

电磁跟踪系统磁传感器三轴非理想正交的快速校正算法

殷勤¹, 陈彬¹, 汪莹², 熊润¹, 杨小栓¹

(1. 解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏南京 210007;

2. 解放军理工大学理学院基础电子学系, 江苏南京 211101)

摘要: 六自由度电磁跟踪系统由于磁传感器三轴非理想正交, 系统引入误差导致参数定位精度降低。为了克服传统的基于共轭次梯度算法和神经网络模型校正方法存在的算法复杂、计算耗时较长、精度较低的缺点, 提出了以误差校正矩阵 P 为基础的快速校正算法, 同时实现了非正交参数的提取和系统误差的校正。通过系统特定参数的跟踪模型, 构造了包含非正交参数的线性方程组, 求解出误差校正矩阵。数值模拟结果表明, 该方法具有算法简单、计算量小、快速准确的优点, 可以有效校正电磁跟踪系统由于磁传感器三轴非理想正交而引入的参数误差, 提高了系统定位精度。

关键词: 电磁跟踪; 磁传感器; 非理想正交; 快速校正

中图分类号: TN 820.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.08.04

Fast calibration arithmetic for incompletely orthogonal three-axis magnetic sensor of electromagnetic tracking system

YIN Qin¹, CHEN Bin¹, WANG Ying², XIONG Run¹, YANG Xiao-shuan¹

(1. Engineering Institute of Corps of Engineers, University of Science and Technology of PLA, Nanjing 210007, China;

2. Department of Basic Electronics of Institute of Sciences, University of Science and Technology of PLA, Nanjing 211101, China)

Abstract: In the electromagnetic tracker system, as a result of the incompletely orthogonal three-axis magnetic sensor, the parameters precision is degraded. The precious method based on conjugated approximation gradient algorithm and artificial neural network model has the disadvantages of complexity, time-consuming and bad precision. A fast correction arithmetic is presented based on the correction matrix. Linear equations are constructed based on the special parameters tracker models, from which the correction matrix is deduced. Numerical simulation results indicate that the incompletely orthogonal parameters could be calculated efficiently and correctly. The parameters precision of the tracker system is improved.

Keywords: electromagnetic tracking; magnetic sensor; incomplete orthogonality; fast calibration

0 引言

六自由度电磁跟踪系统是在法拉第电磁感应定律基础之上发明的新型空间跟踪定位装置, 可实时地确定目标的6个参数^[1], 在机载火控系统^[2]、精密医疗器械^[3-4]、虚拟现实系统^[5-6]、作战模拟训练^[7-8]、管道缺陷无损检测^[9-10]等方面获得了广泛应用。系统采用三轴正交磁传感器作为发射、接收天线。由于加工和安装工艺的限制, 实际磁传感器三轴不可能严格正交, 使系统定位的目标参数产生误差, 影响系统精度^[11-12]。直接对磁传感器三轴非理想正交参数进

行测量, 不但需要昂贵的专用设备, 而且测量过程十分烦琐^[13-14]。考虑到磁传感器加工完成后, 各轴间的夹角不会变化, 可在传感器使用前进行修正。

文献[15]提出了共轭次梯度迭代算法, 文献[16]提出了神经网络模型, 这两种算法较复杂, 计算量大, 收敛性无法保证, 求解的非正交参数精度较低, 并且只考虑了磁传感器三轴非正交参数的计算方法, 没有分析其对于系统定位参数的影响及校正方法。基于此, 本文在系统定位模型基础之上, 提出了一种包含三轴非理想正交参数的快速校正算法, 同时实现了非正交参数的求解和系统误差的校正。

收稿日期: 2010-03-01; 修回日期: 2011-01-13。

基金项目: 国家自然科学基金(60971063)资助课题

作者简介: 殷勤(1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电磁跟踪定位技术、电磁场数值计算、电磁兼容与防护。

