度，即可实现对机器人末端六自由度位姿的精确约束与控制，从而显著提升机器人在复杂工作环境中的适应性。

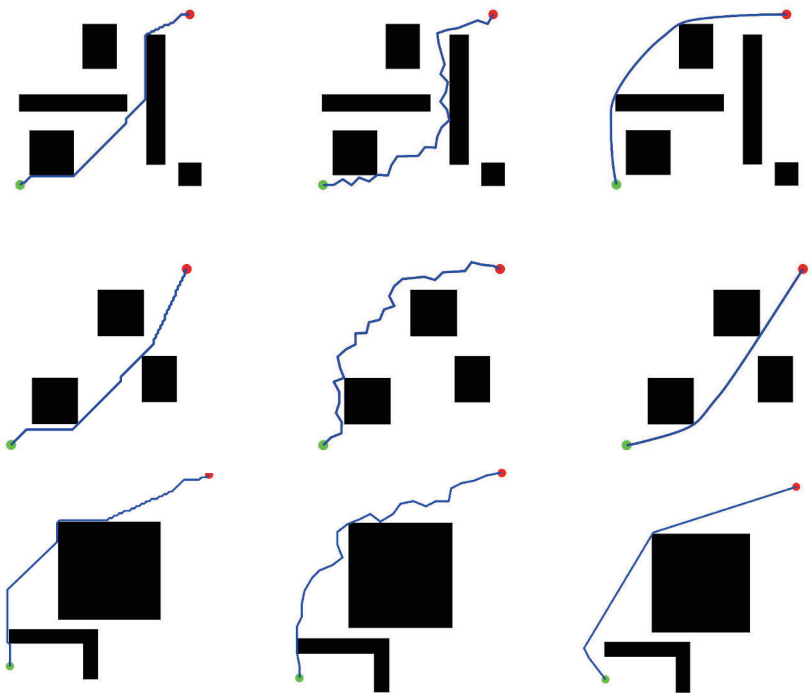
4 仿真与试验

为验证所提出一体化运动规划方法的有效性和可行性，设计了路径规划仿真、逆运动学求解仿真与试验验证方案，以证明算法在实际应用当中的可执行性和有效性。

4.1 路径规划器仿真

首先，将所提出的IMP方法中的全局路径规划算法与经典的RRT和A*算法进行对比分析。通过性能指标来衡量算法的优劣性。为了确保对比试验的公平性，所有算法均在完全相同的仿真环境中配置并运行。试验统一设定了相同的路径起点、目标点及3组不同场景的障碍物配置。经过仿真试验，得到的最终结果如图5所示。

3种路径规划算法的详细性能指标如表2所示。主要包括算法的求解时间、路径长度以及最大曲率值。设定路径曲率阈值为0.8 cm^{-1}，结果显示，A*算法虽满足曲率约束，但是求解时间过长且路径长度并非最优，A*算法求解时间较长的主要原因在于A*作为基于图搜索的确定性算法，在保障高精度避障和曲率平滑的前提下，必须使用极其细密的3D栅格划分，这导致搜索空间的状态节点数呈指数级膨胀。此外，当遇到复杂凹型障碍阻塞时，A*算法需在大量无法通行区域进行图节点的重复回溯扩展，从而产生了极大的计算负载。RRT算法虽然求解速度快，但是在场景1和2下曲率超过限制且路径冗长，无法满足实际机器人运动的要求。而所提的IMP路径规划算法在保证满足曲率要求的前提下路



（a）A*算法　（b）RRT算法　（c）IMP算法

图5 路径规划仿真对比图`

Fig.5 Comparison chart of path planning simulation

表2 路径规划仿真数据对比

Table 2 Path planning simulation data comparison

算法	场景	求解时间/s	路径长度/cm	路径曲率/cm^{-1}
A*	1	1.80	131.88	0.7854
	2	3.060	125.44	0.7854
	3	1.9946	137.98	0.6325
RRT	1	0.08	171.76	1.4081
	2	0.09	143.69	1.7652
	3	0.017	153.97	0.3054
IMP	1	0.14	127.71	0.067
	2	0.19	118.6	0.024
	3	0.037	132.56	0.026

