

基于改进天牛须算法的电力攀爬机器人运动学逆解算法

都海波^{1†}, 葛展展¹, 张金锋², 谢枫³

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 合肥 230009; 2. 国网安徽省电力有限公司, 合肥 230061;

3. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 合肥 230022)

摘要: 为了提高电力系统的自动化水平,减轻电力工人在检修高压输电系统时的劳动强度,同时保障电力工人人身安全,设计并提出一种可以攀爬电力铁塔的六自由度关节式机器人.并针对该构型进行运动学分析与求解.为解决传统的解析法用于机械臂逆运动学求解过程中存在操作繁琐和奇异点无法逆运算等问题提出一种基于改进天牛须算法的电力攀爬机器人运动学逆解算法.对电力攀爬机器人进行DH建模,得到正运动学方程.使用正运动学方程与目标位姿建立代价函数,采用改进天牛须算法对代价函数优化,并使用MATLAB实现此算法进行仿真验证.对比传统的天牛须算法、改进遗传算法、改进粒子群算法,基于改进天牛须算法的电力攀爬机器人运动学逆解算法具有较好的收敛性,求解精度高.

关键词: 电力攀爬机器人; 运动机构设计; 改进天牛须算法; 运动学逆解; 单点测试; 轨迹规划

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0107

Inverse kinematics solution algorithm of electric climbing robot based on improved beetle antennae search algorithm.

DU Hai-bo^{1†}, GE Zhan-zhan¹, ZHAN Jin-feng², XIE Feng³

(1. College of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd, Hefei 230061, China; 3. China Energy Construction Group Anhui Electric Power Design Institute Co.Ltd, Hefei 230022, China)

Abstract: In order to improve the automation level of power system, reduce the labor intensity of power workers in the maintenance of high voltage transmission system, and ensure their personal safety, 6-DOF articulated robot for climbing power tower is designed and proposed. And kinematics analysis and solution are carried out for the configuration. In order to solve that the traditional analytical method used in the inverse kinematics of manipulator problems such as complicated operation and singular points can not be inverse operation, this paper presents an inverse kinematics algorithm for electric climbing robot based on the improved beetle antennae search algorithm. The DH model of electric climbing robot is established, and the forward kinematics equation is obtained. Establish a cost function according to the positive kinematics equation and the target pose, the cost function is optimized by the improved beetle antennae search algorithm, and use matlab to realize this algorithm for simulation verification. Contrast with the traditional beetle antennae search algorithm, improved genetic algorithm and improved particle swarm optimization, the inverse kinematics solution algorithm of electric climbing robot based on the improved beetle antennae search algorithm has good convergence and high solution accuracy, which can be used in the robot real-time control system.

Keywords: electric climbing robot; design of motion mechanism; improved beetle algorithm; inverse kinematics solution; single point test; trajectory planning

0 引言

电力行业的迅速发展,远距离高压、特高压输电技术已经达到较高水平.但是作为支撑的输电线电力铁塔依然依靠着人工巡检,大多采用人工爬塔的方法

进行检查维修;且由于输电铁塔大多建设在远郊或者山区,长年承受着大自然气候影响,需要定期巡检和不定期维修,因此人工巡检的方式作业难度大,危险性高的问题日益突出.目前用电力铁塔攀爬机器人

收稿日期: 2021-01-19; 修回日期: 2021-06-15.

基金项目: 安徽省自然科学基金(2008085UD03, 1808085MF180), 国家自然科学基金(62073113, 62003122, 61673153), 中央高校基本科研业务费(PA2020GDKC0016).

[†]通讯作者.E-mail:haibo.du@hfut.edu.cn.

代替人工完成危险的巡检任务已经成为一大热门^[1]. 国外主要有东京工业大学Shigeo H等设计了一种机器人NINJA^[2],该机器人可通过改变脚部机构攀爬墙壁和桥梁等,但机械机构繁琐且控制复杂;Armada M等研制了一种6足攀爬机器人REST^[3],该机器人可吸附在铁磁质墙壁表面,具有较强越障能力但整体结构尺寸较大,质量大,行动缓慢. 国内有四川大学陆小龙,赵世平等设计了一种攀爬机器人夹持机构^[4],此类型机器人有较好的夹持性能,但受限于结构越障能力稍弱;华南理工大学的蔡传武研制了一种具有攀爬和操作功能的双手爪式模块化仿生机器人^[5],攀爬机器人由五个关节构成,可多种步态攀爬,有着较强的适应性和灵活性,但是负载能力一般,且对中间关节电机要求极高,故做成较大型负载能力的机器人难度略大. 本文针对以上缺点提出一种六自由度结构的电力攀爬机器人,并建立改进DH模型参数,可多种步态攀爬,且可降低对使用的关节电机性能要求,可提高负载能力实现高空作业.

工业机器人逆运动学求解是指通过给定的目标机器人末端位姿参数计算出各关节角,对机器人的轨迹规划动态性能分析等都有着重要的研究意义^[6]. 目前,工业机器人逆运行方程求解方法主要是几何法、解析法和数值法. 针对几何法Menon M S等提出一种计算冗余机械臂运动规划的几何方法,将连杆的运动模拟为信息线运动进行几何求解^[7];L. Sardana等提出一种相对简单的几何方法求解四连杆机械臂逆解,该机械臂应用于医学应用中^[8];徐文福等提出一种改进的模式方法,使用模式函数描述机器人结构框架表示几何形状,求取应用轨道服务的机械臂逆解^[9]. 几何求解方法局限于机械构型,一般要求前三轴以几何形式存在解. 针对解析法YTAB C等提出一种冗余滑动机械臂的逆运动学参数分析方法,通过关节角度参数化方法求取解析解^[10],但此法高度依赖配置,若应用对象为多关节机械臂时计算量较大且求解过程有一定的运气成分. 针对数值解Hariharan等提出一种将解析解和数值解结合的方法解决机械臂逆解问题^[11];韩磊等提出一种使用牛顿迭代算法求机械臂逆解^[12]的方法,但迭代解稳定性无法保障. 随着计算机技术的飞速发展^[13],各种智能优化算法已经普及并广泛用于解决逆解问题.J. K. Parker^[14]等提出使用遗传算法(GA)^[15]求逆解,最大程度减少关节位移,但该方法求解精度有限. 林阳^[16]等对遗传算法进行改进,提出一种多种群遗传算法(MPGA)求解逆解方法,得到比单种群遗传

