

## 用于胶囊内窥镜方位求解的LM人工蜂群算法

杨 菲, 郭旭东, 翟 刚

上海理工大学医疗器械与食品学院, 上海 200093

**【摘要】目的:**为了解决胶囊内窥镜的定位问题,为活检和喷药提供方位信息,提出了反馈式交流励磁跟踪方法。基于Levenberg-Marquardt算法对初值的依赖和局部优化能力以及人工蜂群算法的随机性和全局优化能力,提出了一种改进的人工蜂群算法和Levenberg-Marquardt算法相结合的新型混合全局算法来解决定位问题。**方法:**根据方位跟踪原理建立跟踪模型,然后用此算法求解跟踪数学模型,求得胶囊的位置和方向信息。采用Visual Studio 2010进行了算法仿真实验,本文选择根据实际情况从螺旋线上有规律的选取100个点,并将100个 $(x, y, z, \alpha, \beta)$ 方位坐标的代入模型公式得到对应的100组电压值,然后再利用本文提出的混合算法求得100组电压值对应的100组方位值。以此方法来验证算法的正确性和高效性。**结果:**实验结果表明该定位算法能成功求解磁跟踪非线性方程组,且位置和方向误差均极小,迭代次数也在允许范围之内。**结论:**此算法充分利用了LM的局部寻优能力和ABC的全局寻优能力,不但克服了LM对初始向量选择的依赖,补偿了ABC算法定位效率不高的缺点,而且算法的求解精度高,收敛速度快,具有很好寻优能力。

**【关键词】**胶囊内窥镜;定位;LM算法;人工蜂群算法

**【中图分类号】**TM154.4

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2015)03-0322-05

## An advanced algorithm consisting of Levenberg-Marquardt and Artificial Bee Colony Algorithm applied to locate capsule endoscope

YANG Fei, Guo Xu-dong, ZHAN Gang

School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

**Abstract: Objective** To solve the problem of locating the capsule endoscope, and to provide location information for biopsying and spraying, a non-contact tracking method on electromagnetic induction is proposed. Based on that Levenberg-Marquardt (LM) Algorithm, depending on the initial value, has a strong competence of local optimization, and that the Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm has the characteristics of randomness and the competence of global optimization, an hybrid algorithm consisting of the LM Algorithm and ABC Algorithm is advanced. **Methods** The tracking model, based on the principles of position tracking, found the solution of the tracking mathematical model to obtain the position and location information of the capsule endoscope. Visual Studio 2010 was applied to conduct simulation of the algorithm, and 100 points from the helix were regularly selected based on the actual situation, and the 100 groups  $(x, y, z, \alpha, \beta)$  of position were coordinated into the model equations to obtain 100 groups of corresponding voltage values. The 100 groups of voltage values obtained by the hybrid algorithm were compared to the 100 groups of position values to verify the correctness and efficiency of the algorithm. **Results** Experimental results showed that the algorithm successfully solved nonlinear equations of magnetic tracking model. The location and orientation errors were minimal, and the number of iterations was within the allowed limits. **Conclusion** This algorithm takes full advantage of the local searching ability of LM Algorithm and the global optimization ability of ABC Algorithm. Moreover, it not only overcomes the dependence on the initial vector of LM Algorithm, but also compensates for the inefficient locating of ABC Algorithm. This algorithm has a high-precision for solving, a fast convergence, and a good optimization ability.

