

地磁仿生导航的多目标进化搜索算法*

李红,刘明雍,刘坤

(西北工业大学航海学院,陕西西安 710072)

摘要:针对水下自主航行器地磁多参量多目标搜索的问题,提出一种基于磁趋势敏感的多目标进化搜索算法。在进化算法的结构下,利用地磁场参量与导航路径的约束关系,以磁趋势敏感作为后验评估准则,建立导航模型,使得地磁多分量伴随航行器的运动同时同地收敛至各自目标值,实现导航目的。通过与六边形路径搜索算法的仿真对比,验证了多目标进化搜索算法的有效性和优越性。

关键词:地磁仿生导航;多目标搜索;六边形路径搜索算法;进化算法

中图分类号:TP18 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)06-098-05

Multi-objective evolutionary search algorithm for geomagnetic bio-inspired navigation

LI Hong, LIU Mingyong, LIU Kun

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aiming to solve the search problem of geomagnetic multi-component and multi-objective, the multi-objective evolutionary search algorithm based on the magneto-taxis sensitivity was proposed for the autonomous underwater vehicles. Combined with the structure of the evolutionary algorithm, this method utilized the restrictive correlation between the geomagnetic components and the navigation path, and the magneto-taxis sensitivity was expressed as a posteriori assessment criteria to establish the navigation model. The geomagnetic multi-component converged to desired value along with the motion of the vehicle at the same time and place, thus realized the navigation goal. Compared with the hex-path searching algorithm, the effectiveness and advantages of the proposed algorithm were validated by the simulation experiments.

Key words: bio-inspired geomagnetic navigation; multi-objective search; hex-path searching algorithm; evolutionary algorithm

自然界中,动物借助磁场进行导航的现象普遍存在^[1],如:绿毛海龟巡游数万千米但到产卵时能准确回到其出生的海滩^[2-3];信鸽被以各种运输手段带至任意陌生的地方,放飞后能经数千千米安全、快速归巢^[4]。受生物界动物行为的启发,地磁导航技术在科学研究和工程实践中越发受到重视。目前应用较广的惯性导航系统存在着误差随时间累积的缺陷,而卫星导航系统存在信号易受干扰和无线信号在水中衰减过快的不足^[5]。地磁导航技术成为一种新的导航方式,能够弥补常用导航方式的不足。因此,地磁导航已成为研究热点。

利用地磁特征实现位置层面导航的研究相对于航向层面的研究较少,主要以地磁匹配导航为代表,其特点是利用实测地磁特征与先验地磁图进行相关匹配^[6],进而确定其所在位置,例如美国爱达荷大学研制的水下机器人地磁辅助导航系统^[7]、俄罗斯的SS-19地磁场等值线匹配系

统^[8]、日本宇都宫大学的车载地磁匹配导航系统^[9]等。然而,这些地磁匹配导航系统均依赖于磁测后所构建的地磁图,其系统对利用地磁数据构建的磁图完整度、精确度要求极高,需要大量密集的测点位置和测量数据^[10]。受地磁场缓慢时变、地磁异常、观测规模等因素的影响,先验地磁图的获取是地磁匹配导航的重要制约因素。从仿生导航的角度来看,地磁场是一个包含多个地磁特征量或者参量的多元场,每一个地磁特征量都有其自身的变化规律。因此,地磁仿生导航可以归结为地磁参量变化规律未知条件下,地磁多参量多目标搜索同时同地到达的问题。

对于多目标搜索的导航方法,其基础是地磁多参量能够确定运动体相对目标点的位置。但在无先验地磁图提供全局信息的情况下,实现多个参量的同时同地收敛实属困难。为此,可利用地磁变化的趋势性敏感来解决地磁多参量同时同地

* 收稿日期:2016-09-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51379176)

作者简介:李红(1985—),女,陕西杨凌人,博士研究生,E-mail:mydreamli_hong@126.com;