算法更好的求解精度;朱经纬^[17]等提出使用自适应粒子群算法(SAEPsO)^[18]进行求解,以获得比粒子群算法更高的精度. 本文天牛须算法是(Beetle Antennae Search Algorithm, BAS)是于2017年由Xiang Yuanjiang和ShuaiLi根据自然界天牛这一生物进行寻找食物的原理抽象出的一种高效智能寻优算法^[19],具有参数少、精度高、收敛速度快、易于实现等优点. 王宸,向长峰等提出一种变步长的改进天牛须算法^[20]在一定程度上可以提高天牛搜索优化速度,但由于并没有设置步长基本分辨率,会导致后期迭代出现无效迭代的情况. 卢光辉、滕欢等对天牛须算法引入模拟退火算法中的蒙特卡洛法则,使得算法稳定性提高并应用于分布式电源选址定容问题验证了在应用于电源选址问题求解中的高效性^[21]. 但是针对处理类似六自由度关节机器人这种高维度、非线性、强耦合的问题时,求解精度有限.

为了解决这些不足,本文针对传统的天牛须智能搜索算法,采用步长基本分辨率下,使步长指数衰减的方式进行变步长搜索提高解的搜索速度. 同时对蒙特卡洛法则做出改进使其适用于机器人逆解问题求解;最后通过单点测试和轨迹规划测试实验表明,与传统的天牛须智能优化算法相比,本文提出的改进天牛须算法求解速度更快,精度高,可以更好的应用于机器人逆解求解问题.

1 电力攀爬机器人结构设计

1.1 功能需求分析

电力铁塔高空作业任务主要涉及到铁塔螺栓,脚钉和绝缘子等定时检测或紧固,对于铁塔自身来说,也会产生腐蚀,裂缝等缺陷,也需要进行相关的检测和作业.

由此可见,对于电力铁塔高空攀爬机器人的结构设计,机器人应满足在角钢塔上进行攀爬,并具有携带一定检测设备和作业设备可以完成电力铁塔的智能巡检作业. 因此,本文首要完成设计一种机器人可以在电力铁塔上攀爬,实现基本的运动和越障功能. 从电力铁塔的结构分析,机器人既可以沿着主材(角钢)的侧面向上攀爬,也可以沿着角钢两个侧面的交叉棱线方向向上攀爬. 在这两种可选方案中,通过对比,如果沿着角钢的侧面攀爬,那么机器人的重心在角钢的外侧,机器人在运动的时候会因为重力产生较大的倾覆力矩,这对夹持机构或者吸附装置设计都较为复杂. 而沿着棱线的方向攀爬时,机器人的重心可以落在角钢塔上,机器人在攀爬运动时会更加可靠,所以本文旨在设计一种可以沿着角钢棱线向上攀

爬的电力铁塔攀爬机器人。

1.2 运动机构设计

电力铁塔攀爬机器人的机械结构是机器人可以实现攀爬越障功能的执行机构,机械结构是否合理直接影响机器人的运动性能.本文从仿生学角度,借鉴昆虫蠕虫^[22]攀爬步态,机器人运动部分设计为6R构型,静态定位则选择为为电磁铁吸附的方式实现.大自然中昆虫可以在树干枝条上攀爬运动,一般的鳞翅目昆虫常见的是蛾或者蝴蝶的幼虫,可以抽象为超冗余自由度机构来分析其运动原理.由于鳞翅目昆虫具有超冗余自由度,鳞翅目昆虫可以在复杂的环境下移动^[23].相比于树枝变化多端的结构铁塔桁架角钢的结构则简单很多.将昆虫模型进行简化如下图1所示.

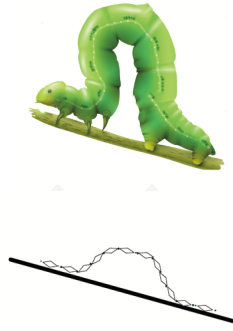


图1 蠕虫及其抽象模型^[24]

鳞翅目昆虫的超冗余构型精简为3个自由度的构型后,其结构如图2所示得到一种3自由度串联结构,图中蓝色旋转曲线代表关节位置.

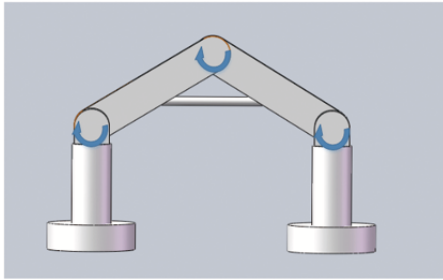


图2 三自由构型简图

但是该简化模型只能在平面内运动,而且不具有负载能力,为了提高电力铁塔攀爬机器人的灵活性,可以三维空间内运动,在腕部增加两个关节轴向垂直于铁塔的旋转关节;同时中间添加一个横杆,可以在其上添加负载或其他必要工作携带物,同时延长了机器人自身的长度,扩展机器人工作空间.设计一种如下图3所示机器人模型简图,图中蓝色旋转曲线代表关节位置.

