

高动态精度抗磁干扰胶囊内镜定位方法

牛德森, 陈晓冬, 杜承阳, 汪毅, 郁道银

天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 胶囊内镜是一种新型的消化道检查手段, 目前对胶囊内镜的跟踪定位技术仍存在动态精度低和磁干扰下跟踪失败等问题。提出了一种基于粒子滤波(PF)的磁定位方法, 相比于传统的定位方法, PF方法能保证胶囊在移动过程中仍有较高的定位精度, 并且能够克服铁磁性物质或通电线圈对磁场环境的影响。在设计的PF算法中添加了对目标运动的估计和对磁干扰的估计: 前者用于补偿时序采样下不实时的磁场测量值, 后者用于补偿磁干扰。实验结果表明, 在有限的磁干扰影响下($<1.5 \mu\text{T}$), 传统的定位方法已无法正常跟踪, 而本方法的动态定位的平均误差能保持在6 mm以下, 能够满足临床应用的要求。

关键词 医用光学; 内窥手术; 磁定位; 粒子滤波; 胶囊内镜; 磁干扰

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.061701

Capsule Endoscopy Localization Method of High Dynamic Accuracy in Magnetic Disturbance

Niu Desen, Chen Xiaodong, Du Chengyang, Wang Yi, Yu Daoyin

Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology of Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Capsule endoscopy is a new examination method of gastrointestinal tract. The tracking and localization technique of capsule endoscopy still have the problems of poor dynamic accuracy and tracking failure under magnetic disturbance. This paper proposes a magnetic localization method based on particle filter (PF). Compared with traditional localization method, the proposed PF method can effectively avoid the poor accuracy in the dynamic tracking, and overcome high sensitivity to magnetic disturbance generated by the ferromagnetic materials or surrounding electrical currents. The estimation of the target movement and the estimation of the magnetic disturbance are added in the designed PF algorithm. The estimation of the target movement is applied to compensate measured value of magnetic field when the measurement under time sequence sampling isn't real time. The estimation of the magnetic disturbance can compensate the magnetic disturbance. The experimental results show that, under limited magnetic disturbance ($<1.5 \mu\text{T}$), traditional localization method cannot work. For the dynamic localization, the averaged error of the proposed method is less than 6 mm, which meets the requirements of the clinical application.

Key words medical optics; endoscope surgery; magnetic localization; particle filter; capsule endoscopy; magnetic disturbance

OCIS codes 170.1610; 170.2680; 120.2440; 120.0280

1 引言

胶囊内镜是针对消化道的小型检查装置, 相比于传统的插入式内镜, 胶囊内镜具有对患者无创伤、无痛苦等优点, 并且能检查其他内镜无法深入的区域, 因此胶囊内镜已经被越来越多的医生和患者所接受^[1-2]。

收稿日期: 2017-01-14; **收到修改稿日期:** 2017-02-14

基金项目: 国家十二五科技支撑计划项目(2012BAI19B02)

作者简介: 牛德森(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事手术定位及优化算法方面的研究。E-mail: niuds@tju.edu.cn

导师简介: 陈晓冬(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电检测技术及仪器方面的研究。

E-mail: xdchen@tju.edu.cn(通信联系人)

但是,胶囊内镜在临床应用上仍面临几大问题,如患病组织的位置难以精确定位、胶囊主动驱动问题等^[3-4]。上述问题均与胶囊的跟踪定位技术有关。

由于人体组织的遮挡,无法对胶囊实施可见光定位(VPL)^[5]。不受视线(LOS)限制的定位技术如磁场定位、射频定位、医学影像定位、超声定位、惯性导航定位^[6]等均适用于胶囊内镜的跟踪。相比于其他定位技术,磁场定位技术具有定位精度高、定位速度快的优势^[7],已成为最具潜力的定位方案。

对于基于磁场的胶囊内镜定位技术,国内外学者均有研究^[4,7-19],但是磁定位技术仍有两大问题需要解决:1) 时域串行采样下各磁场观测点的测量值并不能及时更新,导致动态定位误差增大;2) 磁场测量值容易受到磁噪声和磁干扰的影响,如靠近定位系统的铁磁物质或含通电线圈的装置,这种干扰噪声也必将造成磁定位误差骤增甚至定位失败。