刘明雍(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:liumingyong@nwpu.edu.cn

收敛至各自目标值的问题。基于磁趋势的算法, Holland 和 Melhuish^[11] 依据真涡虫的运动行为提出基于 Z 形路径的搜索策略; Russell^[12] 提出六边形路径搜索策略,用以指导移动机器人寻找目标位置,弥补了 Z 形路径的缺陷。值得注意的是,文献[11-12]中的搜索算法本质上都是贪婪搜索,其在每一步选择中都采取在当前状态下最好或者最有利的选择。该算法使得机器人在地磁导航过程中容易陷入局部极小值,从而导致地磁目标位置搜索任务的失败。需要指出的是,国内外在此方面的研究甚少,主要集中在传统滤波框架下的导航方法研究^[13]。针对这一问题,文献[14]考虑地磁场多参量与导航单一路径之间存在的制约关系,提出了进化策略的导航方法。本文借鉴进化决策的观点,以磁趋势作为后验评价标准,构建多目标进化搜索算法。

1 问题描述

1.1 AUV 系统模型

在二维平面内,将水下自主航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)视为一个质点,其运动方程为:

$$\begin{cases} x_{t+1} = x_t + V_f \cdot \Delta T \cos\theta \\ y_{t+1} = y_t + V_f \cdot \Delta T \sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中, ΔT 表示采样周期, t 表示航行器运行的某一时刻, V_f 表示 AUV 的运动速度, θ 表示 AUV 的航向角。

1.2 基于地磁分量的导航搜索

地磁场包含多个地磁特征量,包括磁场三分量(地磁北向分量、地磁东向分量、地磁垂直分量)、地磁水平场强、磁场总场强、磁倾角、磁偏角^[14]。从仿生角度出发,生物运动行为具有对地磁场变化趋势性敏感的特性,因此,地磁仿生导航的过程可视为是地磁场多个特征参量从起始位置对目标位置的各个特征参量搜索收敛的过程^[15]。为此,本文建立多目标搜索过程中地磁参量及运动控制参数之间的约束关系:

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{B}, \boldsymbol{\theta}^k) = \sum_{i=1}^n f_i(\mathbf{B}) \\ t_i = f(\mathbf{B}_i^k, \mathbf{B}_i^t, \boldsymbol{\theta}^k) \end{cases} \quad (2)$$

其中: k 表示迭代步数(k 可取 $0, 1, 2, \dots, K$); $\mathbf{B} = (\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_n)$ 为地磁变量; $\boldsymbol{\theta}^k$ 为 AUV 当前运动控制参量; $F(\boldsymbol{\theta}^k)$ 为目标函数, $f(\cdot)$ 为目标函数的子函数; t_i 表征地磁参量与运动参数之间的制约关系; \mathbf{B}_i^k 为当前位置的地磁参量; \mathbf{B}_i^t 为目标位

置的地磁参量。

在多目标搜索过程中,要求所构建的目标函数收敛至预设的最终值,当不考虑外界环境干扰时,其搜索向量 $\boldsymbol{\theta}^k$ 能够收敛至较优向量 $\boldsymbol{\theta}^*$, 从而使得 $F(\boldsymbol{\theta}^k)$ 中各元素收敛至各自的最小值,即:

$$\sum_{k=0}^K F(\boldsymbol{\theta}^k) \rightarrow 0 \quad (3)$$

将既定目标位置的地磁特征参量 \mathbf{B}^t 与载体当前所处位置的地磁参量 \mathbf{B}^k 之间的差值作为导航搜索的反馈激励,其中第 i 个地磁特征参量的目标函数为:

$$f_i^k(\mathbf{B}) = (\mathbf{B}_i^t - \mathbf{B}_i^k)^2, i \in n \quad (4)$$

以地磁特征参量的收敛状态作为评价种群中样本性能好坏的指标,考虑到多个地磁特征参量之间的量级不等,故对其进行归一化处理,多目标函数 F 可表示为:

$$F(\boldsymbol{\theta}^k) = \sum_{i=1}^n \frac{f_i^k(\mathbf{B})}{f_i^0(\mathbf{B})} = \sum_{i=1}^n \frac{(\mathbf{B}_i^t - \mathbf{B}_i^k)^2}{(\mathbf{B}_i^t - \mathbf{B}_i^0)^2} \quad (5)$$

