

## 进化计算在机器人轨迹规划中的应用研究\*

张光锋 王正志

(国防科技大学自动控制系 长沙 410073)

陈积强

(深圳自来水(集团)有限公司 深圳 518046)

**摘要** 本文介绍了采用进化计算思想研制的机器人轨迹规划系统 RTP-1 提出多层次动态结构化编码方案,利用低中高三层进化算法分别优化距离、路径和关节角度偏差,基于多层综合优化策略解决多目标多约束工程优化问题,建立了次序相关问题求解的通用框架。在进化算法中,利用拉马克效应加快轨迹规划速度,在 RM-501 机械手上实现的任意空间直线和空间曲线轨迹规划具有良好的鲁棒性,规划轨迹的相邻臂构型间具有良好的柔顺性,规划轨迹的臂构型序列具有良好的平滑性。本文所采用的机器人轨迹规划方法具有通用性,可推广应用于各种动力学系统的研制。

**关键词** 进化计算; 机器人轨迹规划; 多目标优化

**分类号** TP242.6

## The Researches of Application Techniques on Robot Trajectory Planning with Evolutionary Computation

Zhang Guangduo Wang Zhengzhi

(Department of Automatic Control NUDT, Changsha 410073)

Chen Jiqiang

(Shenzhen Water Resource Co Ltd Shenzhen, 518046)

**Abstract** This paper researches into actual robot trajectory planning system (RTP-1) helped with the idea of evolutionary computation and provides a kind of dynamic coding scheme with multi-level structure, optimizes the distance, path and the displacement of link angles respectively by low, middle and high level evolutionary algorithms and solves the problem of engineer optimization with multi-goal and multi-restrain based on the multi-level optimization strategy, and establishes a currency scheme of sequence-correlated problem solving. It accelerates the process of robot trajectory planning by take advantage of Lamarck effect. This paper has realized the reasonable trajectory planning with arbitrary space lines or curves on the robot of PM-501. The realized process of trajectory planning has a fine stability, the adjacent arm-configurations has a fine flexibility and the sequence of arm-configurations has a fine flatness. The method of robot trajectory planning used in this paper can be generalized to apply in different kinds of dynamic systems.

**Key words** evolutionary computation robot trajectory planning, multi-goal optimization

智能机器人是一个知识高度交叉的学科。机器人控制综合利用了机器人学和自动化最新技术。机器人是高度复杂的非线性系统,而且其中许多参数未知,采用传统的控制方法难以获得良好的效果。近

\* 1996年12月30日收稿  
国防预研基金资助项目  
第一作者:张光锋,男,1958年生,博士

年来发展起来的自适应控制仅能解决部分参数未知的问题,但需要知道系统的动力学结构,而且难以应付高度非线性问题的困难。所以,需要探索新的机器人规划和控制方法。

对于难以建模或参数空间过大的复杂系统,可借鉴自然进化机制,采取进化计算方法求解。进化计算方法不需要系统性能空间的先验知识,能有效地搜索系统的最优控制参数,不需要环境的精确控制知识。进化机制能够指导和改进系统的优化过程,寻找问题的解答。将进化计算引入机器人控制,有助于建立具有策略性的新型方法。

本文将进化计算用于产生机器人轨迹规划,从而在复杂性环境中实现具有柔顺性的机器人控制策略。所研制的机器人轨迹规划系统 RTP-1,能够实时完成三维空间中任意直线和任意曲线轨迹的规划。其中所采用的进化算法基于机器人的自然结构,采用多层次动态结构化编码方案及相似交叉,以确保子代轨迹的时间有序性和运动平滑性。

## 1 轨迹规划表示

本文针对机器人轨迹规划任务,提出多层次动态结构化编码方案,直接采用机器人的自然结构来描述机器人轨迹表征。

### 1.1 臂构型序列:

将臂构型表示为机械臂关节角五元组。将轨迹表征为若干臂构型形成的序列。可将每一关节角度五元组(臂构型)视为特征信息单元或轨迹的基因。将GA用于机器人轨迹规划时,所采用的轨迹表征结构具有如下特点:

