

doi: 10.7690/bgzd.2014.01.021

粒子群优化算法及其在机器人技术中的应用

程哲^{1,2}, 王伟², 谢广明², 罗文广¹

(1. 广西科技大学电气与信息工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 北京大学工学院, 北京 100871)

摘要: 基于粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法的良好性能, 已经在多个领域被广泛应用, 主要综述 PSO 算法在机器人领域中的应用情况以及发展前景。首先介绍 PSO 算法的特点, 对现有 PSO 算法在机器人领域中的应用方法进行归类, 分析每种应用的优缺点, 并针对存在的问题提出改进意见。基于以上对比分析, 提出了 PSO 算法在该领域进一步的发展方向。

关键词: 粒子群优化; 机器人技术; 智能优化算法; 应用

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Application in Robotics

Cheng Zhe^{1,2}, Wang Wei², Xie Guangming², Luo Wenguang¹

(1. College of Electric & Information Engineering, Guangxi University of Science & Technology, Liuzhou 545006, China;

2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Because of its great performance, particle swarm optimization (PSO) algorithm has been widely used in many fields. The paper mainly introduces application situation and development foreground of PSO algorithm in robot field. At first, introduce features of PSO algorithm, then classify the applications in the field of robotics, analyze the advantage and disadvantage of each application, and give the modification opinion. Based on these analysis, the direction of future development and application prospect are discussed.

Keywords: particle swarm optimization; robotics; intelligent optimization algorithms; application

0 引言

粒子群算法基于早期的 Boids 模型^[1], 由 Craig W. Reynolds 建立, 最初是为了图形化模拟鸟群运动而设计的。但由于模型太过简单而且远离了真实情况, Heppner 对该模型进行了一些改进, 提出了新的“谷地”模型, 用来描述鸟类的觅食行为。受此模型的启发, 并通过不断的试验和试错, J. Kennedy 和 R. C. Eberhart 于 1995 年提出了粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO)^[2-3]的最初版本。

由于 PSO 算法具有概念明确、算法简单、容易编程实现等特点。在短短几年内, PSO 算法就获得了很大的发展, 并在诸多领域得到了广泛应用。而 PSO 在机器人领域的运用主要体现在以下几方面:

1) 对机器人的各种性能和参数进行优化; 2) 对机器人的运动路径进行规划; 3) 在机器人群体控制中的运用; 4) 在机器人其他方面的综合运用。笔者对 PSO 在机器人领域的运用进行了详细的分类, 并对每种运用都作出了分析和提出自己的见解, 还对未

来可能的发展方向进行了分析, 为今后 PSO 在机器人上的运用提供了思路和方法。

1 PSO 算法的标准版本

PSO 来源于对“谷地”模型的改进, 用来图形化描述鸟群的觅食行为。人们通过观察动物群体的行为发现, 群体中的信息共享有利于在演化中获得优势, 并将这种信息共享作为开发 PSO 算法的基础。通过加入速度匹配, 根据距离的加速, 消除不必要的变量后推广到多维空间, 再通过不断的实验试错, 最终形成了 PSO 的最初版本。但是原版 PSO 算法无法达到很好的搜索效果, 之后, 由 Shi 等^[4]对原始版本的 PSO 算法进行改进, 加入了惯性权重 ω 来更好地完成搜索过程, 形成了当前的标准版本 PSO 算法。

1.1 算法原理

PSO 算法是基于种群的一种演化算法, 根据个体对环境的适应度来决定个体是否能移动到好的区域, 但是它又不像其他演化算法那样对每个个体使

收稿日期: 2013-08-09; 修回日期: 2013-09-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(10972003); 广西汽车零部件先进设计制造重点实验室开放基金重点项目(2012KFZD03)