已被报道的用于胶囊内镜磁定位的算法有优化算法和贝叶斯滤波算法,优化算法包括 Levenberg-Marquardt (LM)算法^[12-15]、自适应粒子群优化(PSO)算法^[16]、人工蜂群优化(ABC)算法^[17],贝叶斯滤波算法包括扩展卡尔曼滤波(EKF)算法^[18]以及粒子滤波(PF)算法^[19]。传统的优化算法(LM^[12-15]、PSO^[16]、ABC^[17])需要所有观测点的磁场测量值来完成一次定位,但是在典型的磁定位系统中,测量值是时序采样的。当目标运动时,观测点实时的测量值并不能及时地传递给解算系统,导致动态误差增大。而贝叶斯滤波算法(EKF^[18]、PF^[19])中把目标设计成动态目标,在定位中加入目标运动的估计,较好地改善时序采样下的动态定位效果^[19]。

在实际应用中,环境中的磁干扰将不可避免地影响到磁定位系统,这是制约磁定位技术走向临床的最重要因素。而经过实验测试,已报道的方法(LM^[12-15]、PSO^[16]、ABC^[17]、EKF^[18]、PF^[19])在磁干扰下均表现不佳。针对这个问题,本课题组选用 PF 作为算法框架,在系统模型中加入目标运动的估计,在观测模型中加入磁干扰的估计。该方法不仅保持了 PF 动态定位精度高的优点,还对磁干扰具有一定抗性。

本研究通过一系列实验验证了新方法的静态、动态和抗干扰性能。结果表明,相比于其他的定位方法,所提 PF 方法在磁干扰下仍有可靠的静态定位精度和动态定位精度。

2 定位原理

2.1 多磁偶极子模型

基于本课题组之前的工作^[16],将待定位目标用多磁偶极子模型表示。如图 1 所示,长度为 $2L$ 、半径为 R 的圆柱永磁体位于参考坐标系 O -XYZ 中,其中心位置是 (x_0, y_0, z_0) 。永磁体的磁化强度为 M ,磁体轴线与 Z 轴夹角为 θ ,且其在 OXY 平面上的投影与 X 轴夹角为 φ 。该磁体的轴线所对应的方向矢量为

$$\mathbf{e} = (e_x, e_y, e_z) = (\sin \theta \cdot \cos \varphi, \sin \theta \cdot \sin \varphi, \cos \theta)。(1)$$

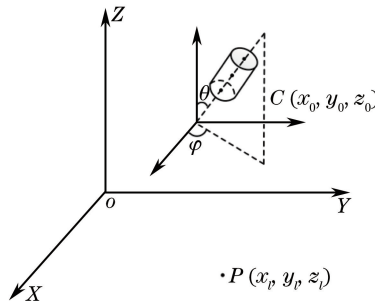


图 1 参考坐标系下的圆柱永磁体

Fig. 1 Cylindrical permanent magnet in the reference coordinate system

单磁偶极子模型将该磁体近似为一个位于圆柱中心的单个磁偶极子,对于参考坐标系下的观测点 (x_l, y_l, z_l) ,该磁偶极子产生的磁场强度为 $\mathbf{B}_i = (B_x, B_y, B_z)$,其中

$$B_x = \frac{\mu_0 R^2 LM}{2r^5} \{e_x [2(x_l - x_0)^2 - (y_l - y_0)^2 - (z_l - z_0)^2] + 3e_y(x_l - x_0)(y_l - y_0) + 3e_z(x_l - x_0)(z_l - z_0)\},(2)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 R^2 LM}{2r^5} \{ e_y [2(y_l - y_0)^2 - (x_l - x_0)^2 - (z_l - z_0)^2] + 3e_x(x_l - x_0)(y_l - y_0) + 3e_z(y_l - y_0)(z_l - z_0) \}, \quad (3)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 R^2 LM}{2r^5} \{ e_z [2(z_l - z_0)^2 - (y_l - y_0)^2 - (x_l - x_0)^2] + 3e_x(x_l - x_0)(z_l - z_0) + 3e_y(y_l - y_0)(z_l - z_0) \}, \quad (4)$$

$$r = \sqrt{(x_l - x_0)^2 + (y_l - y_0)^2 + (z_l - z_0)^2}, \quad (5)$$

式中 μ_0 是真空磁导率, r 是观测点到永磁体中心的距离。

那么,空间中某观测点 (x_l, y_l, z_l) 的磁场强度 B_s 可看作是磁体位置 (x_0, y_0, z_0) 、姿态角 (φ, θ) 、长度 $2L$ 的函数

$$\mathbf{B}_s = b(x_0, y_0, z_0, \varphi, \theta, L). \quad (6)$$

上述单磁偶极子模型是一种远场近似,其近场精度较低,针对该问题,可采用多磁偶极子模型对其进行改进。

将圆柱永磁体分为轴向排列、轴线重合的各圆柱子磁体,从顶端开始编号 1 到 N ,那么这些子磁体拥有相同的方向矢量 \mathbf{e} ,第 i ($i=1, 2, \dots, N$) 个子磁体的位置可表示为

$$x_i = x_0 + \frac{L}{N}(2i - 1 - N)e_x, \quad (7)$$

$$y_i = y_0 + \frac{L}{N}(2i - 1 - N)e_y, \quad (8)$$

$$z_i = z_0 + \frac{L}{N}(2i - 1 - N)e_z. \quad (9)$$

根据(6)式,第 i 个子磁体产生的磁感应强度为

$$\mathbf{B}_i = b\left(x_i, y_i, z_i, \varphi, \theta, \frac{L}{N}\right). \quad (10)$$