径长度最短。综上所述，所提出的算法在绳驱超冗余连续体机器人的路径规划任务中是有效且可行的。

4.2 逆运动学求解仿真

为了验证所提出IMP方法中的逆运动学求解方法的有效性，在机器人工作空间内随机选取大量样本点进行求解，并与传统的雅可比迭代法、二次优化法及原始的FABRIK法进行对比，以评价算法的整体性能。其中，为了定量评价，引入了一种综合考量计算时间和位置误差的评价指标，表达式为

$$S=\omega_1\left(1+T_{avg}/T_{req}\right)^{-1}+\omega_2\left(1+E_{pos}/T_{pos}\right)^{-1} \quad (15)$$

式中，T_{avg}为平均求解时间；T_{req}为容许求解时间；E_{pos}为逆运动学求解代入正运动学后的残差；T_{pos}为容许误差；ω_1为时间权重系数，ω_2为位置权重系数。

在实际计算的过程中，由于是离线的仿真计算，因此，将时间权重系数设为0.36，位置权重系数设为0.64。最终仿真计算的结果如表3所示。可以看出，改进的方法无论求解时间还是位置误差都小于传统方法，说明该方法有效。

随后，通过仿真搭建绳驱超冗余连续体机器人运动场景。本文搭建的绳驱超冗余连续体机器人运动场景为飞机油箱模拟试验台，具体的结构如图6所示。

为了确保实景仿真与后续试验验证协调一致性，并兼顾仿真效率，取飞机油箱模拟试验台的六分之一作为实景仿真的障碍物配置。通过MATLAB平台搭建出障碍物的仿真结构，其几何形状和结构尺寸均与原飞机油箱模拟试验台相同。建立仿真障碍物模型后，以机器人初始位置时的根部关节中心为原点，建立坐标系，坐标系Z轴与机械臂中心轴线重合，X轴和Y轴分别与根部关节的两个旋转轴重合，所有坐标轴的正方向满足右手定则。

在该坐标系下，将机器人末端中心位置设计为路径起点，并在机器人可达空间内选取坐标点作为目标点。随后，使用所提出的IMP算法来求解机械臂的运动路径并给出各个路径点下的机械臂各个关节角度。其中，所提出的全局路径规划中的粒子群算法的相关参数如表4所示。在此，粒子维度的设定是在给定仿真障碍物环境下，综合权衡求解时间与求解质量后的选择。在实际应用中，该参数的设定应根据环境复杂程度与具体任务需求进行合理配置。具体而言，提高粒子维度能有效提升路径对复杂环境的适应能力，但伴随而来的是求解时间的增加。

表3 逆运动学求解结果对比

Table 3 Comparison of inverse kinematics solution results

算法	平均求解时间/s	位置误差/mm	综合指标
雅可比	0.0012	1.017	0.6968
二次优化	0.006	0.784	0.49
FAB	0.0029	0.212	0.82
IMP	0.0008	0.103	0.93

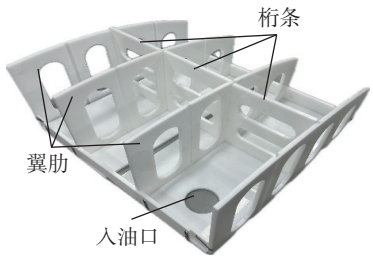


图6 飞机油箱模拟试验台结构图

Fig.6 Structural diagram of aircraft fuel tank simulation test bench

表4 粒子群初始化参数

Table 4 Parameters of particle swarm initialization

参数名称	参数值
种群规模	200
演化代数	200
惯性权重	0.9
学习因子	c_1=2；c_2=2
粒子维度	3
速度限制权重	0.1

最终实际场景仿真的结果如图7所示，机械臂能够抵达预先设定好的目标点且不与飞机油箱模拟试验台中的障碍物发生碰撞。同时，路径曲线在满足关节角度、路径曲率约束的情况下实现了路径长度的最优化，证明所提出的IMP方法在解决复杂实际场景路径规划任务时的有效性与实用价值。

4.3 试验验证

将实景仿真结果部署到图1中的绳驱超冗余连续体机器人上，检验其真实的可执行性。具体流程为：首先，通过IMP计算出机器人的运动路

径并求解出机器人关节角度序列，通过式(5)将计算得到的机器人关节角度序列转换为机器人的驱动绳长序列；之后，通过上位机发送到控制板以驱动电机运动，角度传感器反馈实时位置完成闭环控制；最后，机器人完成动作指令，实现避障运动。机器人的控制系统如图8所示，包括机器人本体、角度传感器、上位机、控制板及电机电调组件。