利用地磁场分布的变化特性,将导航搜索行为解作为种群样本,样本的更新过程伴随着每一步搜索的执行,从而得到真实解。

2 求解方法

进化算法(Evolutionary Algorithm, EA)是一种模拟自然界中生物进化过程的启发式搜索算法^[16]。本文利用进化策略获取航行器导航运动参数,依据运动结果进行后验评价,并对种群进行时序更新。伴随种群的进化,航行器依据磁趋势性搜索可靠的运动方向,最后引导其到达目标地点,实现地磁仿生导航。

搜索过程中进行一步一搜索,实现对目标函数的求解,旨在求解可达性问题。在此搜索过程中,将运动参数航向角作为种群样本,在导航搜索过程中不断实现对样本的进化,且进化过程只对当前执行的航向角样本进行更新操作。种群样本的不断更新表征导航搜索的趋势,同时可实现对全局唯一解的搜索。

地磁多目标进化搜索算法的具体实现步骤如下:

步骤 1: 初始化。给定 AUV 起始位置和终止位置的地磁参量 \mathbf{B}^0 和 \mathbf{B}^t 、设定 AUV 的运动速度、采样周期、终止范围以及多目标搜索算法的相关参数。在搜索进程中将航向角作为进化个体,其个体集合为:

$$\boldsymbol{\theta} = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m\}, m = 2\pi/\Delta\theta \quad (6)$$

式中, m 为个体空间中的个数, $\Delta\theta$ 为采样间隔。

种群空间由个体集合中的个体组成,种群空间表示为 $Q = \{\theta_j | j = 1, 2, \dots, N\}$, 其中 θ_j 表示种群的第 i 个个体, $\theta_j = \Delta\theta \times i, i \in [1, m], N$ 表示群体规模大小。如果取 $N = 50$, 即表示种群规模是 50, 种群空间由个体空间中的样本组成, 即:

$$S^{50} = \text{rand} \{ \theta_i \} \quad (7)$$

步骤 2: 随机选择动作。从种群空间中任意选取一个个体航向角 θ_j 作为 AUV 的动作操作, 在初始阶段, 每个样本被选择的概率为:

$$p(\theta_j) = 1/N \quad (8)$$

步骤 3: 种群样本的更新。AUV 行驶的当前位置是由前一时刻 AUV 的位置和航向角共同决定的, 搜索结果的好坏很大程度上是由所选取的航向角决定的。在种群中, 任意一个个体被选中, AUV 执行该行为操作, 且利用目标函数进行环境反馈, 以便实现种群中个体的更新。其中, 种群中的样本更新可根据以下规则进行:

1) 当逼近目标值的解 (即 $F(\theta^k) \leq F(\theta^{k-1})$) 时, 保留该个体, 则

$$\theta_i^k = \theta_i^{k-1} \quad (9)$$

2) 当远离目标值的解 (即 $F(\theta^k) > F(\theta^{k-1})$) 时, 对应一个个体的更新, 则

$$\theta_i = \Delta\theta \times i \quad (10)$$

步骤 4: 到达目标点的判断。若当前位置地磁特征参量的目标函数 $F(\theta^{k+1})$ 较小, 且在连续时间段内与上一时刻 $F(\theta^k)$ 相比均能满足式(11), 则转向步骤 5; 反之, 重复步骤 2 ~ 4, 直到满足终止条件。

$$\begin{cases} |F(\theta^{k+1}) - F(\theta^k)| < \varepsilon \\ F(\theta^{k+1}) < T \end{cases} \quad (11)$$