那么多磁偶极子在观测点产生的总磁场强度应为各子磁体的强度之和

$$\mathbf{B} = \sum_{i=1}^N \mathbf{B}_i = \sum_{i=1}^N b\left(x_i, y_i, z_i, \varphi, \theta, \frac{L}{N}\right). \quad (11)$$

当已经确定磁体长度 $2L$ 和模型的子磁偶极子个数 N ,结合(7)~(9)、(11)式,可得到在某观测点 (x_l, y_l, z_l) 处的磁场强度是永磁体位姿 $(x_0, y_0, z_0, \varphi, \theta)$ 的函数

$$\mathbf{B} = f(x_0, y_0, z_0, \varphi, \theta). \quad (12)$$

2.2 PF

典型的 PF 算法由两个步骤实现^[20]:1) 系统状态预测阶段,从重要性采样密度函数中产生粒子,这一过程需要使用系统模型;2) 粒子更新阶段,根据最新的测量数据来更新后验概率密度函数(PDF),这一过程利用了观测模型。

在磁定位系统中,待定位磁性目标与周围磁环境(噪声)提供了系统内所有的磁场。在系统外,通过磁场传感器观测系统内磁场信息,然后尽可能地过滤掉磁噪声以求得最优的目标位置。这一系统分析为构建系统模型和观测模型提供了思路。

2.2.1 系统模型

系统模型指的是目标状态的更新过程。由于待定位目标有一定的运动趋势,故系统更新模型可采用二阶马尔科夫过程^[19],即 k 时刻的状态与 $k-1$ 、 $k-2$ 两时刻的状态均有关,若仅保留 $k-1$ 时刻的状态,则只需加入 $k-2$ 到 $k-1$ 时刻的状态改变量,即速度量。此外,考虑到系统自身产生的磁噪声及外界产生的磁干扰,每个状态均需带有一定的磁场补偿量。故建立如下的系统状态向量

$$\mathbf{X} = [x_0 \ v_x \ y_0 \ v_y \ z_0 \ v_z \ \theta \ \omega_\theta \ \varphi \ \omega_\varphi \ b_x \ b_y \ b_z]^\top, \quad (13)$$

式中 (x_0, y_0, z_0) 为目标在参考坐标系下的中心位置, (φ, θ) 为目标的姿态角, (v_x, v_y, v_z) 为目标的三轴分速度, $(\omega_\theta, \omega_\varphi)$ 为目标的角速度矢量, (b_x, b_y, b_z) 为目标的三轴磁干扰补偿量。这一状态向量已经

能够描述由待定位目标与磁噪声组成的系统。

系统模型采用了线性随机差分方程

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{C}\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1}, \quad (14)$$

式中

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

矩阵 \mathbf{C} 被称为系统矩阵, T 为采样周期, 其值由采样设备给出; \mathbf{X}_k 、 \mathbf{X}_{k-1} 分别表示 k 、 $k-1$ 时刻的系统状态; \mathbf{w}_{k-1} 为 $k-1$ 时刻的过程噪声, 可以表示为

$$\mathbf{w}_{k-1} = ([0 \ \omega_1 \ 0 \ \omega_2 \ 0 \ \omega_3 \ 0 \ \omega_4 \ 0 \ \omega_5 \ 0 \ 0 \ 0]^T)_{k-1}, \quad (16)$$

式中元素 ω_i ($i=1, \dots, 5$) 设定为服从均值为 0、方差为 σ_w^2 的高斯分布; $\omega_i \sim N(0, \sigma_w^2)$, ($i=1, \dots, 5$)。这里只引入速度量的噪声, 不对当前位置、姿态、磁补偿量进行干预。