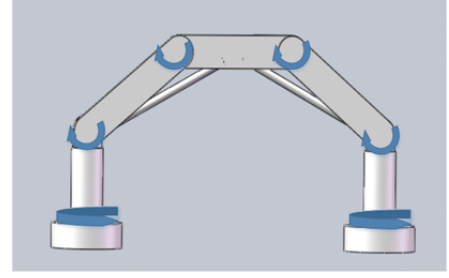


图3 六自由构型简图

2 基于改进天牛须算法的电力攀爬机器人运动学逆解算法

2.1 电力铁塔攀爬机器人运动学分析

首先就要根据前置坐标系方法可建立机器人各关节的坐标系,建立机器人各关节坐标系如图4所示,确定D-H参数,之后对其进行运动学分析.本文研究依托自主设计的电力攀爬机器人模型,根据图示各坐标系关系可得该机器人的连杆参数如表1所示.

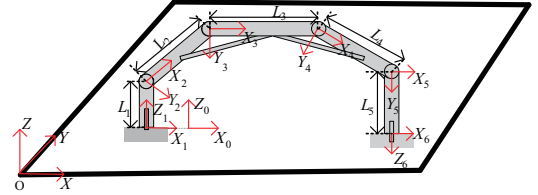


图4 电力攀爬机器人DH模型

表1. 电力攀爬机器人D-H参数表.

i	θ_i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i
1	$\theta_1(0^\circ)$	0°	0	0
2	$\theta_2(0^\circ)$	-90°	0	0
3	$\theta_3(0^\circ)$	0°	L_2	0
4	$\theta_4(0^\circ)$	0°	L_3	0
5	$\theta_5(0^\circ)$	0°	L_4	0
6	$\theta_6(0^\circ)$	-90°	0	0

α_{i-1} 为连杆 $i-1$ 的扭角, Z_{i-1} 和 Z_i 之间的扭角; a_{i-1} 为连杆 $i-1$ 的长度; Z_{i-1} 和 Z_i 公垂线段的长度; d_i 为连杆偏距, X_{i-1} 和 Z_i 的交点到 X_i 和 Z_i 的交点在 Z_i 上的距离; θ_i 为关节转角,绕 Z_i 由 X_{i-1} 和 X_i 之间的夹角.采用前置坐标系方法建立机器人的连杆坐标系,其相邻连杆间的其次变换矩阵通式^[25]如下式(1)

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中 $s\theta_i = \sin \theta_i$, $c\theta_i = \cos \theta_i$, $s\alpha_{i-1} = \sin \alpha_{i-1}$, $c\alpha_{i-1} = \cos \alpha_{i-1}$;根据式(1)可得式(2)到

式(7)

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & L_2 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & L_3 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & L_4 \\ s\theta_5 & c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_6 & -c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

将上述D-H参数表中的参数对应的带入公式(1),可求得相邻关节坐标变换矩阵:

$${}^0_6T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T. \quad (8)$$

假设末端期望的位姿矩阵已经给定为 T_{end} ,可表示为:

$$T_{end} = \begin{bmatrix} E_n & P_n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

式(9)中,其中 E_n 表示机器人末端姿态; P_n 表示机器人末端位置; $[n_x \ n_y \ n_z]$, $[o_x \ o_y \ o_z]$, $[a_x \ a_y \ a_z]$ 分别为法向量、滑动和接近向量; $[p_x \ p_y \ p_z]$ 为机器人末端位置,若选取3个任意位置元素和3个姿态矩阵

元素

$$\begin{aligned} {}^0_6T(1,4) &= T_{end}(1,4) \\ {}^0_6T(2,4) &= T_{end}(2,4) \\ {}^0_6T(3,4) &= T_{end}(3,4) \\ {}^0_6T(2,3) &= T_{end}(2,3) \\ {}^0_6T(3,3) &= T_{end}(3,3) \\ {}^0_6T(3,2) &= T_{end}(3,2) \end{aligned}. \quad (10)$$

得到6个方程和6个未知数可以通过迭代求出 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ 但是式(10)只有6个方程约束条件,有可能存在给定的位姿变量中,所选取的位置元素和姿态元素相同,但其他姿态元素不同的情况,这种情况就会导致错误的发生.所以这里为了避免这种情况的发生,采用9个位置元素和3个姿态矩阵元素组成12个方程,即一个非线性方程组如下公式(11)所示:

$$\begin{aligned} {}^0_6T(1,1) - T_{end}(1,1) &= 0 \\ {}^0_6T(1,2) - T_{end}(1,2) &= 0 \\ {}^0_6T(1,3) - T_{end}(1,3) &= 0 \\ {}^0_6T(2,1) - T_{end}(2,1) &= 0 \\ {}^0_6T(2,2) - T_{end}(2,2) &= 0 \\ {}^0_6T(2,3) - T_{end}(2,3) &= 0 \\ {}^0_6T(3,1) - T_{end}(3,1) &= 0 \\ {}^0_6T(3,2) - T_{end}(3,2) &= 0 \\ {}^0_6T(3,3) - T_{end}(3,3) &= 0 \\ {}^0_6T(1,4) - T_{end}(1,4) &= 0 \\ {}^0_6T(2,4) - T_{end}(2,4) &= 0 \\ {}^0_6T(3,4) - T_{end}(3,4) &= 0 \end{aligned}. \quad (11)$$

根据式(11)构造适应度函数:

$$f(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = 0. \quad (12)$$

2.2 天牛须搜索算法

天牛须搜索算法(Beetle Antennae Search - BAS)又称为甲壳虫搜索算法,是在2017年提出的一种生物启发式智能算法^[26].其生物学原理为:当天牛在寻找食物时,并不知道食物的具体位置.天牛通过位于头部的触角感知食物的具体位置.天牛通过位于头部的触角感知食物的气味强弱,在左触角感受到更强烈的食物气味时,它便向左飞行,反之则向右飞行.天牛寻找食物的过程本质上是一个寻优的过程.天牛须搜索算法和粒子群算法,模拟退火算法等类似,并不需要知道函数的具体形式,也无需梯度信息,就可以实现高效寻优.与粒子群算法相比,BAS的优势在于只需一个天牛个体,每一次迭代的速度要比粒子全算法快很多,使得算法整体运行时间大大降低.