式中: ε 和 T 为目标函数的终止阈值。

步骤 5: 结束。

图 1 给出了地磁多参量多目标进化搜索算法的实现流程图, 可以看出该算法通过对样本的更新实现了对全局唯一解的搜索。

3 仿真验证

为了进一步验证所提算法的有效性, 调用 WMM2010 函数以便获得每一步迭代所需的地磁特征参量数据。根据 AUV 的运动学模型, 给定 AUV 的初始位置和目标位置, 对搜索算法进行仿真论证。地磁特征量有多个, 其相互关联, 但由于磁场 x 方向分量、 y 方向分量、磁场总强 F 在分布上变化差异性较大, 故在仿真中选取该三参量作为导航搜索的特征量。起始位置和目标位置的地磁参量值为: $B_x^s = 21\ 423\ \text{nT}, B_y^s = 5005\ \text{nT}, B_F^s =$

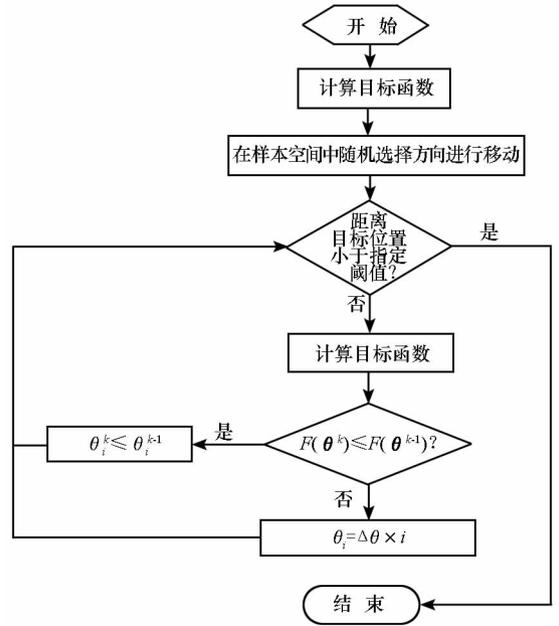


图 1 多目标进化算法流程图

Fig. 1 Flow diagram of the multi-objective evolutionary algorithm

$51\ 604\ \text{nT}; B_x^t = 27\ 065\ \text{nT}, B_y^t = 492\ \text{nT}, B_F^t = 41\ 613\ \text{nT}$ 。

仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Parameters used in simulation

符号	物理意义	数值(单位)
N	种群大小	50
$\Delta\theta$	采样间隔	30°
ΔT	采样周期	100 s
V_f	运动速度	5 m/s
L	运动步长	500 m
ε	终止范围	0.000 7
K	最大迭代步数	1500

为了体现所提算法的有效性与其搜索效率, 在此给出不同搜索方法的比较。

六边形搜索算法^[12]最初应用在气味源跟踪任务的研究中, 机器人根据气味浓度的趋向进行路径搜索, 试图逐步逼近气味源。本文将该算法应用于地磁导航的路径搜索过程中, 图 2 是机器人路径搜索示意图, 当机器人经由 $k-2, k-1$ 到达 k 点时, 存在沿着顺时针转 60° 去往 $k+1$ 点和沿着逆时针转 60° 去往 $k+1$ 点两种走法。借鉴 Russell 提出的六边形路径搜索算法用以抉择 $k+1$ 点去向的选择, 该算法流程如图 3 所示。

3.1 仿真结果对比

下面分别给出两种不同搜索策略下的导航搜索结果。图 4 中“□”表示 AUV 的起始位置, “▽”