作者简介: 程哲(1987—), 男, 湖北人, 硕士, 从事水下智能机器人研究。

用演化算子，而是把个体当成 D 维空间中的一个没有体积、没有质量的微粒，并给予每个粒子初始的位置和速度。粒子会在搜索空间中以一定的速度飞行，这个速度是根据它自身的飞行经验以及整个群体中其他个体的飞行经验来决定的。此时，笔者将第 i 个粒子表示为 $X_i(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iD})$ ，它所经历过的最优位置（有最好的 Fitness，即适应值）记为 $P_i(p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{iD})$ ，也称为 P_{best} ，另外，在整个种群中所有微粒所经过的最好位置称为 P_g ，也称为 g_{best} 。第 i 个粒子的速度用 $v_i(v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{iD})$ 表示。则每一代的 D 维变量根据以下方程进行迭代：

$$v_i^{t+1} = v_i^t + \varphi_1 U_1^t (pb_i^t - x_i^t) + \varphi_2 U_2^t (gb^t - x_i^t) \quad (1)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (2)$$

其中： φ_1 、 φ_2 分别被称为“认知学习因子”和“社会学习因子”，一般取值为 2；而 U_1^t 、 U_2^t 为 2 个在 0~1 之间的随机数^[2]。

式 (1) 中第一部分为微粒上次迭代的速度；第二部分被称为“认知(cognition)”部分，代表的是微粒本身的状态对其速度的影响；第三部分为“社会(social)”部分，表示各粒子之间信息共享，反映了种群中其他粒子对单一个体的影响。

1.2 算法流程

PSO 标准算法的迭代过程如下：

1) 初始化一定数量的粒子(群体规模 m 根据需求选取)，并为它们随机分配位置和初速度；

2) 根据研究对象的具体模型，评价每个粒子的 Fitness，即粒子的适应度；

3) 对于每个粒子，将其 Fitness 与其经历过的最优位置 (P_{best}) 的 Fitness 进行比较，如果结果较之前的个体最优值好，则更新当前的最优位置为 P_{best} (在第零代中，各粒子的初始位置就设置成为其最优位置)；

4) 对于每个粒子，将其 Fitness 与全局中其他粒子所经历的最优位置 (g_{best}) 的 Fitness 进行比较，如果结果较之前的全局最优值好，则更新当前的最优位置为全局最优 g_{best} (在第零代中，所有粒子的初始位置的最优位置被设置为种群的全局最优值)；

5) 利用式 (1) 进行速度更新，得到下一代各粒子的速度，再利用式 (2) 更新每个粒子位置，得到新一代粒子；

6) 如果没有达到结束的条件，则返回第二部继续进行迭代，直到满足停止条件。

2 PSO 算法的研究现状和发展趋势

目前，对 PSO 算法的研究主要围绕 3 个方面展开：PSO 算法的基础研究、PSO 算法的改进研究、PSO 算法的扩展研究。PSO 基础研究主要是对算法的原理方面的研究，即研究算法的收敛性、鲁棒性以及收敛速度等。PSO 的改进研究集中在改进算法的某方面的特性，如算法的收敛速度、搜索能力和适用性等。PSO 的扩展研究主要是针对基本 PSO 一直未能有效解决的离散和组合优化，以及高维多目标优化问题。

2.1 PSO 基础研究

对于 PSO 算法的基础研究主要集中在算法的原理验证和证明方面，对粒子行为进行分析最早是由 Shi 等人给出的，他在初始版本的基础上加入了惯性权重 ω 的概念，速度迭代公式变为如下形式：

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + \varphi_1 U_1^t (pb_i^t - x_i^t) + \varphi_2 U_2^t (gb^t - x_i^t)$$

惯性权重的加入相对于初始版本来说较复杂程度并没有太大的增加，但是却在很大程度上提升了算法的收敛性能，因而被广泛使用^[4]。

此外，还有 Clerc 对 PSO 算法的稳定性进行的研究^[5]，根据对公式的简化提出了一个简单的二阶线性系统；以及 Kennedy 对性能的研究，他系统地讨论了各种拓扑结构对 PSO 算法的性能影响，对理解 PSO 结构与性能之间的关系提供了一定的理论依据^[6]；Blackwell 也针对 PSO 中多样性缺失的速度进行了实验验证和理论分析^[7]；Jiang 研究了 PSO 算法中惯性权重和学习因子 φ_1 、 φ_2 对于算法收敛性的影响情况^[8]。