2.2.1 天牛须算法基本原理

天牛须算法是指天牛个体在解空间,通过不断试探更新天牛个体自身位置,找到全局最优解.则首先具体天牛个体寻解模型建立过程如下:

(1)随机方向向量天牛个体每次迭代的天牛朝向定义为随机的方向向量:

$$\vec{a} = \frac{rand(k, 1)}{\|rand(k, 1)\|}. \quad (13)$$

(2)假设天牛个体在 D 维解空间中的位置 $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_D]$,则可根据天牛使用触须寻找食物的原理可定义天牛左右须的空间坐标为

$$\begin{cases} x_{rt} = x^t + d \vec{a} \\ x_{lt} = x^t - d \vec{a} \end{cases}. \quad (14)$$

式中 t 为迭代次数 x_{rt} , x_{lt} 分别表示天牛的右须和左须在第 t 次迭代时的空间坐标; d 代表天牛左右须间的距离.可根据步长 $step$ 设定.

(3)建立适应度函数即待优化函数.

$$\begin{cases} f_r = f(x_r) \\ f_l = f(x_l) \end{cases}. \quad (15)$$

根据适应度函数来判断天牛左右须在当前空间位置中的适应度值. $f(x)$ 为适应度函数.

(4)个体根据以下公式从当前位置 x^t 移动到 x^{t+1}

$$x^{t+1} = x^t + step * \vec{a} * sign(f_r - f_l). \quad (16)$$

式中 $sign$ 为符号函数.

2.2.2 改进天牛须搜索算法

当固定步长的原始天牛须算法进行应用时,在全局搜索和局部搜索过程也存在搜索速度效率和精度较为一般的问题.针对此问题本文提出一种基于指数衰减的变步长搜索方式,当其在初始位置时往往距离真实解较远,故采用初期步长设置较大,随着天牛的前进,步长缩小,由于步长和天牛个体大小 d 成正比,所以在初期有大天牛走大步提高全局搜索能力,迭代后期小天牛走小步提高局部搜索能力,随着迭代次数的增多,同时采用基本分辨率 $step_0$,指数衰减逐渐趋于0,不利于高迭代次数下的局部搜索,故设置基本步长作为基本分辨率,采用如下更新步长:

$$step = e^{-ut} step + step_0. \quad (17)$$

衰减系数 u 和 $step_0$ 根据实际使用情况而设定.

原始天牛须算法容易陷入局部最优,而不能找到全局最优值.为了让算法跳出局部最优使用模拟退火(Simulate,SA)中的蒙特卡洛准则^[27]对BAS算法进行改进,大大提高了算法的稳定性和可重复性. SA是一种以蒙特卡洛法则基准设计的寻优方法.模拟了物

体退火的过程,寻找目标的最低能量,找到目标的最优值.模拟退火在搜索寻优的过程中,引入了随机因素,即以适当的概率接受一个较劣解,减小陷入局部最优的概率.使用蒙特卡洛准则改进BAS算法,在迭代的过程中,以概率 p 接受较劣解,从而提高BAS算法的全局寻优能力.

$$p = \begin{cases} 1 & \text{if } \|f(x^t)\|_2 < \|f(x^{t-1})\|_2 \\ \exp\left(-\frac{\|f(x^t)\|_2 - \|f(x^{t-1})\|_2}{T}\right) & \text{else} \end{cases}. \quad (18)$$

式中 $f(x^t)$ 表示预更新位置处的适应度函数值; $f(x^{t-1})$ 表示之前最优的适应度函数值; $\exp$ 表示自然指数; T 为较高温度,由于降温速率决定了对劣解的接受能力,直接影响改进天牛须算法跳出局部最优解寻找局部最优解的能力,所以本算法提出令

$$T = 1/t. \quad (19)$$

t 为迭代次数,随着迭代次数的不断增加,温度 T 的降温速率很快,而 $f(x^t)$ 和 $f(x^{t-1})$ 的差值波动较小.所以随着迭代的进行,接受较劣的概率解 P 会逐步降低.

2.3 基于改进天牛须算法的电力攀爬机器人逆解算法流程

综上,基于改进天牛须算法的电力攀爬机器人逆解算法的步骤如下:

(1)首先设置天牛初始位置即攀爬机器人逆解迭代初始点 $x = [\theta_1' \ \theta_2' \ \theta_3' \ \theta_4' \ \theta_5' \ \theta_6']$,则适应度函数变为 $f(x) = 0$;为了提高解的针对性,加快收敛速度,本算法天牛初始位置不使用随机初始化的方式,而是将六自由度关节机器人当前各关节角 θ_1' 至 θ_6' 天牛的初始位置,提高解的针对性. 设置步长更新公式(17)中衰减指数系数 u ,初始化步长 $step$,以及基本分辨率 $step_0$,和初始温度 T ,天牛个体大小比例系数,最大迭代次数等.