- (a) 采用变长结构表征轨迹,由一数目可变的运动矢量描述;
- (b) 描述轨迹的运动矢量具有次序相关性;
- (c) 构成轨迹的臂构型重复  $n$  次,其选取具有一较大取值范围;
- (d) 臂构型的自然表征为不可分离的子结构。

### 1.2 多位、多等位参数(分形结构):

在轨迹自然表征中,最小功能单元是臂构型,它由五个关节角参数组成。本文称它为多位基因。每一关节角参数可以取大范围的量化值,而不是仅取 0-1 值,所以它是多等位基因。多位基因构成轨迹自然表征的子结构(臂构型),具有相对的完整性。在轨迹规划时,不可采用常规重组算子,需要采用新的重组算子,协调改变多位基因以确保臂构型的合理性,使其终端作用器落入所要求的位置精度范围内。多位基因具有冗余性,可为GA提供柔顺性。作为求解多等位问题的一种途径,可使每一多等位参数具有一子表征,并减小等位量值数到易于处理的规模而不损害解空间精度。将其搜索资源进一步细化为分形区域。采用类似多栅格方法,参数量值精度被提高,同时也限定群体成员,整个群体具有一高度变异率(指在提高基值附近区域的群体多样性),继续搜索解空间中基值附近的有限分形区域。

## 2 轨迹规划方法

### 2.1 轨迹繁殖:

传统的重组算子不适于轨迹表征,因为机器人轨迹的长度可变且具有次序相关性,使得臂构型序列及相应的终端作用器空间位置之间缺乏明确的对应关系,而且,两条空间轨迹之间的随意交叉繁殖,所产生子代轨迹很可能无法满足运动学和动力学的要求。

因此,需要引入下面的相似匹配准则,在父本轨迹中选取某一交叉位点(臂构型)之后,在母本轨迹中的对应交叉位点,取决于臂构型在臂构型空间上的相似性(依据某一表现型函数度量)。在复杂的机器人轨迹结构中,相似匹配准则可确保轨迹的次序特性及最少断裂效应。从轨迹表现型上,可选取两臂构型的终端作用器位置之间的 Euclid 距离,作为机器人轨迹上交叉位点的匹配准则。从动力学角度上,应选取整个臂构型结构的相似性度量,作为机器人轨迹上交叉位点的匹配准则。在结构上相似的臂构型之间进行交叉,可使交叉位点上的变化具有最小的断裂效应,使得在关节空间中具有最小的加速度和加加速度。

臂构型之内的交叉操作称为内部交叉, 臂构型之间的交叉操作称为分离交叉。本文在机器人轨迹规划中主要采用了分离交叉, 这是因为分离交叉可以确保臂构型基因结构的完整性和协调性 (但是在变异算子中使用了臂构型的内部变异)。

## 2.2 变异算子:

变异算子作用在包含多位参数的臂构型上时, 因各关节角对于终端作用器位置的控制作用依次减弱, 故相应的变异概率应依次增强, 可使轨迹上任一特定臂构型的变异概率均匀分布, 而臂构型内特定关节角的变异概率同其重要性成反比, 且随着精度提高逐渐降低。而且, 考虑到分形结构的特点, 随着轨迹群体的进化, 变异量值应逐渐变小 (多栅格策略)。

## 2.3 删除和增加算子:

繁殖机制中所含删除与增加算子类似于变异算子, 用以控制位串长度的动态变化过程, 可提高臂构型序列长度的稳定性。本文使用的删除算子, 是在臂构型序列中过于密集的地方, 随机选取作用不大的臂构型进行删除。本文使用的增加算子, 根据对象的具体情况采用三种不同策略 (随机方式 / 相关方式 / 复制方式), 在臂构型序列中稀疏的地方增加适当的臂构型。

## 2.5 评估机制:

由繁殖机制所创建的轨迹被送到机器人控制器, 执行所规划的臂构型偏移矢量时间序列。这一矢量反映运动期间机械臂的动力学行为和终端作用器位置。实际路径 (表现型) 依据目标函数进行评估; 评估指标可采用规划路径与期望路径之间的整体偏差或最大偏差、路径波纹等。轨迹评估结果即可反映表现型对于群体中其它成员的相对适值。