目前，针对 PSO 基础研究方面的文献相对较少，而且也没有关于 PSO 收敛性和收敛速度评估方面的数学证明，还有待进一步完善。

2.2 PSO 改进研究

对 PSO 改进算法的研究主要集中在 2 个方面：一是研究各种改进 PSO 本身的算法，以达到提升性能的方法；二是将 PSO 算法同其他智能算法结合起来，用来改进算法的某方面的性能，达到取长补短的效果。

2.2.1 PSO 改进算法

文献 [9] 提出了一种自学习的 PSO 算法 (comprehensive learning particle swarm optimizer, CLPSO)，通过在标准的 PSO 算法基础上引入新的

学习策略,从而利用其他粒子的历史最优信息来对粒子的速度进行更新,这种策略能通过粒子的多样性,防止算法过早的收敛。 g_{best} 被认为是造成算法收敛过快的重要原因,因此在 CLPSO 中没有使用 P_{best} 和 g_{best} 进行速度更新,而是使用 P_{bestfi} 来进行速度更新,表示当前粒子是使用了哪一个粒子的最优参数。CLPSO 虽然在算法复杂度以及收敛时间上相对标准版 PSO 有一定的增加,但是其在解决局部极值方面能够取得很好的效果,能够更准确地搜索到系统最优值。

另外,文献[10]提出的局部操作的 PSO 算法能够很好地解决在迭代后期搜索结果无明显变化的问题;文献[11]提出一种基于 AI 算法的粒子群改进方法,即在原有速度和位置更新中加入繁殖和亚种群的概念,以提高收敛性;文献[12-13]提出了一种基于协同合作的 PSO,把种群分成了 K 个相互独立的子群,让这些子群分别在 D 维空间的不同维度上进行搜索,并讨论了种群规模对于搜索结果的影响。还有大量的研究者都将一些先进的理论引入到 PSO 中,使得 PSO 算法的效果得到很大的提升。

2.2.2 PSO 混合智能算法

PSO 混合智能算法将其他智能算法同 PSO 算法结合起来,以达到取长补短的作用。文献[14-15]介绍了一种遗传算法和 PSO 相结合的算法(genetic algorithm/particle swarm optimization, GA/PSO)。该算法将 PSO 和遗传算法结合起来进行种群繁殖,将遗传算法中的选择、交叉和变异加入到标准 PSO 算法的速度和位置更新中,形成了一种新型的速度推进平均交叉(velocity propelled averaged crossover, VPAC)的模式。该算法虽然牺牲了收敛速度,但是能够表现出很好的搜索能力和优化性能。

文献[16]提出了混沌理论同 PSO 算法结合的混沌 PSO 算法,通过在 PSO 中引入自适应惯性权重因子(adaptive inertia weight factor, AIWF)来有效地平衡 PSO 的搜索和开发能力。而且大大提升了搜索的效率和搜索质量。

除此之外,还有很多研究者将诸如自适应算法、免疫算法、模拟退火、禁忌搜索算法等一系列智能算法同 PSO 算法结合起来,形成了种类繁多的 PSO 混合算法。目前,针对 PSO 同其他智能算法相结合的研究是 PSO 研究的热门方向。

2.3 PSO 扩展研究

针对 PSO 算法一直没有解决的多目标优化问题,文献[17]提出了一种适合求解多目标的粒子群优化算法(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)。该算法并非采用扩展种群的方法来解决多目标优化问题。而是采用二级粒子库来指导其他粒子的飞行方向,同时还运用一种特殊的变异算法来丰富搜索能力。该算法在解决多目标优化问题方面有很强的适用性。

针对组合优化问题,文献[18]介绍了一种混合 PSO 算法,在 PSO 中加入变异和交叉操作,并且通过不同的变异和交叉方法的组合验证,最后得出一种最优的变异和交叉方法,同 PSO 结合,解决组合优化问题。虽然,该算法还处在研究的初级阶段,但是对于一些组合优化问题能够得到理想的结果。