(2)设定迭代次数 $t = 0$,将当前电力攀爬机器人各当前关节角初始化为天牛的初始位置,并设为最优位置 $x_{best} = x^0$;因为这里适应度函数是非线性方程组,所以适应度值采用2-范数的形式,设定最优适应度值有 $f_{best} = f(x_{best})$.

(3)计算天牛左右须空间位置,并带入适应度函数计算左右须适应度函数值.并按照式(17)更新天牛步长,同时按照 $d = step/c_0$,更新天牛个体大小 d .

(4)更新计数器 $t = t + 1$ 并根据式(13)计算天牛左右须的值,作为天牛距离六自由度关节机器人真实逆解的距离,所以 f_r 和 f_l 取2-范数,并带入式(15)比较两者离真实逆解的距离且更新天牛位置,将新的位置 x^{t+1} 带入式(12),并取二范数,即 $\|f(x^{t+1})\|_2$.

(5)根据接受概率 p ,即式(18)来判断是否更新天牛的最优位置.若 $\|f(x^t)\|_2 < \|f_{best}\|_2$,接受概率 $p = 1$,则 $x_{best}=x^t, f_{best}=f(x^t)$;若 $\|f(x^t)\|_2 \geq \|f_{best}\|_2$,则取 $rand < p$ 时,更新天牛最优位置,即 $x_{best}=x^t, f_{best}=f(x^t)$;否则不更新,同时在迭代时,丢弃本次天牛位置坏值,维持上一次的天牛位置 x^t 带入式(14).

(6)判断迭代次数 t 是否已达到初始化时设置的数值,是则进行下一步,否则返回到步骤(3),重复步骤(3)至(6).

(7)输出最优解,即最后一次迭代后的 x_{best} 和 f_{best} . 算法流程图如图5所示:

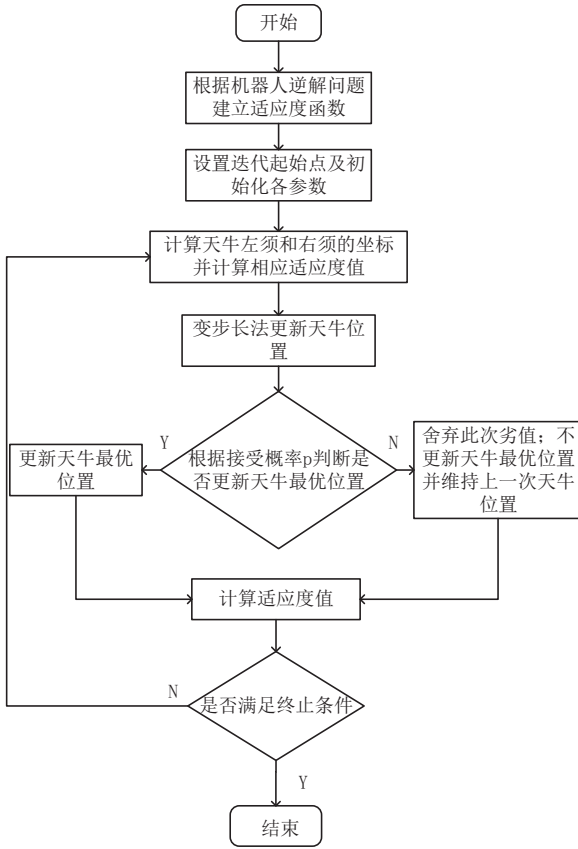


图5 算法流程图

3 算例仿真与分析

3.1 单点测试

利用图4所述电力攀爬机器人模型以及改进的BAS算法,在MATLAB环境下对基于改进天牛须算法的电力攀爬机器人逆解算法进行仿真.将本文改进天牛须算法与传统天牛算法、改进遗传算法和改进粒子群算法做对比;根据实际设计需要, $L_2 = 0.5\text{m}$, $L_3 = 0.6\text{m}$ 和 $L_4 = 0.5\text{m}$;设置天牛须算法和改进天牛须算法参数,令步长 $\delta = 1$,初始角设置为当前机器人角度 $x = [\theta_1' \ \theta_2' \ \theta_3' \ \theta_4' \ \theta_5' \ \theta_6']$,此处取电力攀爬机器人的关节初始偏移量 $x =$

$[0 \ -\pi/4 \ \pi/4 \ \pi/4 \ -\pi/4 \ 0]$,解空间维度 $D = 6$,天牛步长和天牛个体大小 d 成正比,有 $d = \text{step}/c_0$ 比例系数 $c_0 = 2$,衰减系数 $u=2$,初始步长 $\text{step} = 1$,基本分辨率设置为 $\text{step}_0 = 0.006$,最大迭代次数为140次.对MPGA算法进行参数设置:种群规模 $z = 30$,交叉概率 P_c 取0.8,变异概率 P_m 取0.001到0.05之间的随机数;设置SAEPSO算法参数:学习因子 $c_1 = 1.7$, $c_2 = 1.5$,近似度 $\lambda = 10^{-6}$,弹射概率 $\mu = 0.2$,弹射选择系数为 $\eta = 0.2$,弹射速度常数 $v_{i,\max} = (x_{i,\max} - x_{i,\min}) \times 5$,惯性权重 $\omega = 0.3$,种群规模 $m = 30$.MPGA和SAEPSO算法初始值均采用混沌初始化的算法进行初始化各种群个体初值.给定每种算法的最大迭代次数为140. 计算单点末端位置误差:

$$Er_P = (x_{tar} - x_{best})^2 + (y_{tar} - y_{best})^2 + (z_{tar} - z_{best})^2. \quad (20)$$

其中目标位置为 $[x_{tar} \ y_{tar} \ z_{tar}]$ 由开始时自行给定,算法输出的逆解结果带入式(8)可求出末端位置 $[x_{best} \ y_{best} \ z_{best}]$.计算单点姿态误差:

$$Er_Z = \|E_{tar} - E_{best}\|_2. \quad (21)$$

其中 E_{tar} 为已知目标姿态矩阵, E_{best} 为算法输出的逆解结果带入式(8)求出的末端姿态矩阵.取位置和姿态控制精度为: ε_p 和 ε_z 均取0.01mm.