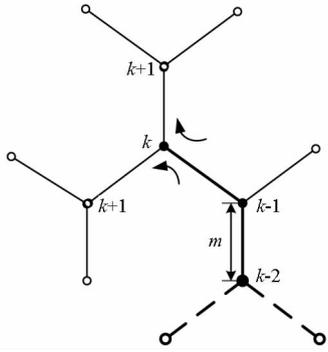


图2 六边形路径搜索策略示意图

Fig. 2 Sketch of the hex-path searching strategy

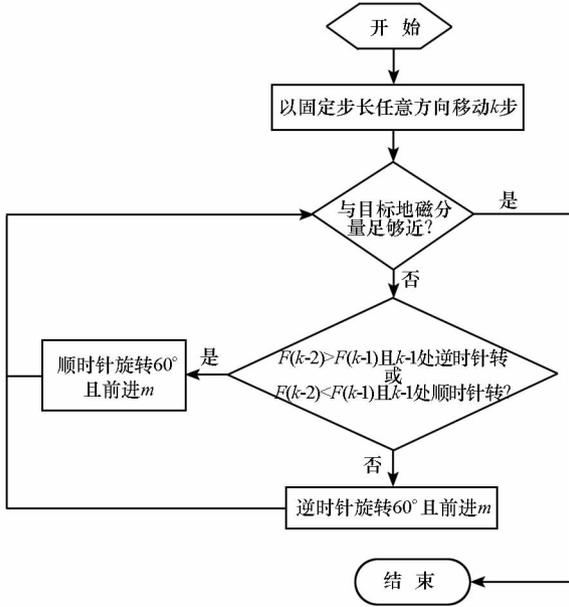


图3 六边形搜索算法流程图

Fig. 3 Flow diagram of the hex-path searching algorithm

表示 AUV 的终止位置。从图 4 仿真结果可知,两种搜索策略下的导航轨迹存在差异,六边形算法的搜索路径可视为“锯齿”形路径,而多目标进化

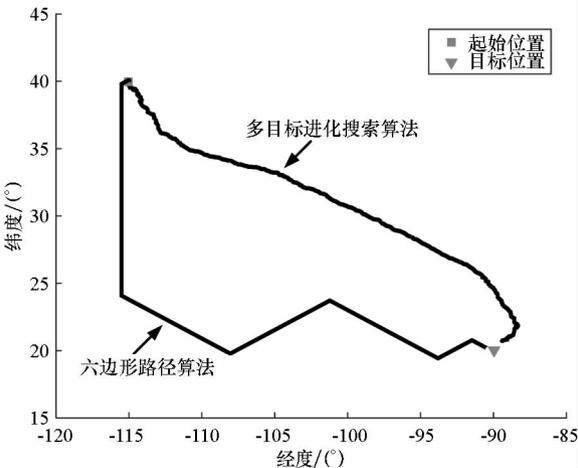


图4 两种搜索策略下的导航路径

Fig. 4 Geomagnetic navigation paths within two different searching strategies

算法的路径光滑性较好,即在实际应用过程中机器人的灵活机动性能更好地体现。

从图 5 可以看出,多目标进化算法所用迭代步数为 650 步,而六边形算法所用迭代步数为 1050 步。由此可见,六边形路径搜索算法的路径长于多目标进化算法,即多目标算法的收敛效率优于六边形算法。

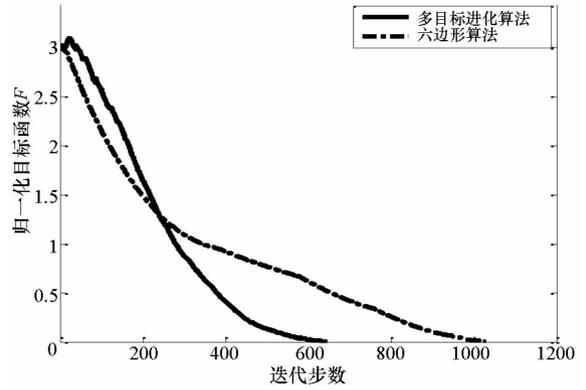


图5 两种算法下目标函数的收敛曲线

Fig. 5 Convergence curves of the objective function within two different algorithms