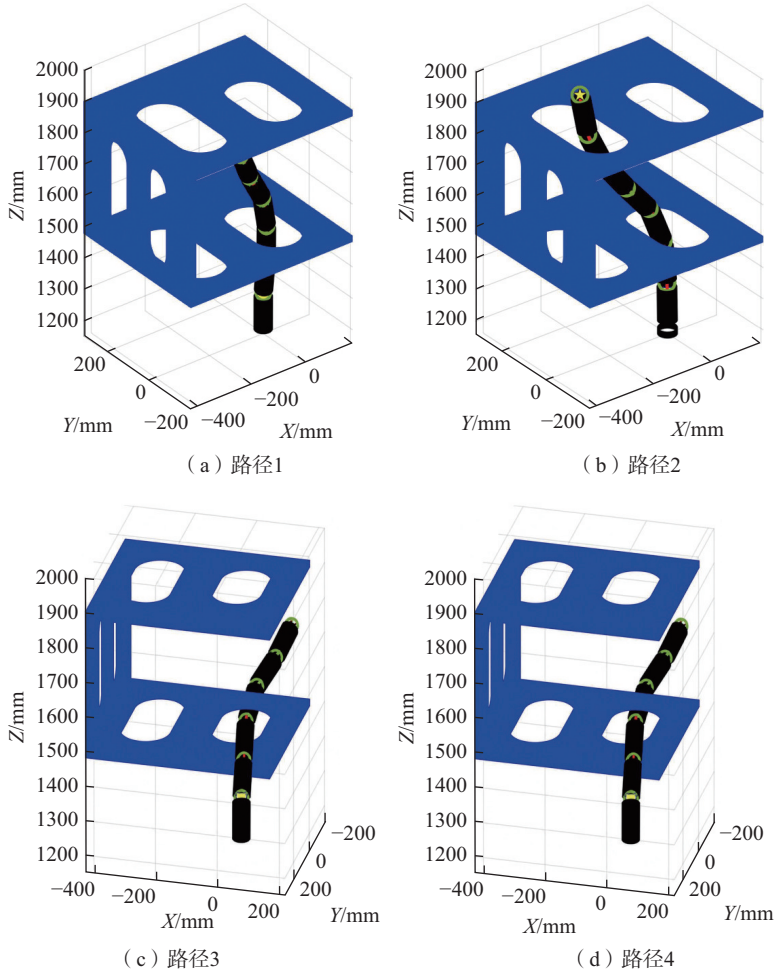


图7 实景障碍物路径规划仿真结果图

Fig.7 Simulation results of real-world obstacle path planning

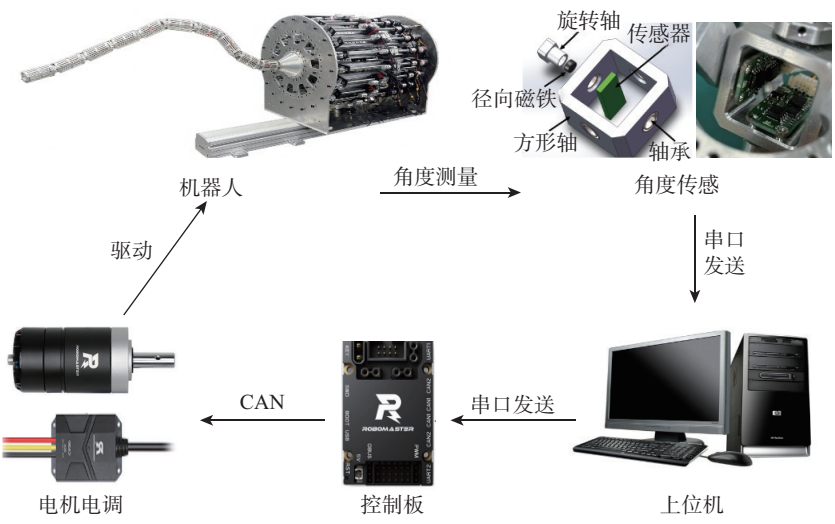


图8 机器人控制系统结构图

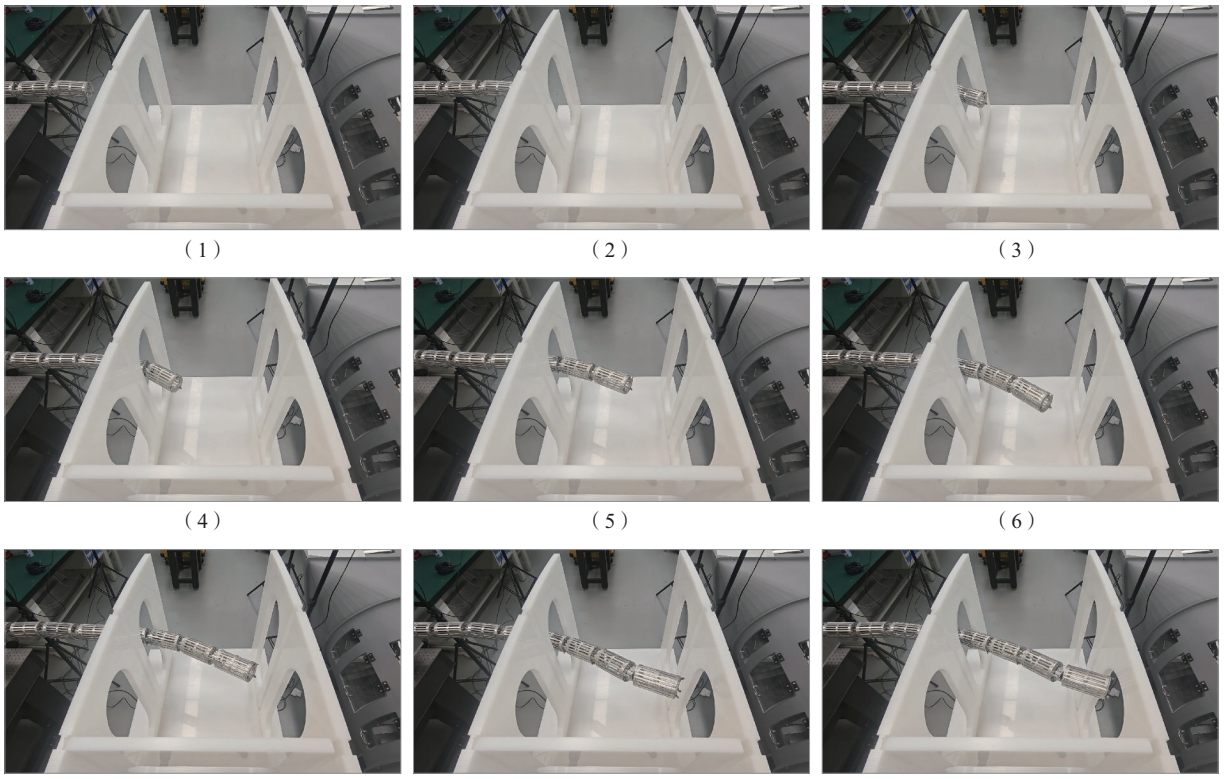
Fig.8 Diagram of robot control system structure

机器人实际障碍物穿越试验过程如图9～11所示。可见，机器人在运动过程中，能够较好的拟合仿真曲线，并且不与障碍物发生碰撞。证明所提出的方法在机器人实际的路径规划问题中是可行的。最终的角度传感器结果显示，机器人最大关节角度误差在1°以内(图12)，满足实际工况下的需求。

5 结论

本文针对绳驱超冗余连续体机器人在复杂环境下的运动规划问题，提出了一种结合路径规划与逆运动学求解的一体化运动规划方法，并通过21自由度绳驱超冗余连续体机器人进行验证。首先，基于粒子算法设计了多约束全局路径规划器，通过引入惩罚项优化适应度函数，实现了在优化路径长度的同时，保证路径满足曲率、关节角度及避障约束条件。其次，受FABRIK算法启发，设计了路径跟随模式下带进给补偿的逆运动学求解方法，通过锚点定位与进给补偿，避免了传统迭代方法的二次搜索过程，显著提升了求解效率与路径拟合精度。同时，设计了具有21自由度的绳驱超冗余连续体机器人并建立其运动学模型，用于验证所提出方法的有效性和可行性。

路径规划仿真结果表明，与传统的RRT及A*算法相比，本文所提算法能更有效地应对多种复杂场景下的规划任务，并严格满足预设约束条件。在逆运动学求解方面，对比验证显示，所提出的逆运动学方法在计算效率与求解精度上均具优势。最终的试验结果进一步证实，本文提出的IMP方法能够实现机械臂的避障路