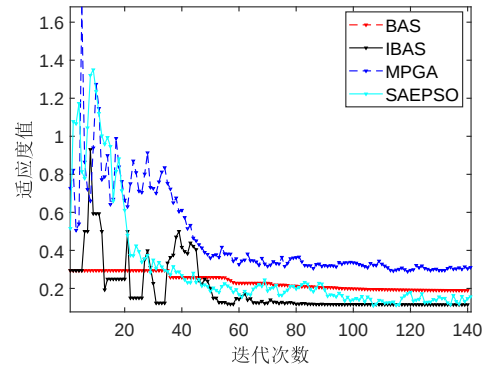


图6 单点测试适应度优化收敛曲线

MATLAB运行结果如图6, IBAS算法 $Er_P = 0.0036$, $Er_Z = 0.0062$ 均小于给定控制精度,从图6单点测试适应度优化收敛曲线可以看出,迭代前期IBAS由于按照蒙特卡洛准则以一定的概率接受坏值和大步长参数设置,所以前40次迭代过程中出现最优适应度值大于BAS算法的现象,有利于天牛个体在机器人逆解寻解过程中跳出局部最优值.MPGA和SAEPSO也分别以基于动态变异率的变异算子和弹射概率的参数设置进行全局寻优;但相比IBAS算法,SAEPSO和MPGA算法前期下降速度较快,不利于全局寻优,说明IBAS的跳出全局的局部搜

索能力强. 在经过40次迭代后,SAEPSO算法少部分点的适应度值和IBAS相同或者更好,但适应度值波动较大,稳定性差.IBAS算法后期由于和目标解较近,所以设置步长的衰减使得天牛逐渐变为小天牛进行精细搜索快速收敛,找到最优解. 显然,IBAS算法可以更好的应用于求解单点电力攀爬机器人运动学逆解. 对每一种算法分别进行独立运算100次,并对各算法每次最优适应度进行统计,带入位置误差和姿态误差公式,将位置误差和姿态误差的均值($Er_P + Er_Z$)/2作为统计对象,分别统计各算法运行100次的最优、最差、平均值和标准差.统计结果如下表2,分析可知IBAS算法的四个评价指标均比其他3种算法好,其中相比于传统BAS算法平均值高2个数量级,故IBAS精度高,且其标准差相对较小,所以在求解电力攀爬机器人逆解的过程中具有一定的可靠性.

表 2 各算法求解指标统计

算法	BAS	IBAS	MPGA	SAEPSO
最差	8.346×10^{-2}	4.154×10^{-3}	9.147×10^{-1}	2.133×10^{-2}
最好	2.812×10^{-3}	6.951×10^{-5}	3.766×10^{-3}	7.315×10^{-4}
平均值	3.538×10^{-2}	2.336×10^{-4}	5.288×10^{-2}	5.699×10^{-3}
标准差	6.127×10^{-2}	5.461×10^{-4}	2.439×10^{-1}	4.521×10^{-3}

3.2 轨迹规划测试

单点测试可行的情况下,进一步验证上述算法在轨迹规划中的应用,进行了大量的数据试验.依然取电力铁塔攀爬机器人的各连杆参数为: $L_2 = 0.5\text{m}$, $L_3 = 0.6\text{m}$ 和 $L_4 = 0.5\text{m}$,以及单点测试中的参数设置.并在该机器人的工作空间内,选取在空间内的三个点,构成一个由三条直线段围成的三角形作为目标轨迹,则所选取三角形各个顶点处的关节转角分别为:

$$\begin{aligned}\theta_A &= [6^\circ \ 50.67^\circ \ -26.14^\circ \ -30^\circ \ -20^\circ \ 35^\circ], \\ \theta_B &= [16^\circ \ 87.27^\circ \ -48.14^\circ \ 60^\circ \ -66^\circ \ 45^\circ], \\ \theta_C &= [90^\circ \ 45^\circ \ 36^\circ \ 55^\circ \ 80^\circ \ 45^\circ].\end{aligned}$$

(22)

根据式(8)可分别计算出三角形各顶点处的位姿矩阵.设置所选取的目标轨迹的插值点总数为120个,分配到每一条边取40个插值点,如图7所示,在求取每个插值点的逆解时,以前一次插值点

所求取的逆解值作为天牛初始点,第一个点的迭代初始值选取为4.1节单点测试时天牛初始点的选取方式,即电力攀爬机器人的关节初始偏移量.在MATLAB中运行天牛须算法和改进天牛算法进行三角形轨迹规划,目标轨迹插值点末端位置误差由如下公式(20) 计算,末端姿态误差由式(21)计算.取位置和姿态控制精度为: ε_p 和 ε_z 均取 0.01mm .