3.2 两种算法的鲁棒性对比

两种搜索算法的鲁棒性根据地磁三分量的收敛状态而定。如图 6 和图 7 所示,三条收敛曲线分别表示在六边形路径搜索算法和多目标进化算法下地磁三分量的归一化收敛曲线。由图可以看出,六边形算法下地磁三分量的收敛一致性较差,而多目标进化算法下地磁三分量的收敛同步性较好。综合上述对比,多目标进化算法与六边形算法相比在地磁环境中具有较好的搜索性能。

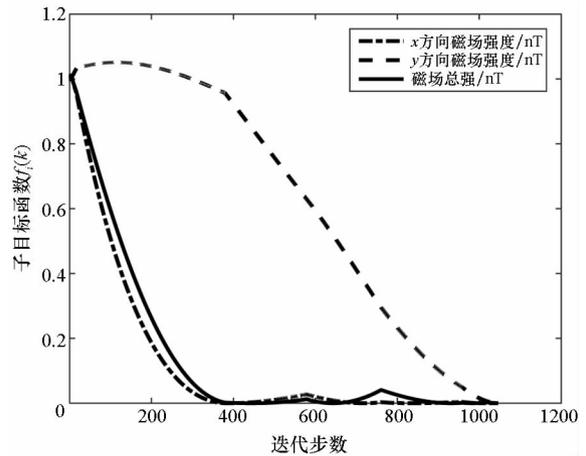


图6 六边形算法下地磁三分量的收敛曲线

Fig. 6 Convergence curves of three components in the hex-path algorithm

3.3 两种算法的平均搜索时间对比

分析两种算法的平均搜索时间,即平均迭代

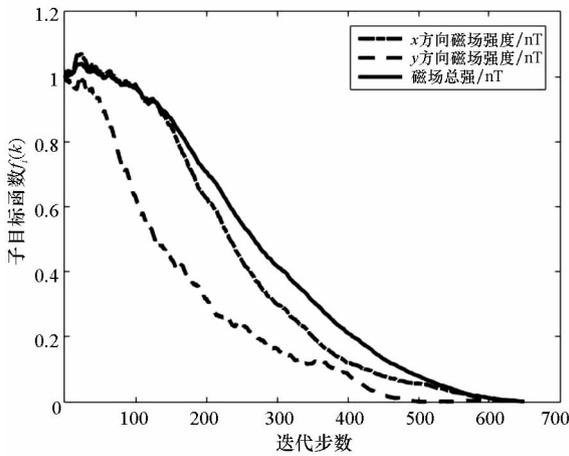


图 7 多目标进化算法下地磁三分量的收敛曲线

Fig. 7 Convergence curves of three components in the evolutionary searching algorithm

步数。各算法分别取 50 次成功的仿真结果。如图 8 所示,横轴表示两种搜索策略。由图可以看出,地磁环境下多目标进化搜索策略的搜索效率高,其所用的平均搜索时间短于六边形算法的平均搜索时间。

