DOI: 10.3901/JME.2018.03.018

超冗余度机械臂跟随末端轨迹运动算法 及其性能分析*

王俊刚¹ 汤 磊¹ 谷国迎^{1,2} 朱向阳^{1,2}

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240;

2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240)

摘要: 超冗余度机械臂具有大长径比、多自由度、高灵活性等特点。为提升其穿越受限空间的效率,提出一种适用于该机械臂三维空间深腔探测的跟随末端轨迹运动算法。在底座进给运动配合下,机械臂的连杆和关节沿规划路径移动,并使得机械臂与路径曲线偏差尽可能小。为提高算法效率,提出一种迭代步长顺序查找法来实现机械臂的关键点与离散路径曲线快速匹配;为减小路径跟随误差,提出一种线性插值优化方法减小因路径离散处理引起的误差。通过 12 个关节的超冗余度机械臂的仿真试验,从位置精度、运动平顺性、算法效率三方面对算法性能进行评价。结果表明,在保证路径跟随误差不超过 5 μm 的情况下,机械臂的运动平顺,单周期计算耗时为 1 ms 左右。算法适用于空间三维运动,且算法效率满足实时控制要求。

关键词: 超冗余度机械臂; 跟随末端轨迹; 运动规划

中图分类号: TP242

Tip-following Path Planning and Its Performance Analysis for Hyper-redundant Manipulators

WANG Jungang¹ TANG Lei¹ GU Guoying^{1,2} ZHU Xiangyang^{1,2}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;

2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: The hyper-redundant manipulators have the features of large length/diameter ratio, high degree of freedoms and good dexterity. To improve the efficiency of their motion in confined space, a tip-following path planning algorithm is proposed. With the feed motion of the base, the manipulators' links and joints can track a desired path curve, sweeping through a tiny area in a 3D confined space. To enhance the efficiency of the algorithm, an iteratively sequential searching method is proposed for the fast matching between the manipulators' key-points and the path curve. A linear interpolation optimization method is then developed to reduce the path following errors caused by discretization of the path curve. The performance of the algorithm is evaluated in terms of the position accuracy, movement smoothness and calculation efficiency based on the simulation of a hyper-redundant manipulator with 12 joints. The results show that the manipulator accurately follows the desired path with deviations of less than 5 μm , and the average computation time is about 1 ms. The algorithm is suitable for spatial motions and is effective to satisfy the requirements of the real-time control.

Key words: hyper-redundant manipulator; tip-following path planning; motion planning

0 前言

随着超冗余度机械臂在航天航空制造、核电设备检修和地震灾后救援等领域的应用不断深入^[1-3],机械臂的设计及运动规划逐渐受到学者们的关注。刚性结构的超冗余度机械臂^[4-5]相比于柔性材料构

成的连续体机械臂^[6],往往具有更高的运动精度和更好的负载能力^[7],更加适用于危险狭窄的深腔作业。实现避障运动是超冗余度机械臂的运动规划的主要目标之一,目前学者们提出了多种有效避障规划方法,如人工势场法^[8-9]、神经网络算法^[10]、遗传算法^[11]以及模糊控制算法^[12]等。上述避障算法保证机械臂末端完成指定工作任务,同时连杆和关节避开障碍,强调末端作业能力,而未将连杆和关节的运动严格约束。为进一步提升超冗余度机械臂穿越