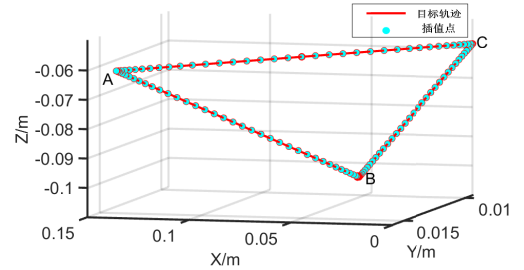


图 7 电力攀爬六自由度关节机器人轨迹仿真

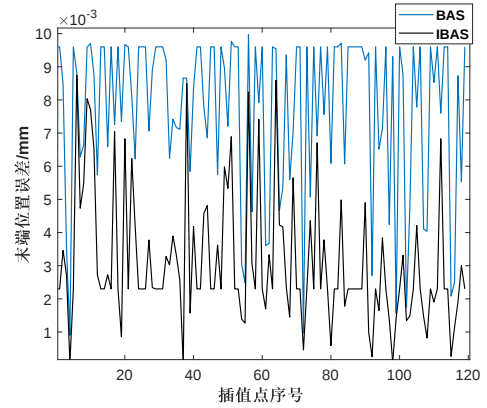


图 8 目标轨迹插值点的位置误差分布曲线

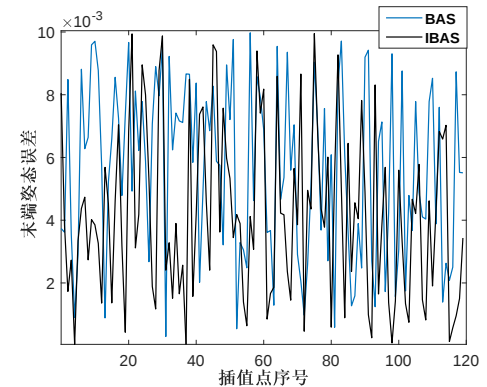


图 9 目标轨迹插值点的姿态误差分布曲线

MATLAB仿真结果由图8、图9所示,分析目标轨迹插值点的位置和姿态误差分布曲线可知,各插值点的控制精度虽然呈现一定的波动性,但都在精度要求范围之内,且IBAS算法和BAS算法相比,IBAS末端位置误差更小.

4 结论

(1)本文天牛须算法的初始迭代值选取和算法迭代性能两个方面考虑,提出了基于改进天牛须算法的电力攀爬机器人运动学逆解算法,仿真实验验证了算法的正确性.

(2)大量的实验表明,本文所提出的算法能够在确保较高精度的条件下满足一般机器人的控制要求,实现了对机器人逆运动学问题的求解.但是本文所提出的改进天牛须算法应用于机器人逆运动学问题的求解,对处理器计算能力有一定要求,要实现实时处理,必须采用多点并行计算且对GPU的性能要求较高,在未来的研究中可以对算法进行进一步的改进,以提高算法的求解速度.

(3)本算法是针对本文提出的电力攀爬机器人模型进行计算验证的,同理本算法也可应用于其他一般六自由度关节机器人逆运动学的求解,包括对手腕偏置型的六自由度关节机器人运行学逆解的求解.

参考文献(References)

- [1] 张运楚, 梁自泽, 谭民. 架空电力线路巡线机器人的研究综述[J]. 机器人, 2004, 26(5): 467-473.
(Zhang Y, Liang Z Z, Tan M. Review of the research on overhead power line patrol robot [J]. Robot, 2004, 26 (5): 467-473.)
- [2] Shigeo H, Keisuke A. Coupled and decoupled actuation of robotic mechanisms[J]. Advanced Robotics, 2001, 15(2).
- [3] Armada M, Prieto M, Akinfiev T, Fernández R, Fernández G. On the design and development of climbing and walking robots for the maritime industries[J]. Journal of Maritime Research Jmr, 2005, 2(1).
- [4] 陆小龙, 赵世平, 廖俊必, 等. 电力铁塔攀爬机器人夹持机构设计与分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(6): 239-243, 250.
(Lu X L, Zhao S P, Liao J B. Design and analysis of clamping mechanism of power tower climbing robot [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42 (6): 239-243, 250.)
- [5] 蔡传武. 爬杆机器人的攀爬控制[D]. 广州: 华南理工大学机械与汽车工程学院, 2011.
(Cai C W. Climbing control of pole climbing robot [D]. Guangzhou: School of Mechanical and automotive engineering, Guangzhou South China University of technology, 2011.)
- [6] 贾庆轩, 袁博楠, 陈钢, 符颖卓. 关节锁定空间机械臂负载操作能力评估与轨迹规划[J]. 控制与决策, 2020, 35(1): 243-249.
(Jia Q X, Yuan B N, Chen G, Fu Y Z. Load operation capability evaluation and trajectory planning of joint locked space manipulator [J]. Control and decision, 2020, 35 (1): 243-249.)
- [7] Menon M S, Ananthasuresh G K, Ghosal A. Natural motion of one-dimensional flexible objects using minimization approaches[J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 67(Complete): 64-76.
- [8] Sardana L, Sutar M K, Pathak P M. A geometric approach for inverse kinematics of a 4-link redundant In-Vivo robot for biopsy[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(12): 1306-1313.
- [9] Xu W, Mu Z, Liu T, et al. A modified modal method for solving the mission-oriented inverse kinematics of hyper-redundant space manipulators for on-orbit servicing[J]. Acta Astronautica, 2017, 139(oct.): 54-66.
- [10] YTAB C, Jla B, Yla B, Yuan Y. Analytical inverse kinematic computation for 7-DOF redundant sliding manipulators[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 155.
- [11] Hariharan, Ananthanarayanan, Raúl, Ordóñez. Real-time Inverse Kinematics of $(2n + 1)$ DOF hyper-redundant manipulator arm via a combined numerical and analytical approach[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015.
- [12] 韩磊, 刁燕, 张希斌, 罗华. 基于改进牛顿迭代法的手腕偏置型六自由度关节机器人逆解算法[J]. 机械传动, 2017, 41(01): 127-130+150.
(Han L, Diao Y, Zhang X B, Luo H. Inverse solution algorithm for wrist offset 6-DOF joint robot based on improved Newton iteration method [J]. Mechanical transmission, 2017, 41 (01): 127-130 + 150.)
- [13] 王乐君, 王亚午, 赖旭芝, 吴敏. 基于智能优化算法的Pendubot轨迹规划与控制方法设计[J]. 控制与决策, 2020, 35(5): 1085-1090.
(Wang L J, Wang Y W, Lai X Z, Wu M. Design of pendubot trajectory planning and control method based on intelligent optimization algorithm [J]. Control and decision, 2020, 35 (5): 1085-1090.)
- [14] J. K. Parker, A. R. Khoogar and D. E. Goldberg, Inverse kinematics of redundant robots using genetic algorithms[C]. Proceedings, 1989 International Conference on Robotics and Automation. Scottsdale, AZ, USA, 1989: 271-276.
- [15] 李自成, 张赛, 王后能, 熊涛. 基于混合差分遗传算法的Bouc-Wen迟滞模型辨识策略[J]. 控制与决策, 2021, 36(2): 371-378.
(Li Z C, Zhang S, Wang H N, Xiong T. Identification strategy of bouc Wen hysteresis model based on hybrid differential genetic algorithm [J]. Control and decision, 2021, 36 (2): 371-378.)
- [16] 林阳, 赵欢, 丁汉. 基于多种群遗传算法的一般机器人逆运动学求解[J]. 机械工程学报, 2017, 53(03): 1-8.
(Lin Y, Zhao H, Ding H. Inverse kinematics solution of