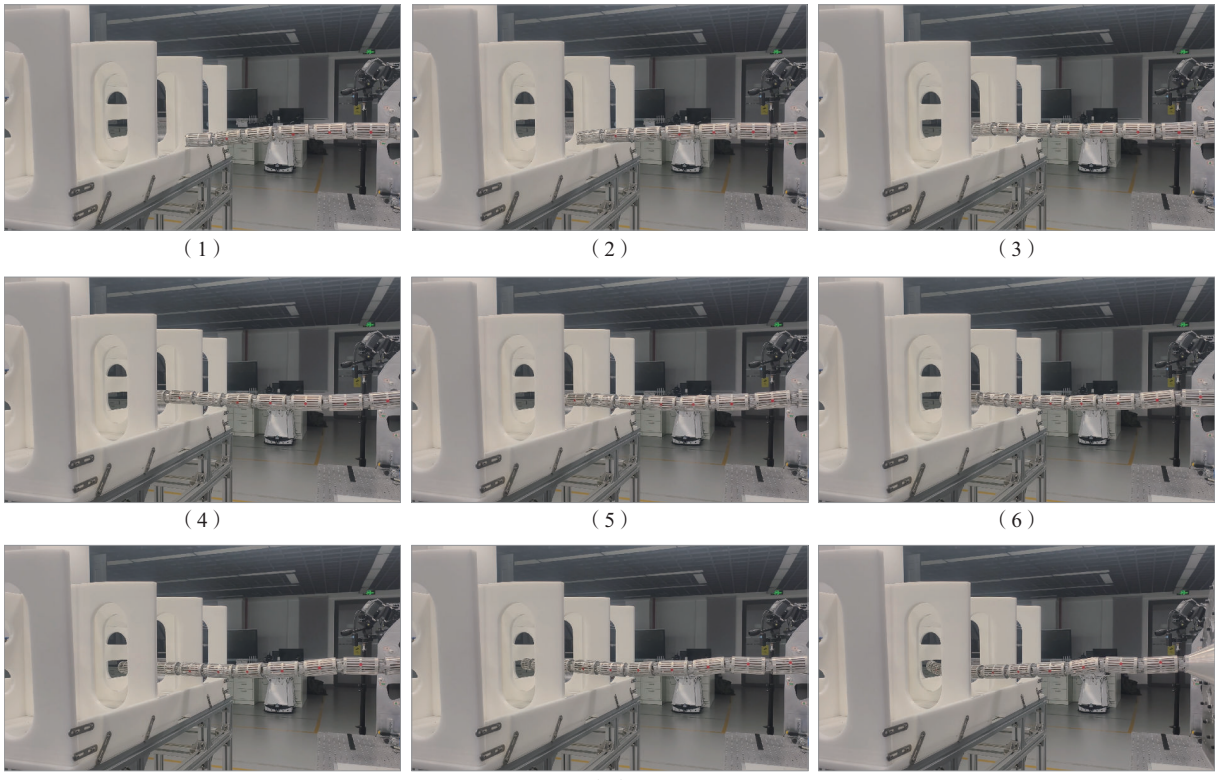
（1） （2） （3）

（4） （5） （6）

（7） （8） （9）

图9 机器人实景障碍穿越结果图(1)

Fig.9 Robot obstacle course traversal results diagram (1)



（1） （2） （3）

（4） （5） （6）

（7） （8） （9）

图10 机器人实景障碍穿越结果图(2)

Fig 10 Robot obstacle course traversal results diagram (2)

径跟随，满足机器人在实际作业环境中的运动需求。

后续的研究将致力于提升算法的实时性，解决局部动态规划、实时避障以及复杂动力学约束下的运动控制问题，并针对不等长连杆的机器人避障约束问题进行研究，进一步提升绳驱超冗余连续体机器人在多变环境下的作业执行性和环境适应能力。