2.2.2 观测模型

观测模型是指当系统处于某种状态时, 在外部观测系统时所能观测到的系统输出量 \mathbf{y}_k 。在磁定位系统中, 用磁传感器观测系统的磁场。系统的磁场来自于磁性目标的磁场以及环境磁噪声。环境磁噪声来自两个方面, 其一是磁传感器自身输出不稳定带来的测量误差 \mathbf{v}_k , 其二是外界对系统施加的磁干扰 \mathbf{d}_k 。在 2.1 节推导出的多磁偶极子模型的基础上, 添加测量噪声 \mathbf{v}_k 、磁干扰 \mathbf{d}_k , 建立如下观测方程:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{B}_k + \mathbf{d}_k + \mathbf{v}_k, \quad (17)$$

式中 \mathbf{B}_k 为待定位磁体在观测点的理论磁场值, 由(12)式得到, 其为系统状态向量的非线性函数, 故该观测方程是状态向量的非线性函数, 也表明了该定位系统是非线性系统。

确定测量噪声 \mathbf{v}_k 需对每个磁传感器的输出波动性进行统计分析, \mathbf{v}_k 的分布应服从传感器输出误差的概率密度函数。而磁干扰 \mathbf{d}_k 的引入, 首先需要确定磁干扰的来临标志和干扰强度。

在第 k 次定位中, 三轴磁传感器测得当前磁场为 $\mathbf{B}_k^{\text{meas}}$; 在第 $k-1$ 次定位中, 通过 PF 算法得到待定位目标的位置姿态信息 \mathbf{X}_{k-1} , 系统矩阵 \mathbf{C} 与状态 \mathbf{X}_{k-1} 相乘可得到第 k 次定位的预测状态 $\tilde{\mathbf{X}}_k$, 通过磁场模型(12)式计算此时磁场传感器处的磁场为 $\tilde{\mathbf{B}}_k$ 。以 $\mathbf{B}_k^{\text{meas}}$ 、 $\tilde{\mathbf{B}}_k$ 的欧氏距离定义此次定位的残差量:

$$R_k = \|\mathbf{B}_k^{\text{meas}} - \tilde{\mathbf{B}}_k\|. \quad (18)$$

残差量 R_k 表征了第 k 次定位中磁场的突变量。若系统没有受到磁干扰, 残差量 R_k 应较小; 若磁场环境受到了较大干扰, 残差量 R_k 也将随之增大。故可以将残差量 R_k 作为磁干扰强度的度量。设磁干扰的来临标志为 g_1 , 当系统受到了磁干扰时, $g_1=1$, 当未受到明显的磁干扰时, $g_1=0$ 。 g_1 与 R_k 有如下关系

$$g_1 = \begin{cases} 0, & R_k \leq M_R \\ 1, & R_k > M_R \end{cases}, \quad (19)$$

式中 M_R 为预设阈值。

令磁干扰服从一阶马尔科夫模型

$$\mathbf{d}_k = g_1 g_2 \mathbf{d}_{k-1} + g_1 \boldsymbol{\varepsilon}_k, \quad (20)$$

式中 g_2 为预设系数,且 $g_2 \in (0,1)$,其大小反映了磁干扰的持续性。 $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ 是磁干扰补偿量,可以表示为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_k = [b_x \quad b_y \quad b_z]^\top. \quad (21)$$

残差量越大,说明干扰越大,磁补偿的范围也应随之增大。令 $b_x, b_y, b_z \sim U(-a, a)$,其中 $a = g_3 \cdot R_k$, g_3 为预设比例系数。在实际操作中,为了兼顾定位精度与抗干扰效果,选择均匀、离散地分配给粒子一定的磁干扰补偿量。在 $-a$ 与 a 之间等间距取 5 个离散值建立补偿数组,依次分配给每个粒子。

2.2.3 算法实现与参数设定

PF 算法的实现有很多种方式,如序贯重要采样法、重要性重采样法、正则 PF 法等。考虑到有效性,本研究使用重要性重采样法实现磁定位系统的 PF 方法,Wang 等^[21]给出了该方法的数学理论推导,以下介绍 PF 在本系统中的具体实现。

结合前两节构建的系统模型[(14)式]与观测模型[(17)式],PF 算法的实现流程如图 2 所示。

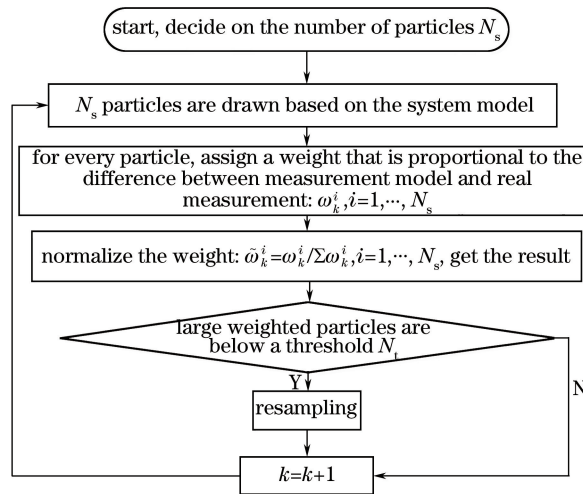


图 2 PF 算法的实现流程图

Fig. 2 Realization flow chart of PF algorithm

粒子群规模即粒子数量 N_s 影响着算法的收敛性。通常来说,粒子越多,输出结果也越趋近最优解。但是,增加粒子数 N_s 会增加耗时,影响定位的实时性。本研究中设定 N_s 为 500。