## 2.5 选择机制:

为了避免过早收敛到局部亚优解, 本文采用最佳个体世袭策略, 对于现行群体中的最佳轨迹, 不但予以保留, 而且成比例于其适值进行复制, 并参与产生下一世代的进化操作, 从而加快搜索和最优化进程。仅当子代具有更高适值时替换其较差亲代进入群体。

## 2.6 三层进化策略

机器人轨迹规划为一高度非线性优化问题, 具有多种冗余、多种约束及多重目标。本文采用多层次动态结构化编码方案, 利用低、中、高三层进化策略, 分别优化距离、路径和关节角度偏差。

## 2.7 拉马克子目标回报:

一般情况下, 学习任务是由若干个步骤组成的, 对于给定的学习任务, 可以在中间步骤就适当地给予回报, 而不必顾及最终目标的成败。这种策略称为子目标回报。子目标回报可以改进学习方法, 加速学习进程, 简化解空间及增强鲁棒性, 进而获得导致最终目标的操作序列。本文把轨迹性状作为启发式知识, 通过拉马克繁殖算子来隐式地实现子目标回报方案。在轨迹性状较好的区段, 本文主要采用分离交叉算子进行, 以减少轨迹的断裂效应, 同时采用具有较小概率的变异算子, 以确保轨迹良好区段在轨迹规划期间的相对稳定性。在轨迹性状态较差的区段, 本文主要采用内部交叉算子进行, 而且采用具有较大概率的变异算子, 以增加轨迹群体的多样性。本文依据相应的拉马克适值函数, 辨识出协调适应的轨迹区段, 并由拉马克繁殖算子, 通过将表现型自适应信息引入基因型, 将这一良好的性状遗传到子代, 又通过逐次产生并优化轨迹次序相关各区段, 隐含地应用子目标回报模式, 从而明显加速机器人轨迹规划的进程。

# 3 轨迹规划系统

轨迹规划为一高度非线性优化问题, 具有多种冗余、多种约束及多重目标。本文采用多层次动态结构化编码, 利用低中高三层进化策略分别优化距离、路径和关节角度偏差, 引入拉马克效应, 融合启发式搜索与遗传搜索, 有效地解决机器人轨迹规划问题。机器人轨迹规划系统的信息流程如图 1 所示。

轨迹规划系统中所采用的轨变 GA, 依据相应的拉马克适值函数, 辨识出协调适应的轨迹区段, 并由拉马克繁殖算子, 通过将表现型自适应信息引入基因型, 将这一良好的性状遗传到子代。又通过逐次产生并优化轨迹次序相关各区段, 隐含地应用子目标回报模式, 从而加速优化进程。