E-mail: dafengyin@126.com

通过选取特定空间姿态参数,建立包含三轴非正交参数的线性方程组,从而求解三轴非正交参数,进行系统误差校正,具有算法简单、计算量小、快速准确的优点。

1 三轴磁传感器非理想正交模型

设磁传感器 3 个正交的机械轴(即理论轴)为 X' 、 Y' 、 Z' ,实际磁轴为 X 、 Y 、 Z ,实际轴偏离理论轴的参数分别用 α_1 、 α_2 、 α_3 、 β_1 、 β_2 、 β_3 表示,如图 1 所示。

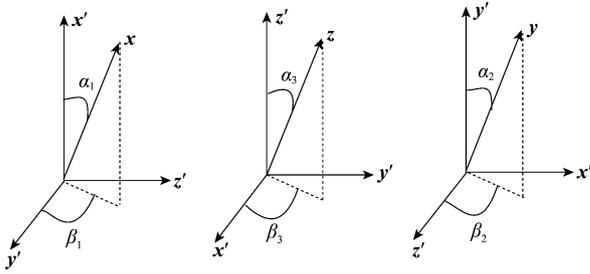


图 1 磁传感器三轴非理想正交示意图

电磁跟踪系统工作时,空间磁场的磁通量密度可表示为

$$\mathbf{B} = B'_x \mathbf{x}' + B'_y \mathbf{y}' + B'_z \mathbf{z}' \quad (1)$$

根据矢量运算的原理, X 、 Y 、 Z 三轴对应的实际接收电流为

$$\begin{aligned} I_x &= \mathbf{B} \cdot \mathbf{x} = B'_x \cos \alpha_1 + B'_y \sin \alpha_1 \cos \beta_1 + B'_z \sin \alpha_1 \sin \beta_1 \\ I_y &= \mathbf{B} \cdot \mathbf{y} = B'_x \sin \alpha_2 \sin \beta_2 + B'_y \cos \alpha_2 + B'_z \sin \alpha_2 \cos \beta_2 \\ I_z &= \mathbf{B} \cdot \mathbf{z} = B'_x \sin \alpha_3 \cos \beta_3 + B'_y \sin \alpha_3 \sin \beta_3 + B'_z \cos \alpha_3 \end{aligned} \quad (2)$$

设 \mathbf{Y} 矩阵为系统实际接收传感器接收矩阵, \mathbf{Y}' 为理想接收矩阵,则根据六自由度电磁跟踪定位系统原理,有

$$\mathbf{Y} = \mathbf{P}\mathbf{Y}' \quad (3)$$

即

$$\mathbf{Y}' = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{Y} \quad (4)$$

式中

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \sin \alpha_1 \cos \beta_1 & \sin \alpha_1 \sin \beta_1 \\ \sin \alpha_2 \sin \beta_2 & \cos \alpha_2 & \sin \alpha_2 \cos \beta_2 \\ \sin \alpha_3 \cos \beta_3 & \sin \alpha_3 \sin \beta_3 & \cos \alpha_3 \end{bmatrix}$$

由上述分析可知,用 \mathbf{P}^{-1} 矩阵校正实际接收矩阵 \mathbf{Y} ,可以消除磁传感器由于三轴非理想正交引入的参数定位误差,同时由 \mathbf{P} 也可以求得磁传感器的三轴非理想正交参数。因此,关键是校正矩阵 \mathbf{P} 的求解。

2 校正矩阵 \mathbf{P} 的求解

一般确定 \mathbf{P} 矩阵,须有一个标准磁场,根据标准磁场计算出六自由度电磁跟踪定位系统理想磁传感器的接收矩阵,然后和实际接收矩阵比较,得到 \mathbf{P} 矩阵。但实际上理想标准磁场难以实现,因此结合六自由度电磁跟踪系统,以特定参数条件下的跟踪模型为基础,建立关于 \mathbf{P} 矩阵元素的方程组,进而求解 \mathbf{P} 矩阵。

