

文章编号 1004-924X(2001)04-0334-05

遗传算法及其在机器人控制中的应用

徐小云, 颜国正

(上海交通大学电子信息学院, 上海 200030)

摘要:遗传算法是建立在模拟自然界生命进化机制基础上的一种新型搜索和优化方法。本文介绍了遗传算法的概念、基本原理及其优点,讨论了它在机器人控制领域中的应用。并指出了遗传算法存在的问题和在机器人控制中的未来发展方向。

关键词:遗传算法; 机器人控制; 步态优化; 路径规划

中图分类号:TP242 **文献标识码:**A

1 引言

遗传算法(Genetic Algorithm,简称GA)是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机化的搜索算法,它将“适者生存”这一基本的达尔文进化理论引入串结构,并且在串之间进行有组织但又随机的信息交换,伴随着算法的进行,优良的品质被逐渐保留并加以组合,从而不断产生出更佳的个体,也就是不断地接近于最优解。

2 遗传算法的工作原理和实现步骤

2.1 遗传算法的工作原理^[1]

遗传算法的基本思想来源于达尔文(Darwin)的进化论和门德尔(Mendel)的遗传学说,它是以生物进化的高度抽象模型为基础的自适应搜索策略,基于自然选择和自然遗传这种生物进化机制,把待优化问题的解的搜索空间映射为遗传空间,把每一可能的解编码为一个称为染色体的二进制串(编码的方法很多,如:二进制编码;浮点数编码;参数动态编码;有序串编码),染色体的每一位称为基因,每个染色体(对应一个个体)代表一个解,遗传算法首先随机地产生若干代表优化问题候选解的一个群体,按照预先根据目标函数确定的适应度函数计算群体中各个个体对问题环境的适应度,从而对群体中的每个成员进行评估,然后根据每个个体的适应度对各个个体所对应的染色体进行选择,抑制适应度低的染色体,继承适应度

高的染色体,然后利用遗传操作符(交叉,变异等)对群体中的个体进行遗传操作,产生进化了的新一代群体。如此反复操作,一代一代不断地向更优解的方向进化,最后得到满足某种收敛条件的最适应问题环境的群体,从而获得问题的最优解,其工作原理如图1所示。

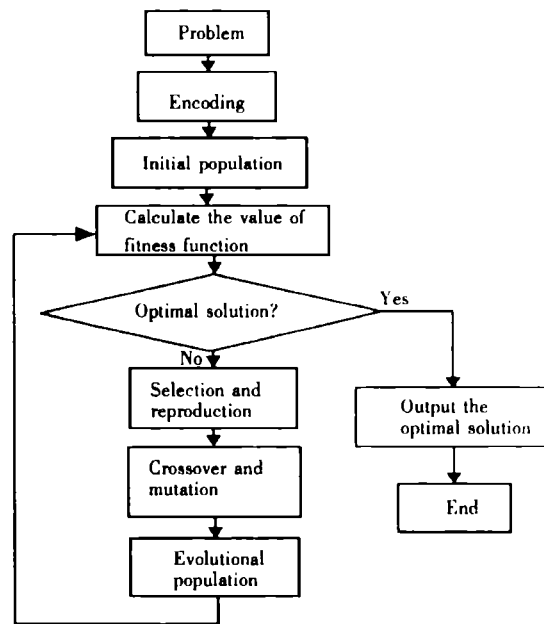


Fig.1 Functional diagram of genetic algorithm

2.2 遗传算法的实现步骤

遗传算法的主要实现步骤如下:

(1)问题的表示

对于一个实际的待优化的问题,要根据具体问题确定待寻优的参数以及评价解的优劣程度的适应度函数,从而使问题适于遗传算法进行操作。

(2)选择待寻优参数的编码方式和编码

编码是连续问题与算法的桥梁。选择合适的强有力的编码表达方式是遗传算法的关键,根据所选择的编码方式,将待优化的问题的所有参变量编码成对应的子串,再将各个子串首尾联接成一定长度的串(设串长为 L),即染色体,每个串代表解空间中的一个解。不同的编码方式对待优化问题的求解精度和算法的收敛速度有一定的影响。二进制编码对于数值优化问题存在着精度不高的缺点,参数动态编码^[2](DPE)是一种提高遗传算法精度的新的编码方式,但是对于非线性强的多模型优化问题,DPE 性能不佳,浮点数编码^[3]具有精度高、便于大空间搜索的优点。目前最常用的编码方式主要是二进制编码。