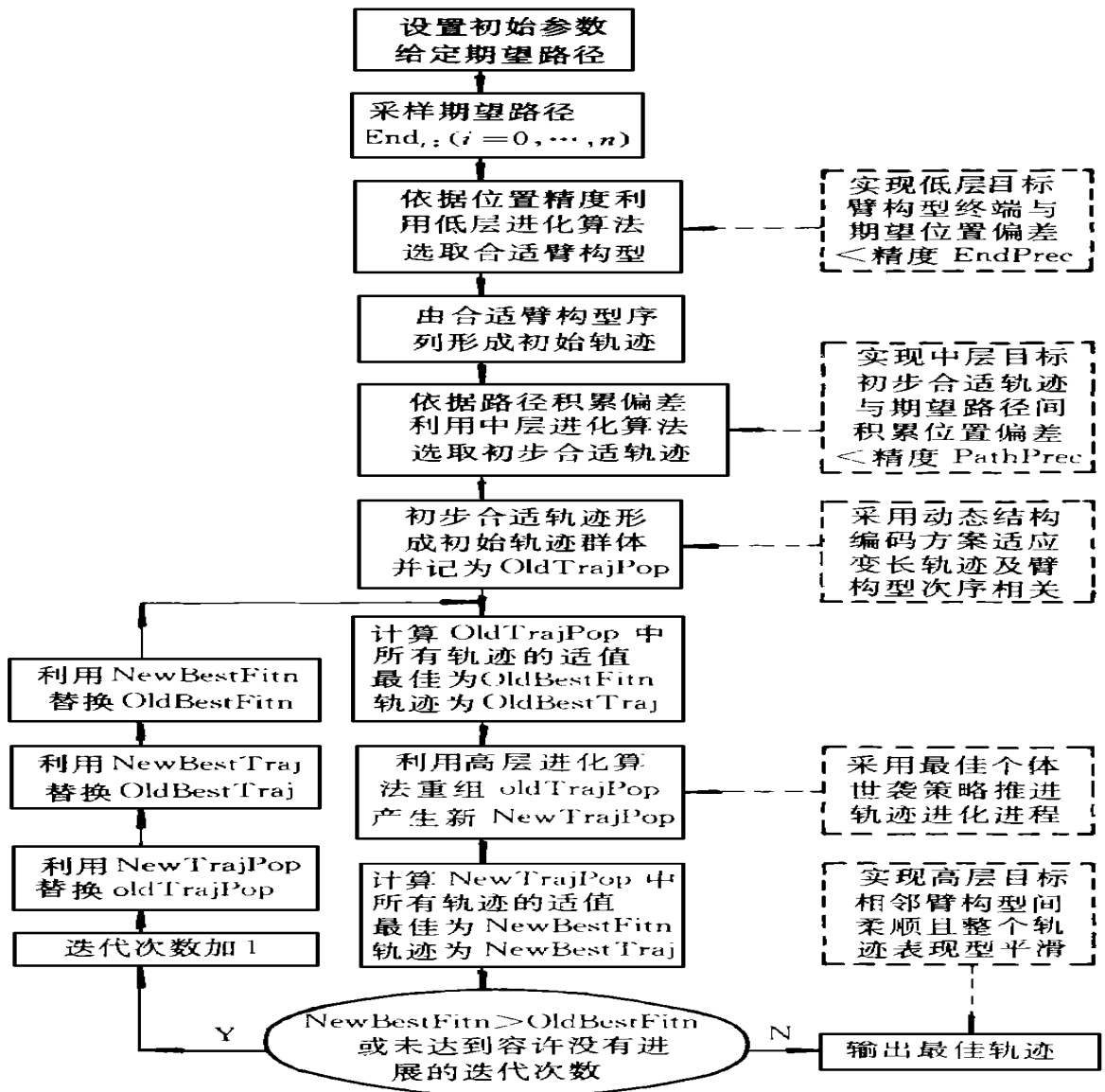


图 1

输入参数为期望路径,可为机器人工作包迹内的任一空间直线或曲线,输出参数为规划轨迹,要求满足一系列约束条件,达到预定目标并具有鲁棒性,包括限制在机器人工作包迹内、轨迹中臂构型的终端作用器位置偏差、与期望路径之间的积累位置偏差、轨迹中相邻臂构型各关节角度改变量值之和(转换柔顺性)及轨迹中所有相邻臂构型各关节角度改变量值总和(轨迹平滑性)等

### 3.1 数据结构:

- (1) 机械臂关节角:具有可变精度;
- (2) 臂构型:表示为关节角五元组  $A = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$ ;
- (3) 轨迹:表示为臂构型序列  $T = (A_1, \dots, A_n)$ ;可变轨迹长度为  $n$ ;
- (4) 轨迹群体:表示为有  $m$  个轨迹集合  $P = \{T_1, \dots, T_m\}$ ;可变群体规模为  $m$ 。

由机械臂(关节角)、臂构型(关节角元组)、轨迹(臂构型序列)、轨迹群体(轨迹集合)组成多层次动态结构化编码方案。对于机械臂的关节角及臂构型采用低层编码,即变长二值位串以适应不同精度要求;对于机器人轨迹采用高层编码,即动态结构形式以适应轨迹变长且次序相关等要求。

### 3.2 多目标优化策略:

- (1) 低层优化:要求极小化规划轨迹中臂构型的终端作用器与期望路径之间的距离,以达到预定的

位置精度  $EndP_{rec}$  可随机产生一初始臂构型群体, 利用低层进化算法选取合适臂构型

(2) 中层优化: 要求极小化规划轨迹与期望路径之间的距离积累偏差, 以达到预定的积累偏差精度  $PathP_{rec}$  基于低层优化构建一初始轨迹群体, 利用中层进化算法选取合适轨迹。