现阶段在 PSO 扩展方面的研究开展还比较少,没有太多的文献可供参考,因此开拓这一领域的研究对于 PSO 算法的发展有着十分重要的意义。

3 PSO 在机器人领域的应用

由于 PSO 概念简单、易于实现,因而短期内得到很大发展,迅速得到了国际演化计算研究领域的认可,并在很多领域得到应用,如机器人领域、电力系统优化、TSP 问题、神经网络训练、数字电路优化、函数优化、交通事故探测、参数辨识等。

3.1 PSO 在机器人优化中的应用

PSO 在机器人优化中的应用主要有 2 个方面:一是优化机器人的运动步态;二是优化机器人的控制参数。不管是哪一种方法,其目的都是要优化机器人的运动状态,使其运动达到某一方面的要求。

文献[19-21]介绍了 PSO 算法在人形机器人步态优化上的运用。人形机器人的双足步态模式是由若干个参数控制的,为了实现全方位行走,对于不同的步态和行走方向需要设置不同的控制参数,并对这些参数进行优化。通过对加速步态的 Fitness 值进行测试,得到的优化参数能够广泛地适用于各种行走速度。实验的结果表明,利用 PSO 优化之后的行走速度较之前有明显提升,稳定性也有所提高。文献[22-23]针对 RoboCup 机器人大赛,运用 PSO 算法对比赛用机器狗进行了步态优化。通过将机器狗的各参数抽象成粒子,将机器狗的前进速度作为优化的 Fitness,再利用机器狗自身的处理器进行迭代计算,最后实现在线优化的功能,使其能更好地

完成比赛项目。优化结果显示,使用 PSO 优化比起使用遗传算法的优化方案效果更好,机器狗的前进速度得到了明显的提升。文献[24]同样是使用 PSO 算法对六足机器人的步态进行优化,不同的是这种优化是针对六只足共同进行的,而并非像前面文献中提到的优化方法那样,是针对的单足进行优化的。这样的好处在于通过神经网络控制六只足,能够让机器人达到一种自主进化的步态优化方式。

文献[25]提出利用 PSO 算法优化具有中枢模式发生器(central pattern generators, CPG)的机器鱼的运动。CPG 控制会产生有节奏的节律信号,来控制机器鱼每个关节的运动。PSO 算法就是针对这些控制参数进行优化的,将参数输入到 PSO 算法中进行迭代,最终找到游动性能最佳的一组参数,从而达到对机器鱼的运动优化。类似的,文献[26]采用 PSO 算法和 Powell 理论相结合的优化算法,对基于 CPG 控制模型的模块机器人进行了在线优化,目的是得出一组运动参数能让模块机器人在某一方向的移动速度达到最快,最终通过实验得出了一组十分理想的优化结果。在文献[27]中,同样采用 PSO 来优化机器人的 CPG 控制参数,不同之处在于该文章采用的是线性 CPG,并利用参数之间的耦合关系,利用 PSO 来优化控制参数的数量。文献[28]主要针对水下机器人,对基于模糊逻辑控制和 PID 控制结合的 S 面控制器进行优化,并利用改进 PSO 算法对其参数进行优化,来达到更好的控制效果。

3.2 PSO 在机器人路径规划中的应用

PSO 算法在机器人路径规划方面的研究较多,可供参考的文献也很多,而且大部分都是结合其他寻路方法来优化路径的。

文献[29-35]都是利用各种改进的 PSO 算法或者利用 PSO 算法和其他路径搜索方法结合的方式,来对机器人的行动路径进行规划,最后通过仿真手段来验证算法运用的效果是否符合要求。除文献[29]给出了在机器人上的实验结果外,其他文献都是从理论的角度得出路径规划的结果。

此外,文献[36]介绍了一种能够通过图像采集装置自主地拍摄周围环境的机器人,能够通过头部的图像采集器动态地捕获周围的环境,并且通过得到的模糊参数来控制自己的运动状态。笔者利用 PSO 算法对机器人的运动路径进行了规划。