**Key words:** capsule endoscope; location; Levenberg-Marquardt Algorithm; Artificial Bee Colony Algorithm

**【收稿日期】**2014-12-23

**【基金项目】**国家自然科学基金(61001164, 30900320)

**【作者简介】**杨 菲(1988-),女,硕士在读,研究方向:消化道介入式微诊查装置的遥感定位研究。Tel:13671717757, E-mail: yangfei7757@163.com。

## 前言

为了弥补传统内窥镜的不足,胶囊内窥镜应运而生,它可以完整地检查整个消化道,而不会影响患者正常活动,更不会对患者产生心理负担<sup>[1]</sup>。但是也有许多不完善之处,例如它无法获知病灶位置、无法活检、喷药等。目前胶囊内镜还没有相应胶囊位姿反馈信息的有效应用,这方面的技术将是近期需要突破关键技术之一<sup>[2]</sup>。Given Imaging公司曾提出一种基于无线射频信号的定位技术。利用人体外8个天线接收源自胶囊内的射频信号,并用算法计算出胶囊位置。该技术的优点是利用胶囊内已有的射频天线,不须任何附加元件。但是,该系统的定位精度太低,平均精度为37.7 mm<sup>[3]</sup>,无法应用于临床。为了解决胶囊内窥镜的精确定位问题,为活检和喷药提供方位信息,我们提出了一种反馈式交流励磁方案。根据跟踪原理推导的数学模型是一个高维非线性方程组,为了提高胶囊跟踪的实时性,因此要求跟踪算法必须满足速度和精度的要求。

在本文中,我们研究了很多优化算法求解非线性方程,如牛顿法<sup>[4]</sup>、遗传算法<sup>[5]</sup>、贪婪算法<sup>[6]</sup>、神经网络算法<sup>[7]</sup>等,提出了一种基于Levenberg-Marquardt算法和人工蜂群算法的新型混合全局优化算法。通过仿真实验发现,该算法用于反馈式励磁跟踪系统,具有定位精度高、速度快、鲁棒性强的特性。

## 1 方位跟踪原理和跟踪非线性方程

反馈式励磁跟踪系统的工作流程为:在人体体表放置6个励磁线圈,并在遥测胶囊内部密封一个感应接收线圈,体外的反馈式交流励磁装置以初始值励磁,使得体外的励磁线圈阵列分时产生交变磁场;体内胶囊内窥镜中的检测装置将胶囊所处方位的磁场信号无线传输到体外,由体外的微控制器进行分析。最后将分析完成后的数据传送至PC机,采用本文提出的混合算法求解磁场逆问题,从而获得胶囊内窥镜的位置和方向信息。

设半径为 $r$ 励磁线圈上通过的电流为 $I$ 。根据磁偶极子模型<sup>[6]</sup>,计算空间内任一点 $P(x, y, z)$ 的磁感强度 $B$ 的三个分量为:

$$\begin{aligned} B_{x1} &= \frac{3\mu_0 I r^2 xz}{4L^5} \\ B_{y1} &= \frac{3\mu_0 I r^2 yz}{4L^5} \\ B_{z1} &= \frac{\mu_0 I r^2}{2L^3} - \frac{3\mu_0 I r^2 (x^2 + y^2)}{4L^5} \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $L^2 = x^2 + y^2 + z^2 + r^2$ ,  $r$ 为励磁线圈半径,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 为真空下的磁导率。

跟踪方法中,在人体体表平面布置6个励磁线圈<sup>[7]</sup>;因此以人体肚脐为原点,垂直于人体腹部,指向体内为 $Z$ 轴,平行于脊柱方向为 $X$ 轴,建立人体空间直角坐标系 $O\text{-}XYZ$ ;设励磁线圈中心点在坐标系中的坐标为 $(u, v, w)$ ,根据坐标平移变换公式<sup>[8]</sup>得:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{3\mu_0 I r^2 (X-u)(Z-w)}{4L^5} \\ B_y &= \frac{3\mu_0 I r^2 (Y-v)(Z-w)}{4L^5} \\ B_z &= \frac{\mu_0 I r^2}{2L^3} - \frac{3\mu_0 I r^2 ((X-u)^2 + (Y-v)^2)}{4L^5} \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $L^2 = (X-u)^2 + (Y-v)^2 + (Z-w)^2 + r^2$ ,  $r$ 为励磁线圈半径。