(3)产生初始群体

选择一个整数 N 作为群体的规模参数,随机生成解空间的 N 个初始个体作为初始群体,代表待优化问题的一些可能解。遗传算法就是从这一初始群体出发,通过遗传操作模拟进化过程,最后获得问题的最优解。当然对于有些问题,具有某些先验知识的情况,可以首先将这些先验知识转变为必须满足的一组要求,然后在满足这些要求的解中再随机地选取样本,这样选择初始群体可以使遗传算法更快地收敛到最优解。

(4)计算适应度函数值

计算适应度函数值可以看作是遗传算法与优化问题之间的一个接口。遗传算法评价一个解的好坏,不是取决于它的解的结构,而是取决于相应于该解的适应度函数值。适应度函数反映了个体对问题环境适应能力的强弱,是个体竞争的测度,它可以很好地控制个体生存的机会。

(5)选择、复制

一般采用与适应度函数值成比例的概率方法,个体适应度函数值越高,其被选择并复制的机会也就越多,选择复制体现了“适者生存”的自然法则。选择的目的是从群体中选出繁殖后代的双亲,复制则保留了父代的良好基因。

(6)交叉

交叉是非常重要的遗传算子。交叉操作可以分为如下两个步骤,第一步是将新复制产生的个体随机地两两匹配,第二步是进行交叉操作。具体过程如下:设串的长度为 L ,则串的第 L 个数字位之间的空隙标记为 $1, 2, \dots, L - 1$ 。随机地从 $[1,$

$L - 1]$ 中选取一个整数位置 k ,将两个父母串中从位置 k 到串末尾的子串互相交换,从而形成两个新个体。这两个新个体分别组合了其父辈个体的特性,产生了新的基因组合。图 2 是交叉操作示意图。

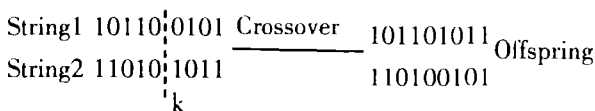


Fig.2 Sketch map of crossover

(7)变异

首先在群体中随机地选择一个个体,对于选中的个体以一定的概率随机地改变串上的某一位的值,以二进制编码为例,图 3 是变异操作示意图。

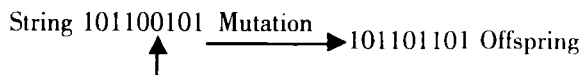


Fig.3 Sketch map of mutation

单靠变异操作一般不能使问题求解取得进展,因为变异发生的概率很小,但是变异能起到恢复丢失的遗传信息生成新的遗传信息的作用,从而保持群体中个体的多样性,能有效地防止遗传算法的过早收敛。

(8)遗传算法的终止

遗传算法的反复执行(4)~(7)步,直至满足某个收敛准则,搜索到问题的最优解。收敛准则一般有:①遗传算法找到能接受的优秀个体(最优解);②遗传算法已经进化了事先预定的最大代数;③在事先预定的代数内最优秀个体的适应度函数值无改进;④最优秀个体占群体的比例已经达到事先规定的比例。

3 遗传算法的特点

遗传算法与其他传统的寻优算法相比,其优点是遗传算法的鲁棒性能比较好。

解析法寻优一般可以分为间接法和直接法。间接法是通过让目标函数的梯度为零,进而求解一组非线性方程来寻求局部最优解。直接法是按照梯度信息最陡的方向逐次运动来寻求局部最优解,它即为通常所说的爬山法。它们的主要缺点