设系统磁传感器按时序依次激励,接收传感器的姿态角为 $\varphi = \theta = \phi = 0$,此时姿态变换矩阵 \mathbf{H} (\mathbf{H} 定义见文

献[1])为单位矩阵 \mathbf{I} ,测得的实际接收矩阵设为 \mathbf{Y}_0 ,则理论接收矩阵为

$$\mathbf{Y}'_0 = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{Y}_0 \quad (5)$$

当接收传感器的姿态角任意,姿态变换矩阵为 \mathbf{H}_i ,测得的实际接收矩阵为 \mathbf{Y}_i ,则理论接收矩阵为

$$\mathbf{Y}'_i = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{Y}_i \quad (6)$$

因为理论接收矩阵是正交坐标系中的接收矩阵,根据电磁跟踪定位系统的原理有

$$\mathbf{Y}'_i = \mathbf{H}_i\mathbf{Y}'_0 \quad (7)$$

综上,有

$$\mathbf{Y}_i\mathbf{Y}'_0^{-1}\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{H}_i = 0 \quad (8)$$

式(8)中, \mathbf{Y}_i 和 \mathbf{Y}'_0 是测得的实际接收矩阵; \mathbf{H}_i 是已知的姿态变换矩阵; \mathbf{P} 为待求的校正矩阵。选取不同的 \mathbf{H}_i ,就可以得到不同的方程。式(8)为一个矩阵方程,展开后得到 9 个齐次线性方程。由于这 9 个方程并不是线性独立的,而是线性相关的,所以方程的数目还不够。

设传感器的姿态角为 $\varphi = 0, \theta = 0, \phi = 180^\circ$ 姿态变换矩阵为

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

测得的实际接收矩阵为 \mathbf{Y}_1 ;

设传感器的姿态角为 $\varphi = 90^\circ, \theta = 0, \phi = 0$,姿态变换矩阵为

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

测得的实际接收矩阵为 \mathbf{Y}_2 ;

设传感器的姿态角为 $\varphi = 0, \theta = 90^\circ, \phi = 0$,姿态变换矩阵为

$$\mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

测得的实际接收矩阵为 \mathbf{Y}_3 。

将 \mathbf{Y}_1 、 \mathbf{Y}_2 、 \mathbf{Y}_3 、 \mathbf{H}_1 、 \mathbf{H}_2 、 \mathbf{H}_3 分别代入式(8)中,得到以下 3 个矩阵方程

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_1\mathbf{H}_0^{-1}\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{H}_1 &= 0 \\ \mathbf{Y}_2\mathbf{H}_0^{-1}\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{H}_2 &= 0 \\ \mathbf{Y}_3\mathbf{H}_0^{-1}\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{H}_3 &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

记

$$\mathbf{T}^1 = \mathbf{Y}_1\mathbf{Y}'_0^{-1}, \mathbf{T}^2 = \mathbf{Y}_2\mathbf{Y}'_0^{-1}, \mathbf{T}^3 = \mathbf{Y}_3\mathbf{Y}'_0^{-1} \quad (10)$$

将以上 3 个矩阵方程展开,可以得到 27 个齐次线性方程,可以证明,以下几个方程对求解矩阵 \mathbf{P} 有用。

$$T_{21}^1 P_{11} + T_{22}^1 P_{21} + T_{23}^1 P_{31} - P_{21} = 0 \quad (11-1)$$

$$T_{31}^1 P_{11} + T_{32}^1 P_{21} + T_{33}^1 P_{31} - P_{31} = 0 \quad (11-2)$$

$$T_{11}^2 P_{13} + T_{12}^2 P_{23} + T_{13}^2 P_{33} - P_{13} = 0 \quad (11-3)$$

$$T_{21}^2 P_{13} + T_{22}^2 P_{23} + T_{23}^2 P_{33} - P_{23} = 0 \quad (11-4)$$

$$T_{21}^1 P_{11} + T_{22}^1 P_{21} + T_{23}^1 P_{31} + P_{22} = 0 \quad (11-5)$$

$$T_{31}^1 P_{11} + T_{32}^1 P_{21} + T_{33}^1 P_{31} - P_{33} = 0 \quad (11-6)$$

$$T_{11}^3 P_{12} + T_{12}^3 P_{22} + T_{13}^3 P_{32} - P_{12} = 0 \quad (11-7)$$

$$T_{31}^3 P_{12} + T_{32}^3 P_{22} + T_{33}^3 P_{32} - P_{32} = 0 \quad (11-8)$$