设感应线圈的中央主线表示为 $O'Z'$ ,建立直角坐标系 $O'\text{-}X'Y'Z'$ (图1)。将人体坐标系 $O\text{-}XYZ$ 移动到感应线圈坐标系中,使 $O$ 点与 $O'$ 点重合,设 $OZ$ 和 $O'Z'$ 的夹角为 $\alpha$ , $O'Z'$ 在 $X\text{-}O\text{-}Y$ 平面的投影和 $X$ 轴的夹角为 $\beta$ 。

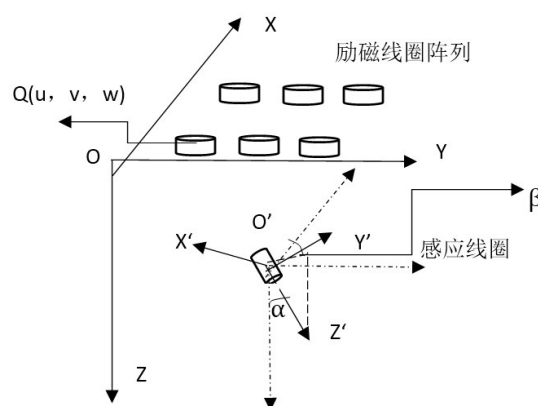


图1 空间坐标示意图

Fig.1 Spatial Coordinates Schematic

根据坐标旋转公式和法拉第定理<sup>[9]</sup>,得到磁场传感器相对于坐标系 $O\text{-}XYZ$ 的感应电动势的峰值为:

$$E = -N \cdot n \cdot w \cdot S \cdot (B_x \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta + B_y \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta + B_z \cdot \cos \alpha) \quad (3)$$

上式即为交流励磁式跟踪系统模型,其中 $N$ 和 $n$ 分别为励磁线圈和感应线圈的匝数, $S$ 为线圈横截面积。从上式中我们可以看到一共有5个未知量( $x, y, z, \alpha, \beta$ ),即为胶囊内窥镜在体内跟踪需要确定的方位。通过求解该非线性方程组,得到胶囊内窥镜在体内的方位信息。

## 2 算法原理及算法实现

### 2.1 LMABC算法原理

本文提出了一种使用改进的人工蜂群算法(简称ABC算法)和Levenberg-Marquardt算法(简称LM算法)的混合优化算法,首先通过ABC算法进行全局搜索,找到及锁定最优解区域,再利用ABC算法得到的解作为LM算法的初值进行寻优,直到收敛到最优解。

LM算法为非线性最小二乘无约束优化的主要算法<sup>[10]</sup>。它通过自适应调整阻尼因子 $\mu$ 来达到收敛特性,当 $\mu=0$ ,LM算法就变成近似Hessian矩阵的牛顿法;当 $\mu$ 较大时,LM算法就更接近小步长的梯度下降法。在迭代过程中,如果误差指标函数降低,就降低 $\mu$ 的值,反之,就增加 $\mu$ 的值。这样,该算法的每步迭代的误差性能总是减小的,表现函数最终会减小到设定的值,并且逼近最小误差的速度更快,精度更高。但是,在LM算法的计算过程中,初始值的选择是一个很重要的因素<sup>[11]</sup>。若选择的初值接近真值,收敛速度很快且能够得到全局最优解,但是如果初值远离真解,优化结果往往会过早的陷入局部最优解从而得到的结果背离真解<sup>[12]</sup>。因此我们需要ABC算法进行全局寻优锁定最优解。

人工蜂群算法首先按照我们的需求解方程组,在解的可行域内随机出 $N$ 组解。计算出每个解的适应度,然后依次对每个解进行更新,提高其适应度,在适应度满足一定条件或者更新次数达到阈值之后,输出适应度最高的解<sup>[13]</sup>。传统ABC算法采用随机数作为位置更新的系数,在求解跟踪非线性方程组时成功率较低,在50%左右。本文将传统ABC算法提高适应度的方向改为向当前最优解的方向更新位置,更新后的坐标如公式(4),此改善使得算法的效率更高,可以更快的逼近最优解。