是:一是它们只能寻找局部最优解而非全局最优解;二是它们要求目标函数连续可微。

枚举法是在有限的或离散化的无限搜索空间中比较每一点的目标函数值,求得全局最优解。它可以克服解析法的两个缺点,但是其最大的缺点是计算效率太低,对于一个实际问题,常常由于搜索空间太大而不可能将所有的情况都搜索到。

遗传算法和传统的寻优算法相比,其主要的本质差别有以下几点:

(1)遗传算法在寻优过程中操作的对象是由参数编码后所形成的染色体串,而不是参数本身。也就是说遗传算法不受问题性质(如连续、可微、凸性等)的限制,可直接对集合、队列、树、图等结构对象进行操作,这使得遗传算法具有非常广泛的应用领域。

(2)遗传算法是从解空间中一群点开始并行操作,而不是从一个点开始。也就是说遗传算法同时对空间中不同的区域进行采样,并构成不断进化的群体序列,可以有效地防止搜索过程陷入局部最优解,因此它具有较大的可能求得全局最优解。

(3)遗传算法使用概率的转变规则而不是确定性规则来指导其搜索空间,利用概率作为一种工具来启发地搜索,有明确的搜索方向,比传统的寻优算法有更高的搜索效率。

(4)遗传算法具有隐含并行性的特点。所谓隐含并行性是指遗传算法在问题的搜索空间中可以使用相对较少的串来检验表示数量极大的区域的特性。这使得遗传算法易于采用并行机制作并行高速运算,大大地提高了计算速度。隐含并行性是遗传算法优于其他传统算法的关键所在。

(5)遗传算法对于所求解问题的依赖性较小。遗传算法是通过所求问题的适应度函数值这一唯一信息来进行搜索求解的,而不象其他传统寻优算法需要一些辅助信息,一旦所需的信息不存在,这些方法就会失败而无法执行。因此从这个意义上说遗传算法所能处理的问题非常广泛。

(6)遗传算法与传统寻优算法相比更适合于大规模复杂问题的优化。

4 遗传算法在机器人控制中的应用

4.1 步行机器人的步态优化^[4]

步行机器人是一个多变量、强耦合、非线性和变结构的复杂动力学系统。机器人的动态步行是一个非常复杂的控制问题,常规的步态设计过程包括对人类步态进行繁琐的分析,进而针对步行机器人的步态进行仔细的规划及测试。这种分析方法非常费时而且常常是靠经验和直觉确定的,所采用的分析模型往往都是线性化了的模型,其结果并非是最优解。如果对步行机器人的步态有特殊要求,比如要求步行机器人适应不同的步行速度、步幅、地面倾斜的前提下,能够以能量消耗最低的方式行走,常规的步态设计方法就无能为力,可行的方法就是采用遗传算法。遗传算法可在一定的约束条件下(步行速度、步幅等等)建立合适的适应度函数,将步态优化问题转化为参数搜索问题,由于它具有隐含并行性,适于非线性问题,因此可以很容易地得到在不同的约束条件下的最优步态。

4.2 机器人关节空间最优运动规划问题(OMPJS问题)

机器人关节空间最优运动规划问题是一个具有实际意义的挑战性问题。它主要有以下两方面的困难:首先它需要可靠和通用的方法来处理众多的运动学、动力学和控制约束问题。其次它需要一般化和高效的算法在非常庞大的轨迹空间构造或搜索一组最优轨迹。Kahn 和 Roth^[5]曾用最优控制理论研究了该问题,但是由于最优控制理论不能求解一组带有许多约束的高度耦合、高度非线性的微分方程而不得不线性化机器人臂的动力学模型,因而其结果并非是最优运动解。Sahar 和 Hollerbach^[6]对关节空间进行网格化,用图搜索法寻找最优轨迹,并用动态时标算法考虑力矩约束,但这种方法面临组合爆炸和轨迹速度不连续的困境。而采用遗传算法来处理带运动学、动力学和控制约束的 OMPJS 问题可以在庞大的轨迹空间中搜索出最优的运动轨迹,其轨迹速度是连续的。

4.3 多移动机器人的协调路径规划^[7]