3.3 PSO 在机器人群体控制中的应用

PSO 在机器人群体控制中的分类主要有:1) 机器人群体运动控制和编队控制;2) 机器人群体搜索控制;3) 其他群体控制。

文献[37-38]都是研究机器人群体运动控制的。文献[37]主要是设计一群移动机器人,这些机器人的运动优化是基于一种有速度限制的增广拉格朗日粒子群(augmented lagrangian particle swarm optimization with velocity limits, VL-ALPSO)优化算法的。通过这种算法来实现机器人之间的运动控制,使得他们不仅能够在运动过程中避免相互之间的碰撞,而且每个机器人能够完成搜索等功能。文献[38]基于 PSO 算法对机器人群体在未知环境的编队控制参数提供优化,使得多机器人群体能够在未知的环境运动构成中避免相互碰撞,而且能够保持一定的队形。文献[39]提出了一种利用 PSO 算法来控制机器人群体进行编队变换的控制方法。根据机器人的位置信息来构造函数,并且运用 PSO 算法对函数进行优化,优化结果用来控制每个机器人的方向,从而达到控制机器人编队的目的。

文献[40-41]介绍了 PSO 算法在机器人群体搜索目标中的运用。其中文献[40, 42]都是针对固定的目标进行搜索。对于固定的目标,将机器人群体中的每个机器人看成是种群中的一个粒子,他们能获得自身信息和周围其他同伴的搜索信息,利用 PSO 算法的原理来最终搜索到目标。文献[41]是 PSO 算法在机器人群体搜索气体源中的应用。和前 2 篇不同之处在于,烟羽在室内分布是不均匀的,有些地方浓度很大,使得寻找源头的难度大大增加。笔者利用的是基于概率适应度函数的粒子群优化(probability-fitness-function based particle swarm optimization, P-PSO),通过利用机器人个体来模拟粒子,以达到搜索源头的目的,并且通过仿真的方法验证了可行性。

文献[43]介绍了利用改进 PSO 算法对采集图像覆盖率进行的优化的方法,利用一群携带图像采集设备的机器蚂蚁进行图像采集,目的是利用 PSO 算法在最小覆盖率的情况下,采集到更广范围的图像,并且利用了 2 种改进的 PSO 算法分别进行了实验。

3.4 PSO 在机器人中的其他应用

PSO 算法在机器人领域的应用除了以上几种外还有很多。可以说,只要能够找到需要优化的 Fitness 值,就可以使用 PSO 算法进行优化。

文献[44]介绍了一种基于模糊神经网络的声控机器人,声音信息通过模糊神经网络后输出给机器人,用以控制机器人的运动。在此 PSO 算法被用来训练模糊神经网络的参数,通过 PSO 训练后能够得出更清晰的控制信号。

文献[45]利用 PSO 算法来进行足球机器人的动作选择控制。作者提出了一种基于 PSO 的动作选择算法,通过算法能够给出一个动作的合集,再根据赛场的具体情况为机器人分配任务,并且利用 PSO 算法来选择机器人相应的动作。

文献[46]给出了 PSO 算法在门牌识别机器人上的应用。控制算法通过 RBF 神经网络实现,在识别门牌的时候,机器人和门牌之间要保持一个合适的距离才能保证识别的效果,在此 PSO 算法就是用来优化机器人同门牌之间的合适距离。实验结果显示,利用 PSO 和 RBF 神经网络控制的方法能够得到很好的识别效果。

文献[47-48]提出一种利用 PSO 算法解决多自由度机器人的逆运动问题。逆运动问题在多自由度机器人中普遍存在,由于该问题没有封闭解或者没有解析解,所以处理起来有一定难度,而利用 PSO 算法去解决这类问题被认为是十分有效。

文献[49]运用一种粒子群-拟牛顿算法解决管道机器人的定位问题。作者首先推导出了定位模型的非线性方程,之后设计了基于粒子群优化-拟牛顿混合算法对非线性方程进行求解,提高了管道机器人的定位精度。

4 结论

随着人们对 PSO 算法的深入研究,该算法已经被大量运用于解决机器人研制中遇到的各种问题。在机器人的优化方面,PSO 能够起到很好的效果,但是目前只是针对运动参数进行优化,以达到在运动上的最优,忽视了其他方面的性能,如能耗的最优,或者能耗与运动的综合最优。