* 国家自然科学基金资助项目(51435010, 51622506)。20170620 收到初稿, 20171031 收到修改稿

障碍的能力, 学者们^[13-18]提出了一种称为跟随末端轨迹的路径跟随运动方法。跟随末端轨迹运动特点是, 在受限区域内超冗余度机械臂的连杆和关节沿路径曲线移动, 即运动中整个机械臂尽可能逼近路径曲线, 实现在空间中划过尽可能小的区域的目标。跟随末端轨迹运动的方法具有穿越受限空间能力强, 运动学逆解易求等优势, 非常适用于超冗余度机械臂。早期研究工作中, CHIRIKJIAN 等^[14]和 CONKUR^[15]分别应用微分几何与平面解析几何实现超冗余度机械臂和路径曲线匹配, 进而达到避障运动的目的, 该类方法主要适用于平面运动^[16]。ANDERSSON^[17]从理论上提出了一种数值求解非线性方程的方法将机械臂关节中心与连续三维曲线匹配, 但未将该运动实现。为提升规划算法效率, PALMER 等^[18]针对连续体操作臂, 通过序列二次规划算法实现机械臂的关键点与离散三维曲线匹配。借鉴将路径曲线离散思路, 针对超冗余度机械臂的特点, 本文提出一种迭代步长顺序查找法匹配机械臂的关键点与空间离散路径曲线, 同时通过选取合理的离散点间距和采用一种线性插值优化方法以保证运动精度。为验证本文提出算法的可行性和高效性, 通过 Matlab 仿真对算法性能进行分析。结果显示在保证较高运动精度下, 运动平顺, 运算效率高, 适用于在线实时控制。

本文后续章节组织结构如下。第 1 节给出跟随末端轨迹运动的问题描述; 第 2 节建立超冗余度机械臂的运动学模型; 第 3 节具体介绍提出的算法及实施过程; 第 4 节对算法性能进行评价; 最后, 第 5 节对本文进行总结。

1 跟随末端轨迹运动问题描述

本文以如图 1 所示的超冗余度机械臂为对象展

图 1 超冗余度机械臂的典型工作情况

开分析讨论。机械臂由刚性连杆和转动关节交替连接组成, 共 12 个关节, 每个关节具有两个正交的转动自由度, 机械臂共有 24 个自由度。进给底座提供一个进给自由度, 可极大提高机械臂工作空间。图 1 展示超冗余度机械臂一种典型的工作情况——机械臂绕过障碍, 穿过受限空间后抵达作业区域。在避障运动中期望机械臂与路径曲线尽量重合。

2 运动学模型

图 1 所示的超冗余度机械臂的简化模型如图 2 所示, 共有 12 个关节, 13 根连杆, 14 个机械臂的关键点(关节中心 $k_2 \sim k_{13}$ 、基端点 k_1 和末端点 k_{14})。每根连杆固结一个坐标系, 坐标系原点与关节中心重合, z 轴与固结的连杆轴线重合且指向下一个转动关节中心。当所有连杆轴线共线, 且所有关节转角为 0 时, 所有的 x 轴或 y 轴均位于同一个平面。

如图 2 所示, 相邻坐标系之间的变换矩阵可表示为

$${}^{n-1}_n T = \text{Trans}(0, 0, l_{n-1}) \text{Rot}(y'_{n-1}, \theta_{n-1}) \text{Rot}(x''_{n-1}, \alpha_{n-1}) = \begin{bmatrix} c\alpha_{n-1} & s\alpha_{n-1}s\theta_{n-1} & s\alpha_{n-1}c\theta_{n-1} & 0 \\ 0 & c\theta_{n-1} & -s\theta_{n-1} & 0 \\ -s\alpha_{n-1} & c\alpha_{n-1}s\theta_{n-1} & c\alpha_{n-1}c\theta_{n-1} & l_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, l_{n-1} 为常量, θ_{n-1} 与 α_{n-1} 为变量, s 和 c 是 $\sin(\cdot)$ 和 $\cos(\cdot)$ 的缩写, $\theta, \alpha \in (-90, 90)$ 。第 j 根连杆在空间中的位置和姿态可以通过如下变换矩阵获得

$${}^0_j T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T \cdots {}^{j-2}_{j-1} T {}^{j-1}_j T \quad (2)$$

式中, ${}^0_j T$ 表示固结于连杆 1 上的坐标系 1 相对于世界坐标系的变换矩阵, ${}^0_1 T$ 反应底座运动情况。 ${}^0_j T$ 表示固结于连杆 j 上的坐标系相对于世界坐标系的变换矩阵。

图 2 超冗余度机械臂的运动学模型

3 跟随末端轨迹运动算法

3.1 路径生成及其离散化处理

根据工况需求, 路径曲线可离线或在线生成。后者指路径实时生成并向前延伸, 超冗余度臂跟随运动稍微滞后于路径的延伸^[17]。不管是在线还是离线生成路径曲线, 对于本文提出的轨迹跟随算法, 当前时刻至下一采样时刻的路径都是已知的。故本文仅讨论路径曲线离散生成下的轨迹跟随方法。