在使用系统模型生成粒子时,需要确定过程噪声 \mathbf{w}_{k-1} 。过程噪声 \mathbf{w}_{k-1} 的方差 σ_w^2 决定新生成粒子的聚集程度。在物体以较低速度运动时,粒子分布应更加细腻,此时 \mathbf{w}_{k-1} 中各元素的方差 σ_w^2 应较小;相对地,物体以较高速度运动时, σ_w^2 应相应增大,使粒子分布更加分散。在本方法中, σ_w^2 由下式确定

$$\sigma_w^2 = g_4 + g_5 \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}, \quad (22)$$

式中 g_4 为最小方差, g_5 是通过实验确定的比例系数。

在使用观测模型为每个粒子分配权重时,需要确定观测噪声 \mathbf{v}_k 和权重 ω_k 的分配公式。确定观测噪声 \mathbf{v}_k 需对每个磁场传感器的输出波动性进行统计分析,得出输出误差的概率密度函数。图 3 为实验系统中某传感器的单轴静态输出的概率密度函数,图中 μ 为磁场输出的均值, σ_2 是方差,可看出其输出符合高斯分布,通过高斯拟合可得出该传感器的观测噪声 \mathbf{v}_k 的方差为 $\sigma_v^2 = 1.33$ 。

权重 ω_k 的确定公式与观测模型与真实测量值的差值有关。二者的差值越小,则认为该粒子表现越好,为其分配的权重也越大。权重分配差异较小时不能很好地突出优质粒子,但当分配悬殊时又容易造成粒子退化。在实际应用中,权重 ω_k 一般为差值的倒数或差值平方的倒数。本研究中选用差值平方的倒数

$$\omega_k = \frac{1}{\|\mathbf{y}_k - \mathbf{B}_k^{\text{meas}}\|^2}. \quad (23)$$

重采样是为了降低粒子退化的负面影响。粒子退化问题是指随着滤波次数增加,大部分粒子的权重会变得很小,只有很少的粒子具有较大的权重。重采样的核心思想就是保留并复制大权值粒子,淘汰权值小的

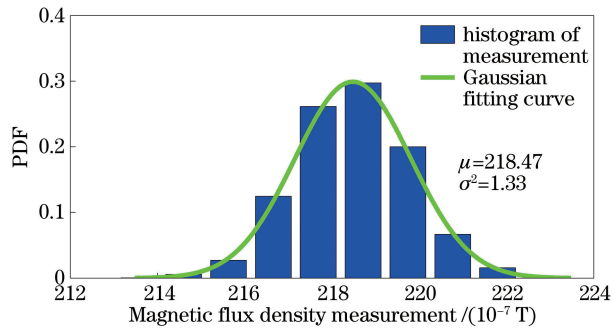


图3 磁场传感器静态输出的概率密度函数

Fig. 3 PDF of static output of magnetic sensor

粒子。具体的操作就是在每次归一化所有粒子的权重后,统计大权重粒子在种群中的比例,当比例低于阈值 N_i 则进行重采样操作。阈值 N_i 也被称为有效粒子规模,本研究中设定 N_i 为 0.6。重采样后的每个权值均为 $1/N_s$ 。为了平衡运算速度与粒子多样性,本研究使用的重采样方法是系统重采样法^[22]。

3 实验与分析

3.1 实验平台搭建

搭建了基于磁传感的内镜定位系统,实验平台的原理图和实物图分别如图 4(a)和(b)所示。系统的前端是 4×4 HMC5983 磁传感器阵列,它固定在有刻度的由有机玻璃制成的定位台上。磁源是一支软铁硼制轴向磁化的圆柱形永磁体,它固定在单轴电控位移平台上。磁传感器阵列与单片机(MCU)进行集成电路总线(IIC)通信,通过 CD4067 模拟开关芯片进行选通,IIC 通信频率为 200 kHz。MCU 通过串口将数据发送给上位机,串口通信频率为 115200 bit/s。上位机设计了微软基础类库(MFC)界面程序,运行环境是 AMD A10-5800K+4 G RAM+VS2010,为了实现实时定位,编程中采用了并行的多线程编程方式。实验中采样频率为 50 ms。每只 HMC5983 磁传感器均经过校正与对准,采用的方法是基于椭球约束的校正方法^[23]。