由式(11-1)和式(11-2)解得

$$P_{21} = g_{21} P_{11} \tag{12}$$

$$P_{31} = g_{31} P_{11} \tag{13}$$

由式(11-3)和式(11-4)解得

$$P_{13} = g_{13} P_{33} \tag{14}$$

$$P_{23} = g_{23} P_{33} \tag{15}$$

由式(11-7)和式(11-8)解得

$$P_{12} = g_{12} P_{22} \tag{16}$$

$$P_{32} = g_{32} P_{22} \tag{17}$$

将式(12)和式(13)代入式(11-5)、式(11-6),解得

$$P_{22} = g_{22} P_{11} \tag{18}$$

$$P_{33} = g_{33} P_{11} \tag{19}$$

由式(15)、式(17)、式(19)和式(20),结合矩阵 \mathbf{P} 的特性,解得

$$P_{11} = \frac{1}{\sqrt{1 + g_{12}^2 g_{22}^2 + g_{13}^2 g_{33}^2}} \tag{20}$$

从而解得 \mathbf{P} 矩阵的各元素值。其中

$$g_{21} = -\frac{-T_{31}^1 T_{23}^1 + T_{33}^1 T_{21}^1 - T_{21}^1}{T_{22}^1 T_{33}^1 - T_{22}^1 - T_{23}^1 T_{32}^1 - T_{33}^1 + 1}$$

$$g_{31} = \frac{T_{21}^1 T_{32}^1 - T_{22}^1 T_{31}^1 + T_{31}^1}{T_{22}^1 T_{33}^1 - T_{22}^1 - T_{23}^1 T_{32}^1 - T_{33}^1 + 1}$$

$$g_{13} = \frac{-T_{22}^2 T_{13}^2 + T_{23}^2 T_{12}^2 + T_{13}^2}{T_{11}^2 T_{22}^2 - T_{22}^2 - T_{12}^2 T_{21}^2 + 1}$$

$$g_{23} = -\frac{-T_{13}^2 T_{21}^2 + T_{11}^2 T_{23}^2 - T_{23}^2}{T_{11}^2 T_{22}^2 - T_{22}^2 - T_{11}^2 - T_{12}^2 T_{21}^2 + 1}$$

$$g_{12} = -\frac{-T_{32}^3 T_{13}^3 + T_{33}^3 T_{12}^3 - T_{12}^3}{-T_{11}^3 - T_{13}^3 T_{31}^3 + T_{11}^3 T_{33}^3 - T_{33}^3 + 1}$$

$$g_{32} = -\frac{T_{11}^3 T_{32}^3 - T_{32}^3 - T_{12}^3 T_{31}^3}{-T_{11}^3 - T_{13}^3 T_{31}^3 + T_{11}^3 T_{33}^3 - T_{33}^3 + 1}$$

$$g_{22} = -T_{21}^2 - T_{21}^2 g_{21} - T_{23}^2 g_{31}$$

$$g_{33} = T_{31}^3 - T_{32}^3 g_{21} - T_{33}^3 g_{31}$$

3 数值模拟

由于加工工艺和安装技术的影响,三轴非理想正交的角度误差一般在 5° 以内。不妨假设电磁跟踪系统磁传感器三轴非正交参数为

$$\alpha_1 = 1.5^\circ, \alpha_2 = 2^\circ, \alpha_3 = 2.5^\circ$$

$$\beta_1 = 0.8^\circ, \beta_2 = 1.9^\circ, \beta_3 = 3.1^\circ$$

根据三轴磁传感器非理想正交模型的概念,系统理论误差校正矩阵 \mathbf{P} 为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.999\ 6 & 0.026\ 1 & 0.000\ 3 \\ 0.001\ 1 & 0.999\ 3 & 0.034\ 8 \\ 0.043\ 5 & 0.002\ 3 & 0.999\ 0 \end{bmatrix}$$