- general robot based on multi population genetic algorithm [J]. Chinese Journal of mechanical engineering, 2017,53 (03): 1-8.)
- [17] 朱经纬, 方虎生, 邵发明, 蒋成明. 自适应粒子群算法求冗余机械臂逆运动学解[J]. 计算机工程与应用, 2019, 055(014):215-220.
(Zhu J W, Fang H S, Shao X M, Jang C M. Adaptive particle swarm optimization for inverse kinematics of redundant manipulator [J]. Computer engineering and applications, 2019, 055 (014): 215-220)
- [18] 梁静, 葛士磊, 瞿博阳, 于坤杰. 求解电力系统经济调度问题的改进粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2020, 35(8): 1813-1822.
(Liang J, Ge S L, Qu B Y, Yu K J. An improved particle swarm optimization algorithm for power system economic dispatch [J]. Control and decision, 2020, 35 (8): 1813-1822.)
- [19] 金爱娟, 卢宝忠. 基于天牛须算法整定PID的永磁同步电机控制[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(10): 54-58.
(Jin A J, Lu B Z. Permanent magnet synchronous motor control based on tianniu Xu algorithm tuning PID [J]. Agricultural equipment and vehicle engineering, 2020, 58 (10): 54-58.)
- [20] 王宸, 向长峰, 王生怀. 改进天牛须搜索算法在圆度误差评定中的研究[J]. 制造技术与机床, 2019, (11): 143-146.
(Wang C, Xiang C F, Wang S H. Research on the application of improved search algorithm of tianniu Xu in roundness error evaluation [J]. Manufacturing technology and machine tools, 2019, (11): 143-146.)
- [21] 卢光辉, 滕欢, 廖寒逊, 吴泽穹. 基于改进天牛须搜索算法的分布式电源选址定容[J]. 电测与仪表, 2019, 56(17): 6-12.
(Lu G H, Teng H, Liao H X, Wu Z X. Location and capacity determination of distributed generation based on improved tianniu search algorithm [J]. Electrical measurement and instrumentation, 2019, 56 (17): 6-12.)
- [22] Zhang L, Guan Y, Zhu H, Zhang H. Posture Detection of Suction Modules for a Biped Wall-Climbing Robot[J]. Robot, 2012, 34(6): 758-763.
- [23] 陈建敏. 仿壁虎机器人负表面爬行的步态规划及运动仿真[D]. 南京:南京航空航天大学机电学院, 2012.
(Chen J. Gait planning and motion simulation of gecko like robot crawling on negative surface [D]. Nanjing: School of mechanical and electrical engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.)
- [24] 李勇兵. 输电线电力铁塔攀爬机器人的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程与自动化学院, 2016.
(Li Y B. Research on climbing robot for power transmission tower [D]. Haerbing: School of mechanical and electrical engineering and automation, Harbin Institute of technology, 2016.)
- [25] 章路平, 何高清. 基于改进双种群烟花算法的机器人逆解研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020, (9): 42-46.
(Zhang L P, He G Q. Research on inverse solution of robot based on improved dual population fireworks algorithm [J]. Modular machine tools and automatic processing technology, 2020, (9): 42-46.)
- [26] Li S. Jiang X. BAS: beetle antennae search algorithm for optimization problems[J]. ArXiv: 2017(10): 1-4.
- [27] 何庆, 吴意乐, 徐同伟. 改进遗传模拟退火算法在TSP优化中的应用[J]. 控制与决策, 2018, 33(2): 219-225.
(He Q, Wu Y L, Xu T W. Application of improved genetic simulated annealing algorithm in TSP optimization [J]. Control and decision, 2018, 33 (2): 219-225.)

作者简介

都海波(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 从事控制理论(先进非线性控制理论、算法及应用) 机器人(工业机器人、双臂协作机器人、电力巡检无人机、智能移动机器人、攀爬机器人) 等研究, E-mail: haibo.du@hfut.edu.cn;

葛展展(1996—), 男, 硕士生, 从事机器人控制技术研究, E-mail: zhanzhanah@163.com;

张金锋(1982—), 男, 高工, 硕士从事输电线路信息化研究, E-mail:5952544@qq.com.

谢枫(1980—), 男, 高工, 硕士, 从事电网数字化施工、运维等方面研究, E-mail:UHELL@163.com