如图1所示, 路径曲线包括工作段曲线和机械臂段曲线两部分。工作段曲线可通过A*算法^[18]、蚁群算法^[20]等自动路径规划算法生成。在工作段曲线上取标记点 $M_1 \sim M_{nm}$ 。根据机械臂初始姿态, 可获得机械臂的关键点 $k_1 \sim k_{14}$ 。一般情况下, 机械臂的所有关节转角为零度时所处的位置为初始位姿。将 $k_1 \sim k_{14}$ 和 $M_1 \sim M_{nm}$ 都作为曲线控制点, 以生成路径曲线。

本文采用三次样条曲线拟合控制点。其过程是以控制点作为节点边界条件, 利用三次多项式样条插值的方法生成机械臂的期望轨迹曲线。选择三次样条曲线的理由: ① 通过曲线控制点; ② 二阶导连续, 能保证运动平顺^[21]; ③ 易于离散化处理。本文不限定路径曲线的表达形式, 可根据具体需求选择各类样条曲线。路径曲线离散处理具有以下特征。

(1) 离散点为有序点, 起始第一个点为 p_1 , 往前进方向依次增加到 p_{np} 。

(2) 离散点可以是采用等参数、等弦长或者等弧长等方式采样取得^[22]。本文采用等弧长的方式生成路径离散点。

(3) 离散点间距根据杆长、关节数及期望位置精度确定。后续章节将讨论离散点间距与位置精度的关系。

3.2 机械臂关键点与路径曲线匹配

如图1所示, 设在跟随末端轨迹运动中机械臂的关键点 $K_1 \sim K_{14}$ 始终落在路径曲线上。因已将曲线离散处理, 故问题转化为, 在任意时刻处机械臂的关键点与轨迹离散点的距离最小。PALMER等^[17]采用最优化方法处理该问题, 但是算法效率不高, 故本文中采用寻点法, 向着前进的方向依次寻找最接近杆长的离散点。

基端点 k_1 与驱动底座固结在一起, 驱动底座在进给底座控制下作直线运动, 因此基端点 k_1 已知可控。这里设定在任意时刻处, 基端点 k_1 与某个轨迹

离散点重合, 该轨迹离散点称为 p_{k_i} , 其中 k_i 的值为该离散点的序号。以 p_{k_i} 为基础寻找 $k_2 \sim k_{14}$ 对应的轨迹离散点。

已知上一个机械臂的关键点的条件下, 寻找下一个关键点是一维搜索问题。即寻找 k_i , 使其满足

$$\begin{aligned} \min \quad & \|P_{k_i} - P_{k_{i-1}}\| - l_{i-1} \\ \text{s.t.} \quad & k_i \in (k_{i-1}, np) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\|\cdot\|$ 为欧几里德范数, l_{i-1} 为杆 $i-1$ 的长度。此类问题常用二分法进行搜索。但是二分法需要设定初始搜索区间, 搜索区间过小会导致最佳点落在区间外, 区间过大会降低搜索效率, 故本文针对末端轨迹跟随运动的特点提出一种迭代步长顺序查找法。

如图3所示, $p_{t_{k_i}}$ 表示在 t 时刻, 距离机械臂的关键点 k_i 最近的轨迹离散点。下一个采样时刻, 机械臂底座作一个微小的进给, 机械臂姿态也作一个微小的调整, 同时关键点也沿着轨迹离散点往前进的方向移动几乎相同距离。可得到如下关系

$${}^{t+1}k_i - {}^{t+1}k_{i-1} \approx {}^t k_i - {}^t k_{i-1} \quad (4)$$

式中, k_i 为离散点序号, 由式(4)可得到 $t+1$ 时刻 ${}^{t+1}k_i$ 的估计值 ${}^{t+1}\bar{k}_i$

$$\begin{aligned} {}^t aL_{i-1} &= {}^t k_i - {}^t k_{i-1} \\ {}^{t+1}\bar{k}_i &= {}^{t+1}k_{i-1} + {}^t aL_{i-1} \end{aligned} \quad (5)$$