(3) 高层优化: 要求极小化规划轨迹中所有相邻臂构型各关节角度改变量值总和 (隐含极小化规划轨迹中相邻臂构型各关节角度改变量值之和), 以使规划轨迹中相邻臂构型之间转换柔顺、整体规划轨迹平滑。基于中层优化构建一初始轨迹群体, 利用高层进化算法选取合适轨迹; 其中涉及交叉、变异、增加及减少算子, 基于低层优化选取合适臂构型; 而且转换柔顺与轨迹平滑目标, 要求充分利用机器系统资源

### 3.3 轨迹规划算法:

任意给定一期望路径  $DesirePath = Path(x, y, z)$ ; 要求规划一合理臂构型序列  $BestTraj = \{A_1, \dots, A_n\}$ , 满足如下条件:

- (a) 优化拟合给定期望路径: 即所规划的终端作用器序列落入给定轨迹所容许各种误差范围内
- (b) 具有柔顺性和鲁棒性: 即相邻臂构型间机械臂的关节角变化柔顺, 规划轨迹平滑且稳定。

具体规划步骤如下:

(1) 在期望路径  $DesirePath$  上采样终端作用器序列  $(End_1^*, \dots, End_n^*)$ ; 其中采样点  $End_i^*$  的坐标为  $(x_i^*, y_i^*, z_i^*)$ ;  $i \in \{0, \dots, n\}$  可依据具体路径采用长度均匀采样或曲率分布采样

(2) 利用低层进化算法 LGA 获取一合适臂构型  $A_i^* = (a_1^*, a_2^*, a_3^*, a_4^*, a_5^*)$ :

其终端  $E_i^*$  与采样点  $End_i^*$  的间距满足位置精度:  $|E_i^* - End_i^*| < EndP_{rec}$

(a) 随机选取关节角度  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  构成一臂构型  $A_i = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$ ;

由所选臂构型构成一初始臂构型群体  $OldAmPop$  (规模为  $AmPopSize$ );

$OldAmPop = \{A_1, \dots, A_{AmPopSize}\}$ .

(b) 计算  $OldAmPop$  中每一臂构型的终端  $E_i(x_i, y_i, z_i)$  坐标;

计算终端  $E_i$  与采样点  $End_i^*$  之间的距离:

$$dist_i = |E_i - End_i^*| = \sqrt{(x_i - x_i^*)^2 + (y_i - y_i^*)^2 + (z_i - z_i^*)^2};$$

( $i = 1, \dots, AmPopSize$ )

选出与采样点  $End_i^*$  之间距离最小者  $dist_{min} = |E_k - End_i^*|$ .

(c) 若  $dist_{min} < EndP_{rec}$ , 则选取  $A_k$  作为合适臂构型  $A_i^*$ ; 退出低层优化

(d) 否则, 基于  $OldAmPop$  重组关节角度, 构成新的臂构型群体  $NewAmPop$ .

重组算子包括概率反比于终端间距的繁殖, 交叉及变异; 可采用常规 GA 的二值编码或连续实值编码。

(e)  $OldAmPop \leftarrow NewAmPop$  重复执行 (b)

(3) 利用中层进化算法 MGA 选取一初步合适轨迹  $InitTraj = (A_1, \dots, A_n)$ ;

要求  $InitTraj$  与期望路径间的积累偏差满足精度:  $\sum |E_i - End_i^*| < PathP_{rec}$

(a) 对于期望路径  $DesirePath$  上的采样终端作用器序列  $End_1^*, \dots, End_n^*$ ,

重复执行 (2), 获取一初始轨迹  $InitTraj = (A_1, \dots, A_n)$ ;

由所选初始轨迹构成一初始轨迹群体  $OldTrajPop$  (规模为  $TrajPopSize$ );

$OldTrajPop = \{InitTraj, \dots, InitTraj_{TrajPopSize}\}$ .