$$v_i^j = v_i^j + r(0, 1) \cdot (v_{best}^j - v_i^j) \quad (4)$$

另外我们使用电动势差值的最小二乘值计算适应度,与LM算法保持一致,较好地链接了LM与ABC算法,提高了混合算法的效率,降低了迭代次数。其中最小二乘值的计算方法如公式(5),适应度的计算公式如公式(6):

$$\|e\|_2 = \sum_{i=1}^6 (E_i - f_i)^2 \quad (5)$$

$$P_i = 1 / (\|e\|_2 + 1) \quad (6)$$

### 2.2 算法实现流程

本算法为LM与ABC算法相结合的一种混合算法,具体过程如下:

Step 1: 设置ABC控制参数未更新次数最大值 $\text{limit}=100$ ,最大循环次数 $\text{Maxcycle}=1000$ ,适应度阈值0.99;设置LM算法最大迭代次数 $\text{Maxiter}=1000$ ,退出条件为 $\|e\|_2 \leq 10^{-20}$ ;设置最大重新定位次数为10;

Step 2: 变量初始化。在五维空间里随机出 $N$ 个解 $v_0^0, v_1^0, v_2^0, \dots, v_n^0$ ,并由公式(5),(6)计算最小二乘值 $\|e\|_2$ 和适应度 $P_i$ ; Step 3: 选取一个初始解,并任意选取此解的一个维度来进行变化,根据公式(4)计算得到交叉后的解; Step 4: 计算此解的最小二乘值和适应度; Step 5: 判断适应度是否提高<sup>[14]</sup>,如果提高则更新解并复位更新失败计数器,否则不更新解,更新失败计数器加1; Step 6: 转步骤3更新其他解,直到所有解遍历结束,循环次数加1,找到未更新次数大于Limit的解,则根据式(4)复位该解; Step 7: 判断是否小于最大循环次数 $\text{Maxcycle}$ ,并判断是否有适应度达到阈值的解,若是则转到Step 3,否则将适应度最高的解输出; Step 8: 计算上一步输出的解的 $\|e\|_2$ ,若满足退出条件则终止算法,存储结果退出;否则进行Step 9; Step 9: 解下面的线性方程组,得到方向 $d^{(k)}$ ;

$$[F(v^{(k)})^T F(v^{(k)}) + \mu_k I] d + F(v^{(k)})^T F(v^{(k)}) = 0 \quad (7)$$

Step 10: 确定步长 $\alpha_k$ 为集合 $\{\rho^i | i=0, 1, 2, \dots\}$ 中使得下面不等式成立的最大者:

$$f(v^{(k)} + \alpha_k d^{(k)}) \leq f(v^{(k)}) + \sigma_1 \alpha_k \nabla f(v^{(k)})^T d^{(k)} \quad (8)$$

Step 11: 令 $v^{(k+1)} = v^{(k)} + \alpha_k d^{(k)}$ ,  $k=k+1$ ,计算最小二乘值是否符合要求,符合则退出算法,否则LM算法迭代次数加1; Step 12: 判断最大迭代次数是否大于 $\text{Maxiter}$ ,如果是则转Step 13,否则转Step 9再次迭代; Step 13: LM算法迭代次数超过最大迭代次数,此次定位失败。转Step 1重新定位。定位失败次数超过最大重新定位次数,则退出算法。

LMABC算法流程图如图2所示。

## 3 算法仿真实验与结果

为验证改进后的LM蜂群算法求解磁跟踪非线性方程组的性能,我们完成了算法仿真实验。由于人体厚度及肠道区域均不超过30 cm;为了模拟位置和角度变化,并能很好地观察试验结果,本文选择使用从螺旋线上有规律的选取100个点,圆柱坐标系螺