图3 相邻时刻连杆在路径离散点上的位置示意图

式(5)中 ${}^{t+1}\bar{k}_i$ 对应的离散点 $P_{t+1_{k_i}}$ 为初始点查找前后满足杆长条件的离散点 $P_{t+1_{k_i}}$ 。其中 ${}^t aL_{i-1}$ 为 t 时刻杆 $i-1$ 两端最近的轨迹离散点序号的差值。 ${}^t aL$ 是一个一维13位的数组, 因为其随着时间 t 改变, 且关联两个相邻时刻, 故称其为迭代步长。图4对搜索部分算法以伪代码的形式展示。

图4所示伪代码展示 t 时刻下搜索机械臂的关键点 $k_2 \sim k_{14}$ 最接近的轨迹离散点。图4第31行, 将 t 时刻 ${}^t aL_{i-1}$ 保存于内存中, 将得到一维13位的数组 ${}^t aL$ 。在 $t+1$ 时刻, 再次调用图4的程序时从

第 4 行开始执行, 在代码第 6 行中 'aL' 将作为搜索下一个机械臂的关键点的迭代步长。图 4 算法求得的 k_i 为离散点的序号, 因为离散点坐标位置已知, 所以机械臂的关键点在空间中的位置即可求得。

```

01 % 机械臂关键点对应离散点下标的初始步长
02 aL=杆长/离散点间距;
03 % 任意时刻 t, 基端对应的轨迹离散点的下序号为 r
04 k(1)=r;% 再次调用的入口, r 随底座运动改变
05 for i=2:14
06   k(i)=k(i-1)+aL(i-1);
07
08   a=p(k(i)-1) 与 p(k(i-1)) 间距-杆长;
09   b=p(k(i)) 与 p(k(i-1)) 间距-杆长;
10   c=p(k(i)+1) 与 p(k(i-1)) 间距-杆长;
11
12   ifFound=0;
13   while not(ifFound)
14     % 判断是否满足杆长条件
15     Minabc=min(a, b, c);
16     switch Minabc
17     case a
18       k(i)=k(i)-1;% 后移一步
19       c=b; b=a;
20       a=p(k(i)-1) 与 p(k(i-1)) 间距-杆长;
21     case b
22       % 关键点 K(i) 对应的离散点下标为 j
23       j=k(i);
24       % if a<=c%ki 落于 pj 与 pj-1 之间
25       Ck(i)=p(j)-(b/(a+b))*(p(j)-p(j-1));
26       % else%ki 落于 pj 与 pj+1 之间
27       Ck(i)=p(j)+(b/(c+b))*(p(j+1)-p(j));
28     end
29     Ck(i)=modify(Ck(i)); %由 D 点缩放得到 B 点
30     % 保存杆 (i-1) 两端对应离散点序号的差值
31     aL(i-1)=k(i)-k(i-1);
32     ifFound=1;%退出 while 循环
33   case c
34     k(i)=k(i)+1;% 前移一步
35     a=b; b=c;
36     c=p(k(i)+1) 与 p(k(i-1)) 间距-杆长;
37   end
38 end
39 end

```

图 4 机械臂的关键点位置搜索伪代码示意图

上述算法寻找最接近杆长的离散点, 而搜索获得的离散点之间的间距并不严格等于杆长, 为减小这种误差, 本文提出了一种插值优化方法。

如图 5 所示, 空间中 k_{i-1} 、 p_j 、 p_{j+1} 三点确定一个平面。 k_{i-1} 为机械臂的关键点, 其在空间中的位置已知。 p_j 和 p_{j+1} 为曲线离散点, 它们与 k_{i-1} 的距离分别为 d_j 和 d_{j+1} 。经过上述算法搜索, P_j 点为最接近于杆长的一个离散点。然而如果按照严格的杆长条件, 连杆的另一个端点应该是 A 点。但在离散

化处理中已经丢弃了 $p_j p_{j+1}$ 点之间的曲线信息, 故补救措施为寻找杆端点落在 $p_j p_{j+1}$ 两点直线上的位置, 即 C 点。C 点可以用矢量法或三角函数等方式解方程求得, 但一般有两个解, 需要剔除掉一个解。解方程以及处理多解问题会降低算法效率。本文中采用以下表达式直接求得杆端点坐标计算公式

$$c_{k_i} = p_j + \left(\frac{l_{i-1} - d_j}{d_{j+1} - d_j} \right) * (p_j p_{j+1}) \quad (6)$$