PSO 在路径规划方面的研究比较成熟,研究成果也比较丰富,但是主要还是结合其他的一些路径规划方法进行的;因此,在此方面的突破点主要还是在算法的改进上。

近年来,随着对多智能体和群体智能研究的兴起,PSO 在群个体控制以及群体运动优化方面的运用越来越多。目前,在这方面的研究相对较少,将

成为今后的主要研究方向。由于受到 PSO 算法基础研究完善程度的影响,首先要完善理论体系,提出合适的理论依据,才能在该方向取得成果,其难度和能够取得的成就都是很大的。

笔者主要介绍了 PSO 算法在机器人领域的应用。通过分类举例使读者能更好地了解目前 PSO 算法在各种机器人上的运用情况,并且结合 PSO 算法的理论研究和发展状况来说明该种运用的优缺点,以及今后在该领域的发展方向,为今后对 PSO 的研究和运用提供了理论基础和可行思路。

参考文献:

- [1] 李振宇. 基于 Boids 群聚模型的无人驾驶机群[C]. 中国力学学会2009学术大会论文集, 2009.
- [2] Kennedy, J., Eberhart R. Particle swarm optimization [C]//1995. Proceedings., IEEE International Conference on, American 1995: 1942-1948.
- [3] Eberhart, R., Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]//Micro Machine and Human Science, 1995. MHS '95, Proceedings of the Sixth International Symposium on, American 1995: 39-43.
- [4] Yuhui S, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer[C]. in Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on. American, 1998: 69-73.
- [5] Clerc, M., Kennedy J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, American, 2002, 6(1): 58-73.
- [6] Kennedy, J. Small worlds and mega-minds: effects of neighborhood topology on particle swarm performance[C]. Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on. American, 1999.
- [7] Blackwell, T. M., Bentley P. Don't push me! Collision-avoiding swarms[C]. Evolutionary Computation, 2002. CEC '02. Proceedings of the 2002 Congress on. American, 2002.
- [8] Jiang, Y., et al. A Modified Particle Swarm Optimization Algorithm[C]. Computational Intelligence and Security, 2006 International Conference on. 2006: 421-424.
- [9] Liang, J. J., et al. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 281-295.
- [10] Suganthan, P. N. Particle swarm optimiser with neighbourhood operator[C]. in Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on. 1999: 1962.
- [11] Supratid, I. M. A multi-subpopulation particle swarm optimization: a hybrid intelligent computing for function optimization[C]. in Natural Computation, 2007. ICNC 2007. Third International Conference on, 2007: 679-684.