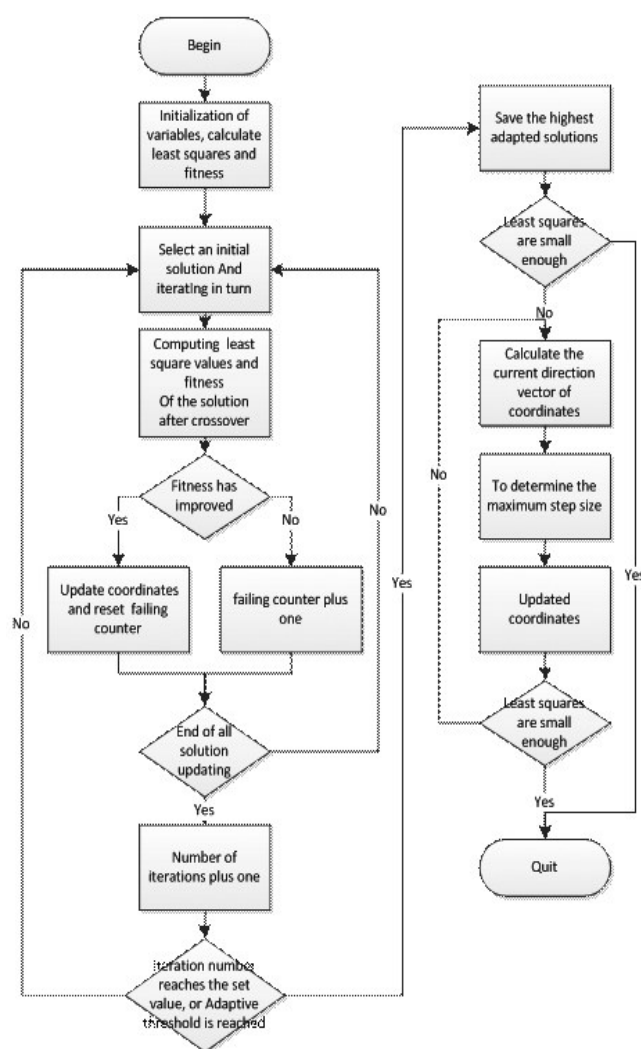


图2 LMABC算法流程图

Fig.2 LMABC Algorithm flowchart

旋线方程如下:

$$\begin{cases} r = 0.0015 \cdot i \\ \theta = i/5.0 \\ z = 0.003 \cdot i \end{cases} \quad (9)$$

转换为直角坐标系的方程如下:

$$\begin{cases} x = 0.0015 \cdot i \cdot \cos(i/5.0) \\ y = 0.0015 \cdot i \cdot \sin(i/5.0) \\ z = 0.003 \cdot i \end{cases} \quad (10)$$

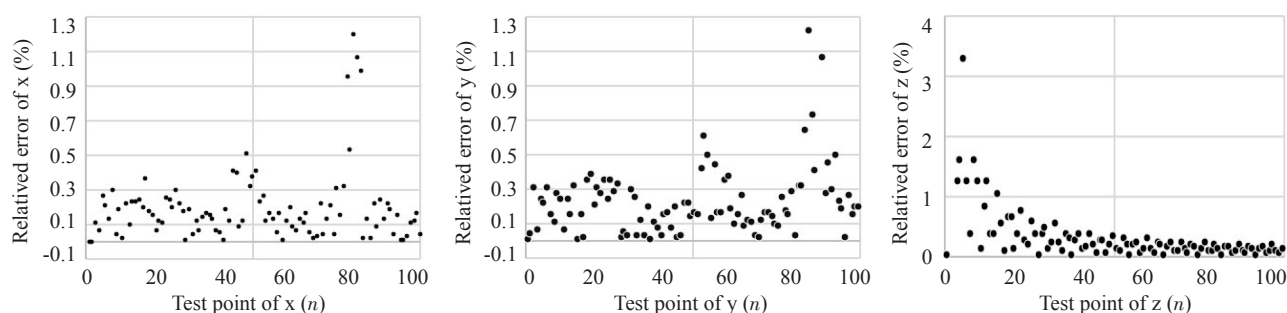


图3 100个样本点在x,y,z轴上相对位置误差分布散点图

Fig.3 The relative position error distribution scattergram of 100 sample points in x, y, z-axis