(b) 计算  $OldTrajPop$  中每一轨迹与期望路径间的积累偏差  $SumDist_j$

$$SumDist_j = \sum_{i=0}^n dist_i = \sum_{i=0}^n |E_i - End_i^*|$$

其中,  $j = 1, \dots, TrajPopSize$  更精确地可采用积分运算。选出与期望路径间积累偏差最小者

$SumDist_{min} = SumDist_t$

(c) 若  $SumDist_{min} < PathP_{rec}$  则选取  $InitTraj$  作为初步合适轨迹  $InitTraj$  退出中层优化

(d)否则,基于  $OldTrajPop$  重组臂构型,构成新的轨迹群体  $NewTrajPop$  重组算子包括概率反比于积累偏差的繁殖、相似交叉及臂构型变异;可采用结构层次编码,内层为关节角度量值、外层为臂构型子结构

(e)  $OldTrajPop \rightarrow NewTrajPop$  重复执行 (b)

(4) 利用高层进化算法 HGA 选取一最优轨变  $BestTraj = (A_1, \dots, A_n)$ ;

要求  $BestTraj$  中各臂构型关节角度总体变化量值最小 (即轨迹平滑);隐含其中相邻臂构型关节角度变化量值极小 (即臂构型间转换柔顺)

(a)重复执行 (3), 获取一初步合适轨迹  $InitSuitTraj = (A_{j_1}, \dots, A_{j_n})$ ;

由初步合适轨迹构成一初始轨迹群体  $OldTrajPop$  (规模为  $TrajPopSize$ );

$OldTrajPop = \{InitSuitTraj, \dots, InitSuitTraj_{TrajPopSize}\}$ .

(b)计算  $OldTrajPop$  中每一轨迹  $OldTraj$  的适值: ( $j = 1, \dots, TrajPopSize$ )

$OldTrajFit = 100 / (J_0 + J_1 + J_2)$

其中:  $J_0 = \|D(0)\|_{F_0}^2 + \|D(T)\|_{F_T}^2$ ,  $J_1 = \int_0^T \|D(t)\|_{\dot{c}}^2 dt$ ,  $J_2 = \int_0^T \sum_{i=1}^5 \|\Delta A_i(t)\|_{\dot{h}_i}^2 dt$  选

出其中适值最大的轨变  $OldTrajFit_{max} = OldTrajFit$

(c)基于  $OldTrajPop$  重组轨变,构成新的轨迹群体  $NewTrajPop$  重组算子包括概率正比于轨迹适值的繁殖、相似交叉及臂构型变异,还包括增加和减少算子 (分别在曲率较大/小的轨迹段增/减臂构型), 并采用最佳个体世袭策略推进优化进程。采用结构层次编码,内层为关节角度量值、外层为臂构型子结构

(d)类似于 (b) 计算  $NewTrajPop$  中每一轨迹的适值,并选出其中适值最大的轨迹  $NewTrajFit_{max} = NewTrajFit$

(e)在允许没有进展的迭代次数之内 (进展指  $NewBestFit > OldBestFit$ ),

$OldTrajPop \rightarrow NewTrajPop$   $OldTrajFit_{max} = NewTrajFit_{max}$ ; 返回 (b) 重复执行。

(f)获取最优轨变  $BestTraj = (A_1, \dots, A_n)$ ; 退出高层优化

## 4 结论

本文采用进化计算思想研制机器人轨迹规划系统 RTP-1 提出多层次动态结构化编码方案,利用低中高三层进化算法分别优化距离、路径和关节角度偏差,基于多层综合优化策略解决多目标多约束工程优化问题,建立了次序相关问题求解的通用框架。在进化算法中,利用拉马克效应加快轨迹规划速度。在 RM-501 机械手上实现的任意空间直线和空间曲线轨迹规划具有良好的鲁棒性,规划轨迹的相邻臂构型间具有良好的柔顺性,规划轨迹的臂构型序列具有良好的平滑性。本文所采用的机器人轨迹规划方法具有通用性和实用性,可推广应用于各种动力学系统的研制。

## 参考文献

- 1 Holland J.H. A Adaptation in Natural and Artificial Systems University of Michigan Press 1975 1992
- 2 Yuval Davidor Genetic Algorithms and Robotics World Scientific Press 1990