- [12] Yassin, I.M., et al. Effect of swarm size parameter on Binary Particle Swarm optimization-based NARX structure selection[C]//Industrial Electronics and Applications (ISIEA), 2012 IEEE Symposium on, 2012: 219-223.
- [13] Van den Bergh, F, Engelbrecht A. P. Training product unit networks using cooperative particle swarm optimisers[C]. in Neural Networks, 2001. Proceedings. IJCNN '01. International Joint Conference on. 2001: 126-131.
- [14] Settles M, Soule T. Breeding swarms: A GA/PSO hybrid[C]. GECCO 2005: Genetic and Evolutionary Computation Conference, Vols 1 and 2, 2005: 161-168.
- [15] Dong, H. K. GA-PSO based vector control of indirect three phase induction motor[J]. Applied Soft Computing, 2007, 7(2): 601-611.
- [16] Bo, L., et al. Improved particle swarm optimization combined with chaos[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2005, 25(5): 1261-1271.
- [17] Coello, C., Pulido G. T., Lechuga M. S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.
- [18] 高尚, 等. 求解旅行商问题的混合粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2004(11): 1286-1289.
- [19] Niehaus, C., Rofer T., Laue T. Gait optimization on a humanoid robot using particle swarm optimization[C]// Proceedings of the Second Workshop on Humanoid Soccer Robots in conjunction with the. Germany, 2007: 330-440.
- [20] Kim, J. J., Choi T. Y., Lee J. J. Experience Repository based Particle Swarm Optimization and its Application to Biped Robot Walking[J]. NEW YORK: IEEE, 2008: 380-385.
- [21] 赵秋玲, 周亚丽, 张奇志. 双足机器人无源动态行走步态设计的粒子群优化算法[C]//2007年中国智能自动化会议. 中国甘肃兰州, 2007: 570-573.
- [22] Wang, Q., et al. Collaborative localization and gait optimization of SharPKUngfu team[J]. Robotic Soccer, Beijing, China, 2007: 549-574.
- [23] Wang, Q., et al. The 2006 sharPKUngfu team report[R]. Beijing: Peking University, 2006: 1-34.
- [24] Juang, C.F., Chang Y.C., Hsiao C.M. Evolving Gaits of a Hexapod Robot by Recurrent Neural Networks With Symbiotic Species-Based Particle Swarm Optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(7): 3110-3119.
- [25] In-Bae, J., et al. Particle Swarm Optimization-based Central Patter Generator for Robotic Fish Locomotion[C]//2011 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Republic of Korea, 2011: 152-157.
- [26] Wilhelm, F., et al. Online optimization for the locomotion of Roombots structures[J]. 2012: 1-30.
- [27] Chen, W., et al. CPG-based locomotion control of a robotic fish: Using linear oscillators and reducing control parameters via PSO[J]. International Journal of Innovative Computing, Information & Control, 2011, 7(7B): 4237-4249.
- [28] 唐旭东, 庞永杰, 万磊. 改进PSO算法在水下机器人S面运动控制参数整定中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009(1): 153-160.
- [29] Das Sharma, K., Chatterjee A., Rakshit A. A PSO-Lyapunov Hybrid Stable Adaptive Fuzzy Tracking Control Approach for Vision-Based Robot Navigation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(7): 1908-1914.
- [30] Hsien-I L, Yu-Cheng L. Minimum-Jerk Robot Joint Trajectory Using Particle Swarm Optimization[C]// Proceedings of the 2011 First International Conference on Robot, Vision and Signal Processing (RVSP 2011), Taiwan, 2011: 118-121.
- [31] Wang Y., Yu X. Research for the robot path planning control strategy based on the immune particle swarm optimization algorithm[C]//Proceedings of the 2012 Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA), China, 2012: 724-727.
- [32] Li, Q., et al. Path planning of mobile robots based on specialized genetic algorithm and improved particle swarm optimization[C]//2012 31st Chinese Control Conference (CCC 2012). Proceedings, China, 2012: 7204-7209.
- [33] 王仲民, 戴怡, 岳宏. 基于DFP与PSO混合算法的移动机器人路径规划[C]//2007年中国智能自动化会议. 中国甘肃兰州, 2007: 510-514.
- [34] 丁华胜, 王华忠. 基于PSO的人工势场法在移动机器人路径规划中的应用[J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2010(5): 727-731.
- [35] 蔡晓慧, 李艳君, 吴铁军. 基于PSO和滚动优化的不确定环境下移动机器人动态路径规划[J]. 科技通报, 2008(2): 260-265.
- [36] Hua-Ching, C., G. Dong-hui, F. Hsuan-Ming. Fuzzy Embedded Mobile Robot Systems Design through the Evolutionary PSO Learning Algorithm[J]. WSEAS Transactions on Systems, 2011, 10(8): 259-269.
- [37] Tang, Q. R., Eberhard P. A PSO-based algorithm designed for a swarm of mobile robots[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2011, 44(4): 483-498.
- [38] Qiang, L., Jiachen M., Qi Z. PSO-based parameters optimization of multi-robot formation navigation in unknown environment[C]//2012 10th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA 2012), China, 2012: 3571-3576.
- [39] 湛海燕, 曾建潮. 基于PSO的多机器人编队控制[J]. 太原科技大学学报, 2009(5): 383-386.
- [40] Prasetya, D. A., Yasuno T. Cooperative Control of Multiple Mobile Robot Using Particle Swarm Optimization For Tracking Two Passive Target[C]//2012 Proceedings of Sice Annual Conference (SICE), Japan, 2012: 1751-1754.