式中, d_j 与 d_{j+1} 为图 4 算法中的 b 和 c , l_{i-1} 为第 $i-1$ 根杆的长度。故式(6)中变量都为已知量。其中

$$\frac{(l_{i-1} - d_j)}{(d_{j+1} - d_j)} = \frac{EF}{Ep_{j+1}} = \frac{p_j D}{p_j p_{j+1}} \quad (7)$$

图 5 线性插值算法几何示意图

图 5 中线段 DF 和 $p_j E$ 平行, 三角形 $p_j E p_{j+1}$ 与 $DF p_{j+1}$ 相似, 故可得式(7)。式(6)求得的 c_{k_i} 为图 5 中 D 点位置。求出 D 点, 确定了第 $i-1$ 根杆的方向为 $k_{i-1} D$, 但由于杆的长度不会被压缩, 所以沿 $k_{i-1} D$ 方向做缩放以获得满足严格的杆长条件的 B 点。如图 5 所示, B 点相比 p_j 点与标准点 A 点更为接近, 这将极大减小位置误差。杆端点落在 $p_{j-1} p_j$ 时情况类似。插值处理伪代码为图 4 中第 22~29 行注释掉的部分。这里直接求得 k_i 坐标 c_{k_i} 。

3.3 由机械臂姿态反求关节转角

本节讨论如何根据第 3.2 节求得的机械臂的关键点坐标求解相邻坐标系之间的转动角度。由图 2 知相邻机械臂的关键点之间连线和坐标系的 z 轴重合, 故坐标系 z 轴向量可以由相邻关键点相减得到的向量并进行单位化后获得。此处单独分析 z 轴向量之间相对变换情况。

$$z_n^{(n-1)} = \text{Rot}(y'_{n-1}, \theta_{n-1}) \text{Rot}(x''_{n-1}, \alpha_{n-1}) z_{n-1}^{(n-1)}$$

$$z_n^{(n-1)} = \begin{pmatrix} c\alpha_{n-1} & s\alpha_{n-1} s\theta_{n-1} & s\alpha_{n-1} c\theta_{n-1} \\ 0 & c\theta_{n-1} & -s\theta_{n-1} \\ -s\alpha_{n-1} & c\alpha_{n-1} s\theta_{n-1} & c\alpha_{n-1} c\theta_{n-1} \end{pmatrix} z_{n-1}^{(n-1)} \quad (8)$$

式中, $z_{n-1}^{(n-1)}$ 和 $z_n^{(n-1)}$ 为坐标轴 z_{n-1} 和 z_n 相对于坐标系 $O_{n-1}x_{n-1}y_{n-1}z_{n-1}$ 的表示, $z_{n-1}^{(n-1)} = [0 \ 0 \ 1]'$, $z_n^{(n-1)}$ 可通过将 z_n 投影到坐标系 $O_{n-1}x_{n-1}y_{n-1}z_{n-1}$ 中获得, 设 $z_n^{(n-1)} = [a \ b \ c]'$, 将其代入式(8)可以解得

$$\begin{cases} \theta_{n-1} = \arcsin(-b) \\ \alpha_{n-1} = \arcsin\left(\frac{a}{\cos(\theta_{n-1})}\right) \end{cases} \quad (9)$$

当 $\alpha, \theta \in (-90, 90)$, 式(9)有且只有唯一解。

超冗余度机械臂的第一个坐标系 $Ox_1y_1z_1$ 和 z_2 , 它们都是相对于世界坐标系表示的, 所以先将 z_2 投影到 $Ox_1y_1z_1$ 中, 获得其在 $Ox_1y_1z_1$ 的表示, 再由式(9)解得 θ_1 和 α_1 。由正运动学可解得 $Ox_2y_2z_2$, 再由 z_3 解得 $Ox_3y_3z_3$, 以此类推即可解得所有坐标系及相邻坐标系之间的转角。