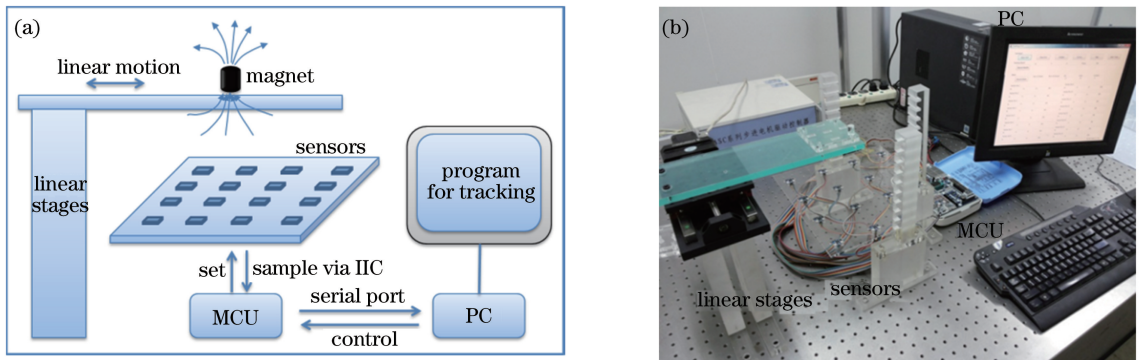


图4 基于磁传感的胶囊内镜定位系统的(a)原理图和(b)实物图

Fig. 4 (a) Schematic diagram and (b) physical map of capsule endoscope localization system based on magnetic sensor

3.2 磁干扰下的静态定位实验

静态定位实验中环境磁场(磁干扰)强度变换如图 5(a)所示,磁场方向与参考坐标系三轴夹角均为 45° 。待定位物体静止在位移平台上,距磁传感器平面 15 cm。作为对照,将其他定位算法(LM^[12]、APSO^[16]、ABC^[17]、EKF^[18])以及对照算法 PF^[19]进行横向对比。实验结果如图 5(b)和表 1 所示。图 5(b)是在磁干扰下用 LM 算法与提出的 PF 算法的实时位置误差。表 1 为各对比算法在该干扰下定位误差的统计分析,通过对比可知,提出的 PF 算法能够有效地补偿磁干扰的影响,在磁干扰下静态定位平均位置误差为 3.17 mm,姿态误差为 2.77° 。实验结果也说明,相比于 Sen 等^[19]提出的 PF 算法,本研究所提算法在系统模型中将磁干扰补偿量考虑进系统状态、在观测模型中加入磁干扰的估计,是有效的抗磁干扰方法。

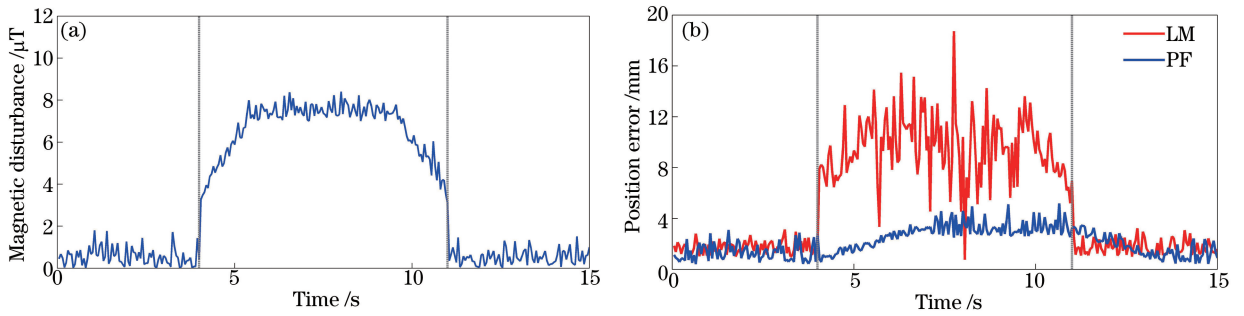


图5 (a)环境磁场的强度变化,在4~11 s时开启磁干扰;(b)在磁干扰下用LM算法与本研究所提PF算法的实时定位结果
Fig. 5 (a) Intensity changes of environmental magnetic with magnetic disturbance from 4 s to 11 s; (b) real-time localization results for LM algorithm and proposed PF algorithm with magnetic disturbance