机器人路径规划是指在其工作空间中,为机器人完成某一给定任务提供一条安全、高效的运动路径。在实际应用中往往要选择一条在一定准则下的最优路径,常用的准则有:所行走的路径长度最短、消耗能量最少或所使用的时间最短等。机器人路径规划问题可建模为一个有约束的优化问题。为寻求较优的行走路线,人们提出了路径

规划的可视图法、人工势场法等。可视图法搜索路径的算法复杂、效率不高;人工势场法有可能产生极小路径点,使得机器人停滞不前,从全局上把握不了路径的质量,而且多移动机器人的路径规划还要考虑各个机器人之间的协调无碰撞问题。因此传统的路径规划方法显得无能为力。文献[7]对机器人的工作空间采用多路径点链接图进行建模,在此基础上先使用图论中的成熟算法粗寻出可选路径,然后再使用遗传算法来调整路径点,逐步得到较优的行走路径。文献[7]采用二进制的路径编码方法,加上适当的解码变换处理,直接利用基本遗传算法的有关成果有效地解决了复杂规划空间下的多机器人路径规划问题。

4.4 机器人运动学逆解的求解^[8-9]

机器人运动学逆解是正解的反过程,它是根据机器人末端执行件的运动轨迹,求解机器人各关节的运动参数。机器人运动学逆解在机器人学中占有非常重要的地位,它直接关系到机器人的运动分析、离线编程、轨迹规划等问题。随着机器人应用范围的扩展,很多场合要求对机器人运动学进行在线逆解,对于一些简单结构的机械手,可以很方便地得到运动学的逆解,但是在很多情况下,机器人的结构比较复杂,传统的基于代数求解的方法和数值算法很难满足在线求解的要求。基于代数求解的方法主要是特征多项式连续法^[11]和消去法^[12],这种方法比较复杂,一般只适用于六自由度机械手问题。数值算法可以分为直接解法和间接解法,直接解法包括牛顿法和牛顿-拉普森法^[13],这种算法如果雅克比矩阵为奇异或者初始点不是充分接近目标点,则问题不可解。间接解法是基于优化的方法,主要包括 CCD 法、BFS 法等。这种解法虽然具有全局收敛的特性和比较快的收敛速度,但是距离实时逆解的要求还比较远。文献[8-9]采用了遗传算法,由于遗传算法对目标函数的要求较少,且具有“记忆”搜索性和隐含并行处理性,这种算法不仅稳定,而且比较简单,对于机器人运动学逆解的求解问题可以保证解的最优性和快速收敛性,具有较高的计算效率,使在线求解机器人运动学逆解成为可能,它可以用于机器人连续轨迹的跟踪问题,为实现机器人的智能轨迹规划提供了可能。

4.5 其它方面的应用

遗传算法可以应用于细胞机器人系统的结构

优化和行为协调。细胞机器人系统是分散、分层的自重构机器人系统,是一个非常复杂的高度非线性的系统,几乎不可能对它进行准确的建模。Ueyama 和 Fukuda^[10]等利用遗传算法适合于大规模复杂问题的优化的特点,研究了细胞机器人系统的结构优化、运动规划以及行为协调等。

还可以应用遗传算法对模糊控制、神经网络控制和模糊——神经网络控制进行优化设计,即利用遗传算法来优化模糊规则数、隶属函数形状以及神经网络的各连接权值、学习参数和网络的拓朴结构等,从而更有效地用于对机器人的控制,这已经成为遗传算法应用于机器人控制中的比较活跃的领域。

5 结 束 语

遗传算法在机器人控制领域的应用还很有限,不管是其理论方面还是应用实践方面都还有许多问题亟待解决,主要有:

(1)强有力的编码表达方式是遗传算法应用深入的关键,由于机器人控制领域的问题多种多样,而且每个问题所适用的编码表达方式是不同的,因此解决遗传算法的编码表达方式就成为比较重要的研究课题。

(2)遗传算法中的各个参数对解的影响。例如编码长度、群体大小、交叉概率、变异概率对解都有一定的影响。其影响程度如何,怎样确定最佳参数等等,这方面的许多工作尚须进一步深入研究。