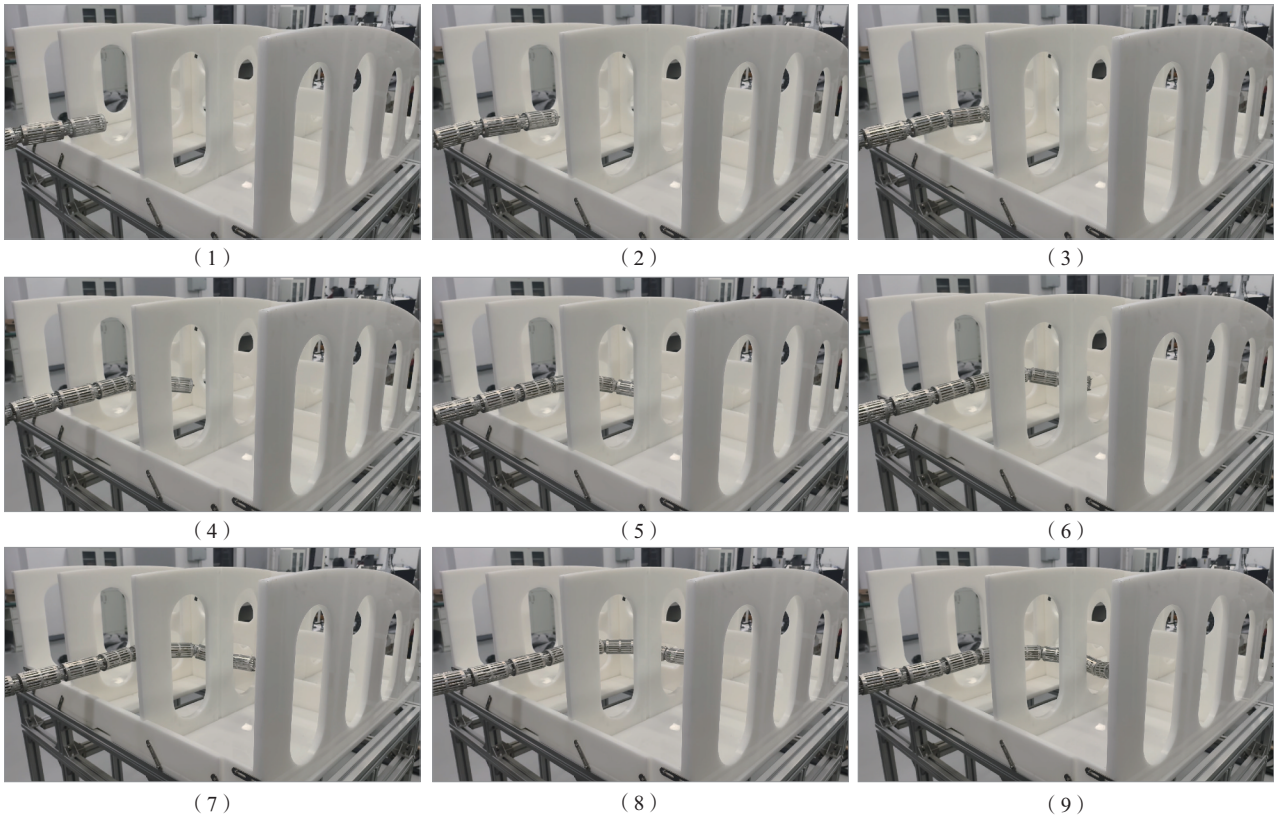


图11　机器人实景障碍穿越结果图（3）

Fig.11　Robot obstacle course traversal results diagram（3）

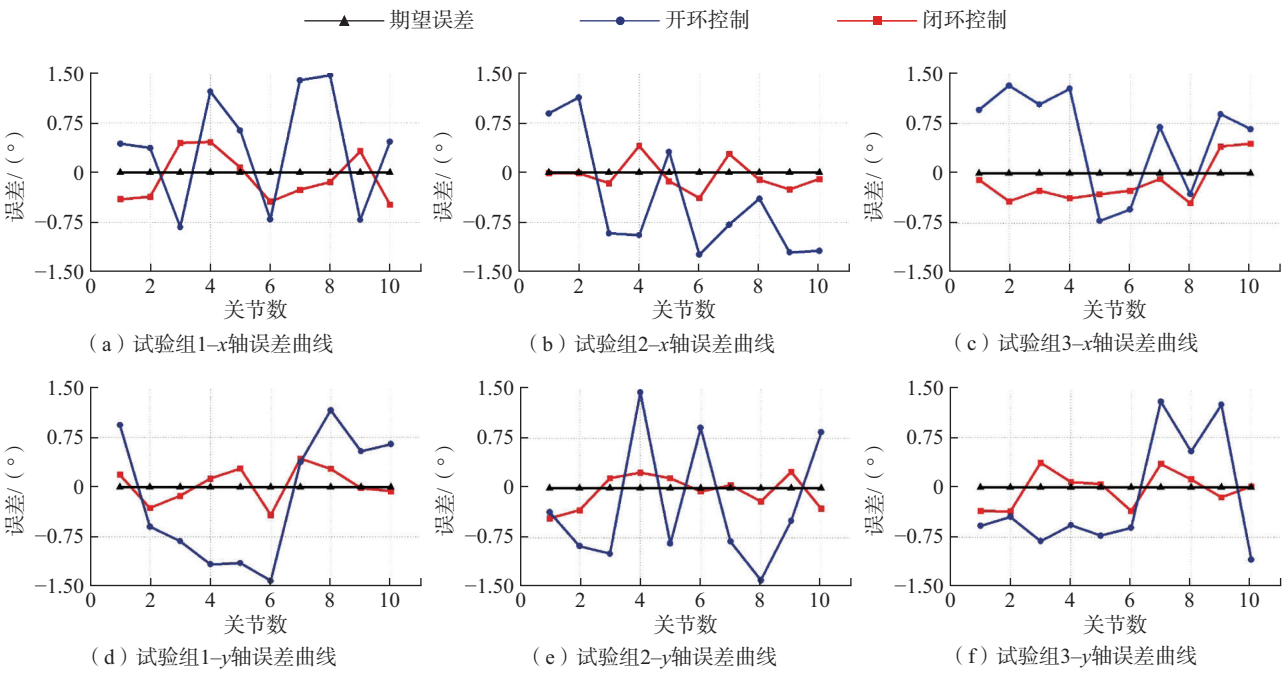


图12　实景穿越试验角度结果

Fig.12　Angular results for robot obstacle course traversal experiments

参 考 文 献

[1] 赵强, 岳永恒 . 仿生连续体机器人的研究现状和展望[J]. 机械设计, 2009, 26(8): 1–6.

Zhao Qiang, Yue Yongheng. Current situation of research and prospects of bionic continuum robot[J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(8): 1–6.

[2] Bogue R. Robots in the nuclear industry: A review of technologies and applications[J]. Industrial Robot, 2011, 38(2): 113–118.

[3] Yang Z S, Yang L H, Sun Y, et al. A novel contact-aided continuum robotic system: Design, modeling, and validation[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2024, 40: 3024–3043.

[4] 高庆吉, 王维娟, 牛国臣, 等 . 飞机油箱检查机器人的仿生结构及运动学研究[J]. 航空学报, 2013, 34(7): 1748–1756.

Gao Qingji, Wang Weijuan, Niu Guochen, et al. Study of bionic structure and kinematics of robot for aircraft fuel tank inspection[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34 (7): 1748–1756.

[5] Burgner-Kahrs J, Rucker D C, Choset H. Continuum robots for medical applications: A survey[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(6): 1261–1280.

[6] Wolf A, Brown H B, Casciola R, et al. A mobile hyper redundant mechanism for search and rescue tasks[C]//Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003). Las Vegas: IEEE, 2003: 2889–2895.