本文中的 $\alpha, \beta$ 在正负 $10^\circ$ 范围内随机变化, $x, y, z$ 在30 cm范围内变化;将产生的100个 $(x, y, z, \alpha, \beta)$ 方位坐标代入公式(3)得到对应的100组电压值,然后再利用本文提出的混合算法求得100组电压值对应的100组方位值。

在实验中,有出现异常退出现象,最终表现为某组或多组电压值求解失败。经过分析,由于蜂群算法求解的随机性,以致其输出的近似解不在LM算法有效求解区域内,最终导致此次定位失败。经过大量的实验,得出新算法的失败率在1%左右;遇到定位失败的情况重新定位1次即可。另外也出现有 $\beta$ 的解值与真实值相差较大的情况。经过分析,这是因为当 $\alpha=0$ 时,方程可以简化为公式(11),那么 $\beta$ 的解就不影响方程的值。

$$E = -N \cdot n \cdot \omega \cdot S \cdot B_z \quad (11)$$

经过421次蜂群算法迭代和平均238次LM算法迭代后,算出了对应的100组方位值;由此得到位置相对误差和方向的相对误差如图3、图4所示(横轴表示点数,纵轴表示相对误差值)。

使用实际方位与计算得出的方位对比,统计结果见表1。

## 4 结论

由以上图表可以看出,算法求解的位置误差约为 $2.4 \times 10^{-4}$  m,可以精确到十分之一毫米,方位角误差约为 $4.9 \times 10^{-4}$ 度,可以精确到万分之一度;大量的实验数据表明LM算法部分平均迭代次数为238次,整体算法的失败率在1%左右,并且可以再次求得正确结果。由此可知,本文提出的LMABC算法有效地将LM算法和人工蜂群算法相结合,可非常快速地求出方位解,且具有较高的求解精度,且这样的精度已能满足临床的需求。此算法充分利用了LM的局部寻优

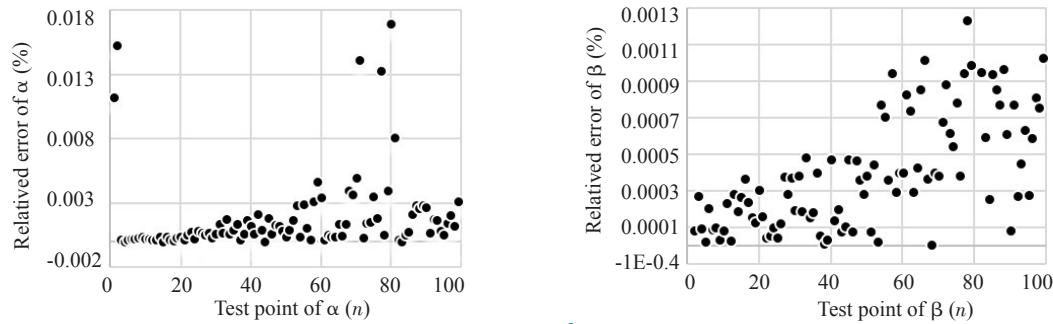
图4 100个样本点的 $\alpha$ 和 $\beta$ 角度相对误差分布散点图Fig.4 The relative error distributed scattergram of  $\alpha$  and  $\beta$  the angle of 100 sample points

表1 位置和方向坐标的误差统计结果

Tab.1 Error statistics of position and orientation

	Minimum Error	Maximum Error	Average Errors
$x$	0	4.98E-04	2.30E-04
$y$	0	5.00E-04	2.51E-04
$z$	0	4.95E-04	2.49E-04
$\alpha$	3.88E-06	5.01E-04	2.50E-04
$\beta$	3.39E-06	7.31E-02	1.13E-03

能力和ABC的全局寻优能力,不但克服了LM对初始向量选择的依赖,补偿了ABC算法定位效率不高的缺点,具有很好的应用前景。但是暂时只处于算法仿真的阶段,真正应用到临床还有一些距离。