(3)遗传算法和其他控制技术的结合问题。特别是如何利用机器人控制领域的相关知识和经验来指导遗传算法的搜索过程是一项很有意义的工作。

总之遗传算法不是一种单纯的优化算法,也不是传统的确定性的计算工具,而是一种以进化思想为基础的全新的优化算法,是解决大规模复杂问题的有力工具。尤其是对于机器人这个高度复杂、强耦合的难以精确建模的非线性系统,其求解不能(也不可能)是确定性的,可以将它类比为生物体,运用遗传算法对机器人的结构、运动行为等进行规划和协调。它特别适合用遗传算法的概率转变规则来启发式地寻找最优解。随着遗传算法理论的不深入和日趋完善,遗传算法将在机

器人控制中得到越来越广泛的应用,特别是遗传算法和模糊控制、神经网络控制相结合,构成了一个新的智能控制方法,为机器人学的研究开辟了一个广阔的领域,必将对智能机器人的发展起到一个巨大的推动作用。

参考文献:

- [1] 米凯利维茨 Z. 演化程序——遗传算法和数据编码的结合[M]. 北京:科学技术出版社,2000.
- [2] Schraudolph N N, Belew R K. Dynamic parameter encoding for genetic algorithms[J]. *Machine Learning*, 1992,9:9 - 21.
- [3] Goldberg D E. Real-coded genetic algorithm, virtual alphabets and blocking[J]. *Complex Systems*, 1991,5:139 - 167.
- [4] Cheng M Y, Lin C S. Genetic algorithm for control design of biped locomotion[J]. *Journal of Robotic Systems*, 1997,14(5):365 - 373.
- [5] Kahn M E, Roth B. The near-minimum-time control of open-loop articulated kinematic chains[J]. *J. Dynamic System, Measurement and Control* 1971,93:164 - 172.
- [6] Sahar G, Hollerbach J M. Planning of minimum-time trajectories for robot rms[A]. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation [C]*, 1985,751 - 758.
- [7] 周明,孙树栋,彭炎午. 基于遗传算法的多机器人系统集中协调式路径规划[J]. *航空学报*, 2000,21(2):146 - 149.
- [8] 刘永超,黄玉美,等. 基于遗传算法的机器人运动学逆解[J]. *机器人*, 1998,20(6):421 - 426.
- [9] Parker J K, Goldberg D E. Inverse kinematics of redundant robots using genetic algorithms[A]. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation [C]*. 1989,271 - 275.
- [10] Ueyama T, Fukuda T. Knowledge acquisition and distributed decision making[A]. *IEEE Conf. Robotics and Automation [C]*. 1992,167 - 172.
- [11] Wamper C, Morgan A, Sommese A. Numerical continuation methods for solving polynomial systems arising in kinematics[J]. *ASME J. Mech. Design*, 1990,112:59 - 68.
- [12] Zhao Xinhua. A successive approximation algorithm for the inverse position analysis of serial manipulator[J]. *Robotica*, 1999,17:487 - 489.
- [13] Angeles J. On the numerical solution for the inverse kinematics problem[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1985,4(2):21 - 37.

Genetic algorithm and its application in robot control

XU Xiao-yun, YAN Guo-zheng

(*School of Electronic Information, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China*)

Abstract: Genetic algorithm (GA) is a parameter searching and optimization technique based on emulating the evolutionary process of the nature. The paper introduces the basic concept, principles, virtues of genetic algorithm, and some application examples in robot control in detail. The authors also point out some existent problems of genetic algorithm and the future research direction in robot control.

Key words: genetic algorithm, robot control; gait optimization; path planning

作者简介:徐小云(1974-),男,浙江人,上海交通大学电子信息学院在读博士生,研究方向:特种机器人,人工智能领域
颜国正(1961-),男,湖南人,上海交通大学电子信息学院博士生导师,国家 863 计划自动化领域智能机器人主题专业专家,电子信息学院副院长,研究方向:微型机器人,特种机器人,人工智能领域。