[7] Peng J Q, Xu W F, Liu T L, et al. End-effector pose and arm-shape synchronous planning methods of a hyper-redundant manipulator for spacecraft repairing[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 155: 104062.

[8] Bu N L, Luo N Y, Liu C, et al. A novel path following method based on whole-body deviation evaluation for hyper-redundant robots[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2025, 10(1): 604–611.

[9] Luo M R, Tian Y N, Li E, et al. A local obstacle avoidance and global planning method for the follow-the-leader motion of coiled hyper-redundant manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20 (4): 6591–6602.

[10] Liu T B, Feng Z. A hybrid strategy enhanced stochastic fractal search algorithm for multi-robot path planning in dynamic obstacle environments[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2026, 101: 102316.

[11] Meng B H, Godage I S, Kanj I. RRT*-based path planning for continuum arms[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7 (3): 6830–6837.

[12] Li J F, Hu Y R, Yang S X. A novel knowledge-based genetic algorithm for robot path planning in complex environments[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2025, 29(2): 375–389.

[13] Ji H C, Xie H B, Wang C, et al. E-RRT*: Path planning for hyper-redundant manipulators[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(12): 8128–8135.

[14] Wang T Y, Ma G L, Xu L S, et al. CP-QRRT*: A path planning algorithm for hyper-redundant manipulators considering joint angle constraints[J]. Sensors, 2025, 25 (5): 1490.