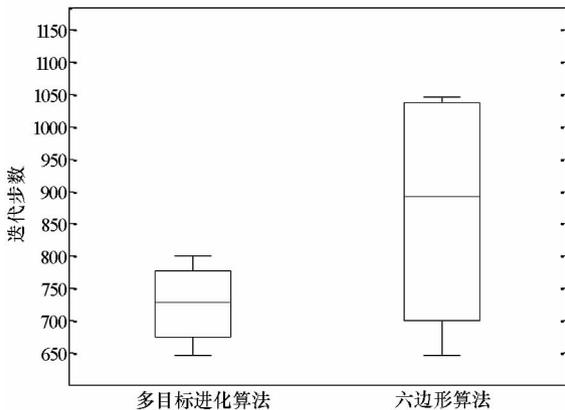


图 8 两种算法下平均搜索时间的统计

Fig. 8 Data statistics of average searching time in two cases

4 结论

针对水下自主航行器地磁趋向的搜索环境,对目标位置地磁信息的多目标进化搜索算法进行了定量分析。比较了多目标进化搜索算法和六边形搜索算法的鲁棒性和平均搜索时间。通过分析可以看出,对于水下自主航行器的地磁环境,多目标进化搜索算法具有良好的搜索性能。六边形路径搜索算法本质上是贪婪搜索,其在每一步选择中都采取在当前状态下最好或者最有利的选择。该算法虽然容易实现,但容易陷入局部最优。多目标进化搜索做到了探索和利用的平衡,在本文的地磁环境中能够表现出良好的搜索性能。

参考文献 (References)

- [1] Lohmann K J. Animal behaviour: magnetic-field perception[J]. Nature, 2010, 464(7292): 1140-1142.
- [2] Luschi P, Hays G C, Papi F. A review of long-distance movements by marine turtles, and the possible role of ocean currents[J]. Oikos, 2003, 103(2): 293-302.
- [3] Benhamou S, Sudre J, Bourjea J, et al. The role of geomagnetic cues in green turtle open sea navigation[J]. PLoS One, 2011, 6(10): 552-552.
- [4] Wiltschko R, Schiffner I, Wiltschko W. A strong magnetic anomaly affects pigeon navigation [J]. Journal of Experimental Biology, 2009, 212(18): 2983-2990.
- [5] 刘飞,周贤高,杨晔,等. 相关地磁匹配定位技术[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(1): 59-62. LIU Fei, ZHOU Xiangao, YANG Ye, et al. Geomagnetic matching location using correlative method[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(1): 59-62. (in Chinese)
- [6] Jiang L L, Ran L X. Pure geomagnetic homing navigation on earth surface[C]//Proceedings of International Conference on Electronics, Communications and Control, 2011: 971-974.
- [7] Armstrong B, Wolbrecht E, Edwards D B. AUV navigation in the presence of a magnetic disturbance with an extended Kalman filter [C]//Proceedings of OCEANS IEEE - Sydney, 2010.
- [8] 郭才发,胡正东,张士峰,等. 地磁导航综述[J]. 宇航学报, 2009, 30(4): 1314-1389. GUO Caifa, HU Zhengdong, ZHANG Shifeng, et al. A survey of geomagnetic navigation[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(4): 1314-1389. (in Chinese)
- [9] Ryo Y J, Park J H. Design and development of magnetic position sensor for magnetic guidance system of automated ground vehicle [C]//Proceedings of 12th International Conference on Control, Automation and Systems, 2012: 988-991.
- [10] Tyrén C. Magnetic anomalies as a reference for ground-speed and map-matching navigation [J]. Journal of Navigation, 1982, 35(2): 242-254.
- [11] Holland O, Melhuish C. Some adaptive movements of animats with single symmetrical sensors [M]. Maes P, Mataric M J, Meyer J A, et al. From Animals to Animats 4: Proceedings of the Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior. Cambridge, USA: MIT Press, 1996: 55-64.
- [12] Russell R A. Chemical source location and the robomole project [C]//Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, 2003: 1-6.
- [13] Zhao Z W, Hu T C, Cui W Z, et al. Long-distance geomagnetic navigation: imitations of animal migration based on a new assumption[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(10): 6715-6723.
- [14] Hays G C. Animal navigation: salmon track magnetic variation[J]. Current Biology, 2013, 23(4): 144-145.
- [15] Liu M Y, Liu K, Yang P P, et al. Bio-inspired navigation based on geomagnetic[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2013: 2339-2344.
- [16] 李碧,郝志峰. 协同进化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 129-132. LI Bi, HAO Zhifeng. Coevolutionary algorithm and its application[M]. Beijing: Science Press, 2013: 129-132. (in Chinese)