表1 本研究所提PF方法与传统定位方法在磁干扰下静态定位实验的结果对比

Table 1 Comparison of static localization results with magnetic disturbance for the proposed PF method and traditional localization methods

Method	LM ^[12]	APSO ^[16]	ABC ^[17]	EKF ^[18]	PF ^[19]	Proposed PF
Position error /mm	10.11	13.02	7.55	8.23	7.70	3.17
Orientation error /($^{\circ}$)	9.45	11.61	6.02	6.21	5.98	2.77

3.3 磁干扰下的动态定位实验

动态定位实验中将铁磁物质和手机靠近磁传感器阵列,以此引入外界磁干扰。铁磁物质选用的是一钢制剪刀,与磁传感器阵列的最近距离为12 cm;手机处于待机状态下,与磁传感器阵列的最近距离为10 cm,引入了约1 μT 的干扰量。待定位物体处于匀速运动中,速度分别为1,2,4,8 mm/s。同样,实验中加入了LM^[12]、APSO^[16]、ABC^[17]、EKF^[18]以及PF^[19]的对照组。图6为实验结果,各算法的结果对照使用箱线图表示,其中红色箱体是LM算法在不同速度下的误差统计,红色连线为LM算法下各箱体中值连线,蓝色箱体是提出的PF算法在不同速度下的误差统计,蓝色连线为PF算法下各箱体中值连线。表2为各对比算法在磁干扰下定位误差的统计分析。由结果可知,随着目标运动速度的增加,不论是传统方法还是所提PF方法,误差均会有所增大,但是本方法的定位误差仍可保持在6 mm以下,相比于其他方法更加稳定可靠。

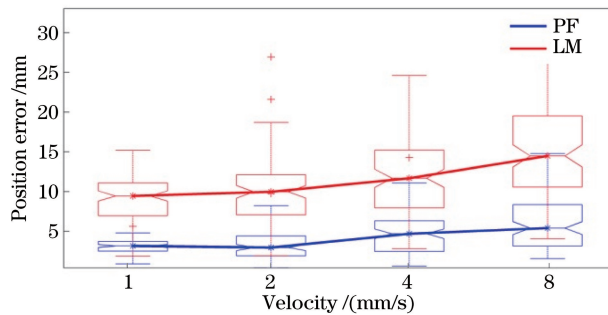


图6 磁干扰下LM算法与所提PF算法的定位误差

Fig. 6 Localization error of LM algorithm and proposed PF algorithm with magnetic disturbance

表2 所提PF方法与传统定位方法在磁干扰下动态定位实验的结果对比

Table 2 Comparison of dynamic localization results with magnetic disturbance for the proposed PF algorithm and traditional localization algorithm

Velocity / (mm/s)	Position error /mm					
	LM ^[12]	APSO ^[16]	ABC ^[17]	EKF ^[18]	PF ^[19]	Proposed PF
1	10.91	13.90	8.80	8.95	7.81	3.48
2	11.76	13.21	9.52	9.74	7.92	3.34
4	12.51	14.98	10.15	12.29	9.05	4.97
8	15.79	17.80	13.42	13.70	10.09	5.64

4 结 论

国内外对内镜磁定位方法的研究均没有有效解决磁干扰下定位失真及动态误差增大的问题。本研究提出了一种基于 PF 的胶囊内镜定位方法,分别进行了多组实验来验证本方法的有效性与可靠性。结果表明本方法对动态定位中的外界磁干扰具有一定的抗性,表现出了较高的动态定位精度。但该方法在应用中仍然存在如下问题:磁干扰的强度会影响本方法的抗干扰效果,在测试中,当加入较高的磁干扰(如超过 $1.5 \mu\text{T}$),该方法的定位效果恶化,粒子群出现无法找到最优解的情况,此时收敛性不能得到保证。