[15] Ouyoucef A, Peyron Q, Zheng G, et al. Durability-aware trajectory planning and quasi-static control of a continuum parallel robot for industrial applications[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2025, 10(11): 12016–12023.

[16] Ding M, Zheng X J, Liu L X, et al. Collision-free path planning for cable-driven continuum robot based on improved artificial potential field[J]. Robotica, 2024, 42(5): 1350–1367.

[17] Hu Z H, Yuan H, Xu W F, et al. A geometric method based on space arc for pose-configuration simultaneous planning of segmented hyper-redundant manipulators[J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64 (11): 2389–2407.

[18] Tang L, Zhu L M, Zhu X Y, et al. Confined spaces path following for cable-driven snake robots with prediction lookup and interpolation algorithms[J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(2): 255–264.

[19] Wang Y F, Chen Y. Topology-informed quasi-static motion planning for continuum robots with contacts[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2025, 10(11): 11888–11895.

[20] Jia L F, Huang Y P, Chen T, et al. MDA+RRT: A general approach for resolving the problem of angle constraint for hyper-redundant manipulator[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 193: 116379.

[21] Xu W F, Liu T L, Li Y M. Kinematics, dynamics, and control of a cable-driven hyper-redundant manipulator[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(4): 1693–1704.

[22] Morasso C, Meli D, Divet Y, et al. Planning and inverse kinematics of hyper-redundant manipulators with VO – FABRIK[C]//European Robotics Forum 2024. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 195–199.

[23] Grassmann R, Modes V, Burgner – Kahrs J. Learning the forward and inverse kinematics of a 6 – DOF concentric tube continuum robot in SE(3) [C]//2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid: IEEE, 2018: 5125–5132.

[24] Xu X T, Xie H B, Wang C. A kinematics method of hyper-redundant manipulators based on morphologic space constraints[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2025, 55(1): 238–250.

[25] Xu X T, Xie H B, Wang C, et al. Kinematic and dynamic models of hyper-redundant manipulator based on link eigenvectors[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2024, 29(2): 1306–1318.

[26] Aristidou A, Lasenby J. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem[J]. Graphical Models, 2011, 73(5): 243–260.

[27] Wang Z, Hu D A, Wan D T, et al. An improved inverse kinematics solution method for the hyper-redundant manipulator with end-link pose constraint[J]. Journal of Field Robotics, 2024, 41(6): 1900–1921.

[28] Liu T L, Yang T W, Xu W F, et al. Efficient inverse kinematics and planning of a hybrid active and passive cable-driven segmented manipulator[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(7): 4233–4246.

Integrated Motion Planning Method for Cable-Driven Hyper-Redundant Continuum Robots Under Multiple Coupled Constraints

YANG Laihao[1], XUE Chenfei[1], WEN Qing[2], LI Chenming[1], YANG Yu[3],
WANG Zhigang[3], LIU Yang[4], SUN Yu[1], CHEN Xuefeng[1]

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006, China;
3. Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China;
4. Dalian Changfeng Industrial Corporation, Dalian 116200, China)

[ABSTRACT] To address the critical requirements of high precision, obstacle avoidance, and coupled configuration constraints in robot motion planning for the internal inspection of complex and confined aircraft fuel tanks, a motion planning method for a cable-driven hyper-redundant continuum robot under multiple coupled constraints was proposed. First, a global path planner in the task space was constructed. Path length, curvature, joint angle, and obstacle avoidance constraints were integrated into a unified optimization process to coordinate path reachability, smoothness, and safety. Second, a fast inverse kinematics solution method with a feed compensation mechanism was developed to improve the accuracy and computational efficiency of path-following motion. This approach establishes a seamless integrated motion planning framework that maps continuous paths from the task space to driving parameters in the joint space. Simulation results show that the proposed method is applicable to path planning tasks in various complex environments, and the inverse kinematics solution time is 0.0008 s. A 21-DOFs cable-driven hyper-redundant continuum robot prototype was developed. Path planning and obstacle avoidance experiments were conducted for an aircraft fuel tank inspection task. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves accurate trajectory fitting and stable path following in complex confined spaces. The effectiveness and feasibility of this approach are fully validated in aircraft fuel tank inspection tasks within complex, confined environments.

Keywords: Hyper-redundant robot; Continuum robot; Path planning; Inverse kinematics; Optimization algorithm; Aircraft fuel tank; Confined space

（责编　晓月）