3.4 运动实现

由第 3.2、3.3 节计算获得某时刻下, 各个关节的角度值。根据任务需求, 规划进给底座(基端点)的运动, 按时间顺序采样不同时刻各个关节的角度值, 获得角度值序列。最后将这些角度值序列应用于仿真模型, 配合底座进给实现末端轨迹跟随运动。

4 仿真结果及性能评价

图 6 和图 7 分别展示超冗余度机械臂在平面和

图 6 平面末端轨迹跟随展示

图 7 空间末端轨迹跟随展示

空间中作末端轨迹跟随运动的情形。机械臂连杆长度 90 mm, 直径 45 mm, 共 12 个关节, 底座的进给总距离为 1 050 mm(参数取自实验室样机)。

机械臂要通过的控制点可以按需求选取, 通常控制点会选择在一些空间曲线上。如图 7 所示工作段路径曲线的控制点基于圆锥螺旋线采样获得, 并通过三次样条曲线拟合获得, 圆锥螺旋线表达式如下

$$\begin{cases} \text{Curve_}x = \frac{t}{4} \cdot \cos(7.2t) \\ \text{Curve_}y = \frac{t}{4} \cdot \sin(7.2t) \\ \text{Curve_}z = 15t \end{cases} \quad (10)$$

式中, Curve_x, Curve_y, Curve_z 分别代表曲线上点的 xyz 坐标, t 为曲线参数。该曲线具有一般性故本文以下讨论的数据都是基于图 7 运动在 Matlab 中仿真获得。本文从位置精度、运动平顺性、算法效率三方面对算法性能进行评价讨论。

4.1 位置精度

因为算法中将路径曲线离散处理, 规划所得姿态与期望曲线之间存在偏差。将第 3.2 节中求得的关节转角代入运动学模型, 通过正向运动学可解得仿真模型关键点位置, 并分别求得仿真模型关键点与期望曲线偏离距离^[23]。本文将该偏离距离中的极大值和极小值为算法位置精度的衡量指标。

图 8 中 a 组、b 组、c 组分别表示路径相邻离散点间距为 1 mm、3 mm、5 mm 下, 历经整个运动过程, 等时间间隔采样得到仿真模型关键点与期望曲线偏差的极值。由图 8 可知, 随着进给运动深入, 各个关节转角逐渐变大, 机械臂的关键点与曲线的偏差也逐渐变大。这个规律在其他路径曲线下也存在, 所以为简化问题, 本文认为进给终止时刻位置误差达到最大值。

图 8 等时间间隔采样下机械臂的关键点偏差变化曲线

图 9 上图表示, 在未插值优化的情形下, 曲线离散点的间距取值范围在 1~10 mm 之间时, 运动

终止时刻仿真模型关键点与期望曲线偏差的极值。图 9 下图表示插值优化时的偏差情况, 对比上下图可知, 位置精度在插值优化后比未插值处理提高了 2~3 个数量级, 且曲线离散点间距越小, 算法位置精度越高, 当间距小于 4 mm 时, 机械臂的关键点与期望曲线的最大间距小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。离散间距取 3 mm, 对应图 8 中 b 组, 整个运动过程中, 最大偏差值不超过 $5\text{ }\mu\text{m}$, 本文认为满足精度要求, 故以下讨论默认离散点间距取为 3 mm。

图 9 不同离散点间隔下机械臂的关键点偏差变化曲线

4.2 运动平顺性

本文中, 将曲线进行离散处理, 且只做了位置规划, 未对速度约束, 这可能会导致运动出现抖动。为简化问题, 进给底座匀速直线运动, 通过分析末端及关节的运动情况以分析运动的平顺性。

图 10 为超冗余度机械臂末端相对于世界坐标系的速度、加速度曲线。图 11 是关节 12 在 x 轴和 y 轴方向上的角速度和角加速度变化情况。在此说明, 因为关节 12 经历路径上的所有变化, 所以其运动曲线包含前 11 个关节的运动信息。如图 10 和图 11 所示, 速度和角速度曲线连续平滑, 加速度和角加速度曲线也连续平滑无突变, 故本文提出的算法可以保证较好的运动平顺性。