## 【参考文献】

- [1] 李魁韬, 王惠南. 胶囊内窥镜的研究进展[J]. 医疗设备信息, 2005, 20(2): 36-37.  
Li WT, Wang HN. Research progress of capsule endoscopy[J]. Medical Device Information, 2005, 20(2): 36-37.
- [2] 胡 超. 胶囊内窥镜位置方向磁场定位技术的研究[J]. 集成技术, 2012, 1(1): 105-113.  
Hu C. Study of capsule endoscope position location technology of the magnetic field in the direction[J]. Integration Technology, 2012, 1(1): 105-113.
- [3] Fischer D, Schreiber R, Levi D, et al. Capsule endoscopy: the localization system [J]. Gastrointest Endoscopy Clin North Am, 2004, 14: 25-31.
- [4] 刘 晶, 高 岩. 求解一类无限维非光滑算子方程的光滑化牛顿法[J]. 上海理工大学学报, 2008, 30(2): 167-170.  
Liu J, Gao Y. Smoothing newton method to solve a class of infinite-dimensional operator equations[J]. Journal of Shanghai Polytechnic University, 2008, 30(2): 167-170.
- [5] 黄薇薇. 基于遗传算法的波前编码相位板参数优化[J]. 光学仪器, 2007, 29(4): 17-22.  
Huang WW. Wavefront coding phase plates parameters based on genetic algorithm optimization[J]. Optical Instruments, 2007, 29(4): 17-22.
- [6] 李艳诚, 李 震. 基于贪婪算法的 Snake 模型[J]. 中国医学物理学杂志, 2010, 27(1): 1628-1631.  
Li YC, Li Z. Snake model based on greedy algorithm[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2010, 27(1): 1628-1631.
- [7] 董 武, 李树祥. 神经网络BP学习算法的改进[J]. 中国医学物理学杂志, 1997, 14(1): 23-25.  
Dong W, Li SX. Improved BP neural network learning algorithm [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 1997, 14(1): 23-25.
- [8] 吴旭东, 侯文生, 郑小林, 等. 磁偶极子的定位模型及实验验证[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(2): 326-329.  
Wu XD, Hou WS, Zheng XL, et al. Magnetic dipole localization model and experimental verification [J]. Scientific Instrument Journal, 2008, 29(2): 326-329.
- [9] Guo X, Yan G, He W. A position telemetric method for implantable microcapsules in the gastrointestinal tract[J]. Meas Sci Tech, 2008, 19(4): 045201.
- [10] 丁士俊, 张忠明. 几种不同坐标变换方法问题的研究[J]. 四川测绘, 2005, 1: 16-19.  
Ding SJ, Zhang ZM. Research of several different methods of coordinate transformation problem[J]. Sichuan Surveying and Mapping, 2005, 1: 16-19.
- [11] 张鸿燕, 耿 征. Levenberg-Marquardt算法的一种新解释[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(19): 5-8.  
Zhang HY, Geng Z. Novel interpretation for Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Comput Eng Appl, 2009, 45(19): 5-8.
- [12] 武 菊, 任 鹏. 基于 LM 和 SA 的混合优化算法[J]. 内江师范学院学报, 2010, 31(8): 32-34.  
Wu J, Ren P. The hybrid optimization algorithm based of LM and SA algorithm[J]. Journal of Neijiang Teachers College, 2010, 31(8): 32-34.
- [13] 简晓春, 王利伟, 闵 峰. 基于 LM 算法的 BP 神经网络对汽车排放污染物的预测[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2012, 26(7): 11-16.  
Jian XC, Wang LW, Min F. Using BP neural network to prediction of pollutants of vehicle based on LM algorithm [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2012, 26(7): 11-16.
- [14] 胡 恒, 高 鹰. 多目标人工蜂群算法研究[J]. 福建电脑, 2013, 29(10): 62-65.  
Hu H, Gao Y. Study of multi-objective artificial bee colony algorithm[J]. Fujian Computer, 2013, 29(10): 62-65.