参 考 文 献

- [1] Mishkin D S, Chuttani R, Croffie J, *et al.* ASGE technology status evaluation report: wireless capsule endoscopy[J]. *Gastrointestinal Endoscopy*, 2006, 63(4): 539-545.
- [2] Mylonaki M, Fritscher-Ravens A, Swain P. Wireless capsule endoscopy: a comparison with push enteroscopy in patients with gastroscopy and colonoscopy negative gastrointestinal bleeding[J]. *Gut*, 2003, 52(8): 1122-1126.
- [3] Koulaouzidis A, Iakovidis D K, Karargyri A, *et al.* Wireless endoscopy in 2020: will it still be a capsule?[J]. *World Journal of Gastroenterology*, 2015, 21(17): 5119-5130.
- [4] Jess P, Bulut O, Almasi A, *et al.* The usefulness of a magnetic endoscope locating device in colonoscopy in daily practice: a prospective case-controlled study[J]. *Surgical Endoscopy*, 2009, 23(6): 1353-1355.
- [5] Guan Yang, Sun Dedong, Yin Shugang, *et al.* High precision indoor visible light positioning based on image communication[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(12): 1206001.
管 扬, 孙德栋, 殷树刚, 等. 基于成像通信的高精度室内可见光定位[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1206001.
- [6] Du Chengyang, Chen Xiaodong, Niu Desen, *et al.* An adaptive surgical navigation method based on inertial sensing[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0404002.
杜承阳, 陈晓冬, 牛德森, 等. 一种基于惯性传感的自适应手术导航方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0404002.
- [7] Moussakhani B, Ramstad T, Flam J T, *et al.* On localizing a capsule endoscope using magnetic sensors[C]. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Annual Conference*, 2012: 4058-4062.
- [8] Luo X B, Kitasaka T, Mori K. Endoscope 3-D motion tracking using an aggressive particle filtering for boosting electromagnetic guidance endoscopy[C]. *21st International Conference on Pattern Recognition*, 2012: 117-120.
- [9] Nakamoto M, Ukimura O, Gill I S. Realtime organtracking for endoscopic augmented reality visualization using miniature wireless magnetic tracker[J]. *Medical Imaging and Augmented Reality*, 2008, 5128(1): 359-366.
- [10] Guo X D, Song C L, Yan R G. Optimization of multilayer cylindrical coils in a wireless localization system to track a capsule-shaped micro-device[J]. *Measurement*, 2013, 46(1): 117-124.
- [11] Kim M G, Hong Y S, Lim E J. Position and orientation detection of capsule endoscopes in spiral motion [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2010, 11(1): 31-37.
- [12] Wang X N, Meng M Q, Hu C. A localization method using 3-axis magnetoresistive sensors for tracking of capsule endoscope[C]. *International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society*, 2006: 2522-2525.
- [13] Yang W A, Hu C, Li M, *et al.* A new tracking system for three magnetic objectives [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, 46(12): 4023-4029.
- [14] Hu Chao, Song Shuang, Yang Wan'an, *et al.* On the magnetic localization techniques for position and orientation of the capsule endoscope[J]. *Journal of Integration Technology*, 2012, 1(1): 105-113.
胡 超, 宋 霜, 阳万安, 等. 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.
- [15] Song S, Qiao W, Li B, *et al.* An efficient magnetic tracking method using uniaxial sensing coil[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 50(1):1-7.
- [16] Du Chengyang, Chen Xiaodong, Niu Desen, *et al.* A magnetic sensing method for surgical navigation based on multipole model[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0804001.
杜承阳, 陈晓冬, 牛德森, 等. 一种基于多磁偶极子模型的磁传感手术导航方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0804001.
- [17] Zheng Zizhao, He Xiaoqi, Hu Chao. Magnetic localization and orientation of capsule endoscope base on artificial bee colony algorithm[J]. *Journal of Integration Technology*, 2014(5): 52-60.

- 郑子昭, 何小其, 胡超. 基于人工蜂群算法的胶囊内窥镜位姿磁定位研究[J]. 集成技术, 2014(5): 52-60.
- [18] Huang Zhe, Yang Linghui, Zhao Ziyue, *et al.* Research on optoelectronic scanning dynamic coordinate measurement algorithm based on extended kalman filter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 051201.
- 黄喆, 杨凌辉, 赵子越, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的光电扫描动态坐标测量算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 051201.
- [19] Sen H T, Kazanzides P. Bayesian filtering to improve the dynamic accuracy of electromagnetic tracking[C]. IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE), 2013: 90-95.
- [20] Arulampalam M S, Maske S, Gordon N, *et al.* A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(2): 174-188.
- [21] Wang Fasheng, Lu Mingyu, Zhao Qingjie, *et al.* Particle filtering algorithm[J]. Chinese J Computers, 2014, 37(8): 1679-1694.
- 王法胜, 鲁明羽, 赵清杰, 等. 粒子滤波算法[J]. 计算机学报, 2014, 37(8):1679-1694.
- [22] Feng Chi, Wang Meng, Ji Qingbo, *et al.* Analysis and comparison of resampling algorithms in particle filter[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(4):1101-1105.
- 冯驰, 王萌, 汲清波, 等. 粒子滤波器重采样算法的分析与比较[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(4):1101-1105.
- [23] Li Q, Griffiths J G. Least squares ellipsoid specific fitting[J]. IEEE Computer, 2004, 10(2): 335-340.