图 10 机械臂末端速度及加速度曲线

图 11 机械臂关节 12 角速度及角加速度曲线

4.3 算法效率

本文针对末端轨迹跟随运动的特点, 提出了一种迭代步长顺序查找法, 此搜索法通过将上一时刻机械臂的关键点对应轨迹离散点序号的差值作为下一时刻搜索的迭代步长, 以减少迭代次数。表 1 对某时刻下, 已知底座位置搜索余下 13 个机械臂的关键点的总迭代次数进行统计。由图可知绝大部分时刻下, 总迭代次数为零, 即上一个关键点加上迭代步长便可获得下一个关键点位置, 无需前后搜索。

表 1 顺序查找法迭代次数和耗时统计

离散间距 /mm	搜索迭代次数统计						耗时统计	
	0 次	1 次	2 次	3 次	4 次	总次数	总耗时 /s	平均耗时 /ms
1	1035	3	12	—	—	1050	1.020	0.971
3	345	1	3	—	1	350	0.345	0.986
5	205	1	4	—	—	210	0.214	1.020
10	102	1	2	—	—	105	0.113	1.080

搜索寻点和关节角度反解为算法的核心部分, 为验证算法效率, 对此部分耗时进行测量。通过仿真测量, 某时刻下已知底座位置寻找余下的 13 个机械臂的关键点并反解出 24 个转角的单次耗时。表 1 中的平均耗时即为单次耗时, 在 1 ms 左右。对于 24 个自由度的机械臂, PALMER 等^[17]采用序列二次规划算法匹配操作臂和路径曲线, 单次平均耗时为 0.4 s; 文献[16]路径曲线采用贝赛尔曲线, 采用二分法求解非线性方程, 单次平均耗时约为 6 ms。由此可见本文中提出的搜索及线性插值算法简洁高效, 算法效率满足一般机器人系统的实时性要求。

5 结论

(1) 本文介绍了一种跟随末端轨迹运动算法的具体实施过程, 包括路径离散处理、求解关键点位置、反求关节转角和实现跟随运动。

(2) 通过提出的迭代步长顺序查找法, 提高了算法效率, 单周期耗时为 1 ms 左右, 这为后续进行实时控制提供了基础。

(3) 通过提出的线性插值优化方法, 有效减小了因路径离散处理引起的跟随误差, 比未插值优化, 位置精度提高了 2~3 个数量级, 在保证算法效率同时, 跟随误差可控制在 5 μm 以内。

综上所述, 本文提出的算法位置精度高、运动平顺性好、算法效率高。通过仿真实验表明该算法能有效地应用于超冗余度机器人的空间轨迹跟踪运动。为进一步验证该算法的有效性, 我们目前正开发如图 1 中所示的 25 自由度超冗余度蛇形机器人, 并将结合该算法进行三维封闭空间的探测工作。后续还将进一步研究该蛇形机器人的运动学建模, 运动规划, 基于传感与反馈的精度控制等工作。

参 考 文 献

- [1] BUCKINGHAM R, CHITRAKARAN V, CONKIE R, et al. Snake-arm robots: A new approach to aircraft assembly[R]. SAE, 2007.
- [2] BOGUE R. Robots in the nuclear industry: A review of technologies and applications[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2011, 38(2): 113-118.
- [3] WOLF A, CHOSET H H, BROWN B H, et al. Design and control of a mobile hyper-redundant urban search and rescue robot[J]. Advanced Robotics, 2005, 19(3): 221-248.
- [4] HANNAN M W, WALKER I D. Analysis and initial experiments for a novel elephant's trunk robot[C]// Proceedings 2000 IEEE/RSJ International Conference on, 2000: 330-337.
- [5] TANG L, WANG J, ZHENG Y, et al. Design of a cable-driven hyper-redundant robot with experimental validation[J]. The International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, 14(5): 1-12.
- [6] SIMAAN N, XU K, WEI W, et al. Design and integration of a telerobotic system for minimally invasive surgery of the throat[J]. The International Journal of Robotics Research, 2009, 28(9): 1134-1153.
- [7] 曹玉君, 尚建忠, 梁科山, 等. 软体机器人研究现状综述[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 25-33.
CAO Yujun, SHANG Jianzhong, LIANG Keshan, et al. Review of soft-bodied robots picking[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 48(3): 25-33.
- [8] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98.
- [9] 张建英, 赵志萍, 刘瞰. 基于人工势场法的机器人路径规划[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8): 1306-1309.
- ZHANG Jianying, ZHAO Zhiping, LIU Dun. A path planning method for mobile robot based on artificial potential field[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(8): 1306-1309.
- [10] XIA Y, WANG J. A dual neural network for kinematic control of redundant robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2001, 31(1): 147-154.
- [11] LIU Y, WANG K, YANG J. Optimal path modeling for redundant robot based on genetic algorithm[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(11): 25-28.
- [12] YUNG N H C, YE C. An intelligent mobile vehicle navigator based on fuzzy logic and reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 1999, 29(2): 314-321.
- [13] CHOSET H, HENNING W. A follow-the-leader approach to serpentine robot motion planning[J]. Journal of Aerospace Engineering, 1999, 12(2): 65-73.
- [14] CHIRIKJIAN G S, BURDICK J W. An obstacle avoidance algorithm for hyper-redundant manipulators[C]// Proceedings of Robotics and Automation, 1990: 625-631.
- [15] CONKUR E S. Path following algorithm for highly redundant manipulators[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2003, 45(1): 1-22.
- [16] 夏嫣红, 李立. 平面超冗余机构基于脊线初始位形的避障研究[J]. 机械设计与研究, 2007, 23(2): 43-46.
XIA Yanhong, LI Li. Obstacle avoidance based on initial configuration of backbone curve for hyper-redundant robotic mechanism[J]. Machine Design & Research, 2007, 23(2): 43-46.
- [17] ANDERSSON S B. Discretization of a continuous curve[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(2): 456-461.
- [18] PALMER D, COBOS-GUZMAN S, AXINTE D. Real-time method for tip following navigation of continuum snake arm robots[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2014, 62(10): 1478-1485.
- [19] 贾庆轩, 陈钢, 孙汉旭, 等. 基于 A*算法的空间机械臂避障路径规划[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 109-115.
JIA Qingxuan, CHEN Gang, SUN Hanxu, et al. Path planning for space manipulator to avoid obstacle based on A* algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 109-115.
- [20] 柳长安, 鄢小虎, 刘春阳, 等. 基于改进蚁群算法的移动机器人动态路径规划方法[J]. 电子学报, 2011, 39(5): 1099-1104.

- 1220-1224.
LIU Changan, YAN Xiaohu, LIU Chunyang, et al. Dynamic path planning for mobile robot based on improved ant colony optimization algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(5): 1220-1224.
- [21] 王金敏, 崔奇, 初楠. 运用三次样条曲线拟合机器人运动路径[J]. 机械设计, 2005, 22(7): 44-46.
WANG Jinmin, CUI Qi, CHU Nan. Utilizing cubic spline curve to match the path of robotic movement [J]. Journal of Mechanical Design, 2005, 22(7): 44-46.
- [22] 吴宝海, 王尚锦. 三维参数曲线的离散算法[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(11): 1363-1365.
WU Baohai, WANG Shangjin. An algorithm for the discretization of 3D parametric curves[J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(11): 1363-1365.
- [23] 伍丽峰, 陈岳坪, 湛炎辉, 等. 求点到空间参数曲线最小距离的几种算法[J]. 机械设计与制造, 2011(9): 15-17.
WU Lifeng, CHEN Yueping, CHEN Yanhui, et al. Algorithms on calculating minimum distance between point and spatial parametric curves[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(9): 15-17.
-
- 作者简介:** 王俊刚, 男, 1991 年出生。主要研究方向为超冗余度机器人运动规划及控制。
E-mail: wangxvx@sjtu.edu.cn
汤磊, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为超冗余度机器人设计、建模及运动规划。
E-mail: 20090430414@sjtu.edu.cn
谷国迎(通信作者), 男, 1983 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为软体机器人学、精密运动控制技术。
E-mail: guguoying@sjtu.edu.cn
朱向阳, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人操作规划与控制、生机电一体化系统。
E-mail: mexyzhu@sjtu.edu.cn