由特定参数条件下的跟踪模型,式(11)求解的误差校正矩阵 \mathbf{P} 为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.999\ 6 & 0.026\ 1 & 0.000\ 3 \\ 0.001\ 1 & 0.999\ 3 & 0.034\ 8 \\ 0.043\ 5 & 0.002\ 3 & 0.999\ 0 \end{bmatrix}$$

由上述结果,可知通过构建包含系统非正交参数的线性方程组,可以十分准确地求解出误差校正矩阵 \mathbf{P} ,与基于共轭次梯度的迭代算法和神经网络模型相比,非理想正交参数求解的精度大大提高。

将磁传感器的三轴非理想正交参数引入电磁跟踪系统中,在垂直于 X 轴的某个平面沿 Y, Z 轴按一定间隔分别设置了 30 个采样点,图 2 给出了平面上目标 6 个参数的畸变情况。

引入式(11)求解所得的误差校正矩阵 \mathbf{P} 进行校正,校正后参数如图 3 所示,可知引入矩阵 \mathbf{P} 可以校正磁传感器的三轴非理想正交误差,明显提高系统参数精度。

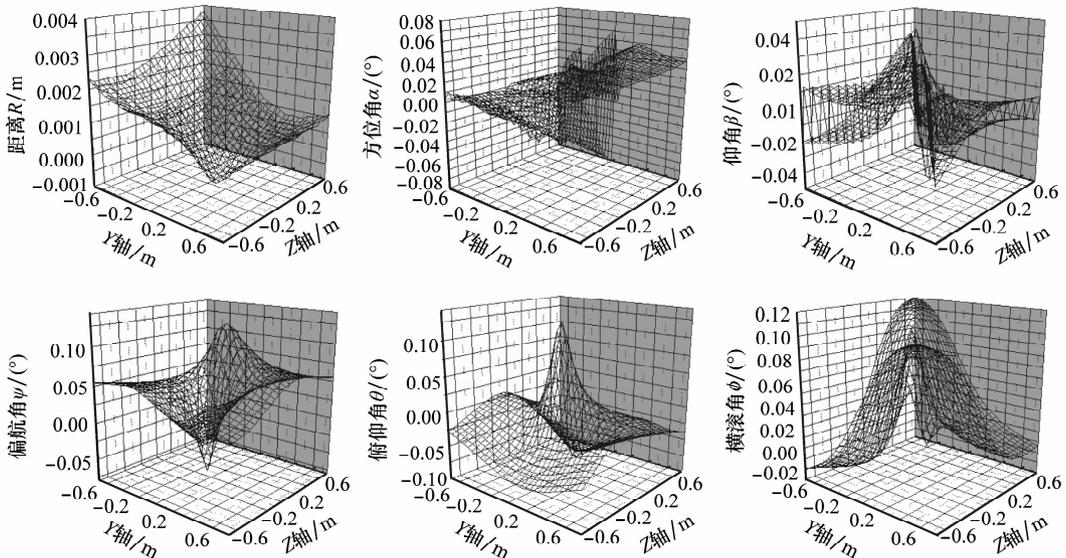


图 2 目标参数畸变

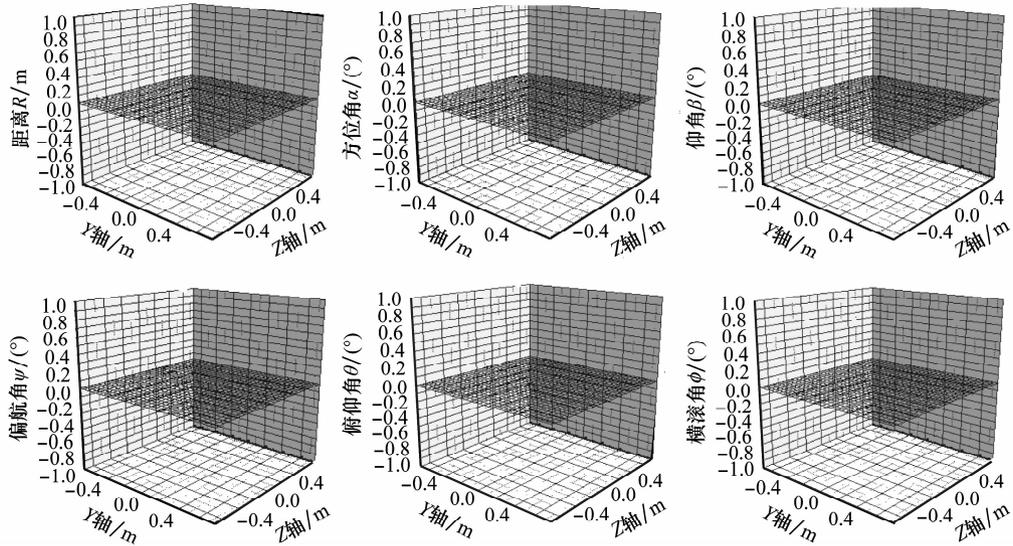


图 3 目标参数校正结果

数值模拟验证了所提方案的正确性,实际应用中,给定姿态角条件下接收矩阵的测量是在高精度实验平台上实现的。高精度实验平台的姿态角采用光学仪器进行校准,精度很高,因此可以认为接收矩阵测量时,实际给定姿态角没有误差,故矩阵 P 计算精度较高。系统高精度实验平台如图 4 所示。

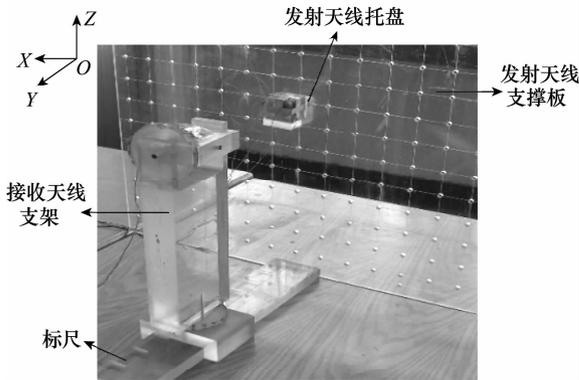


图 4 高精度实验平台

实验平台由发射天线托盘、接收天线支架、支撑板、标尺组成,接收天线嵌于接收天线支架上,支架高度使接收天线中心与发射天线支撑板基孔等高,可满足接收天线全方位偏航、俯仰和横滚变化,如图 5 所示。

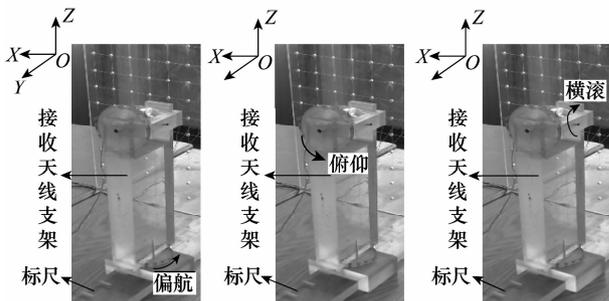


图 5 接收天线姿态变化

每个支架底盘均有刻度,当支架旋转时,可以准确读取接收天线姿态参数。

4 结论

本文根据电磁跟踪系统定位模型原理,建立了系统三轴非理想正交误差校正模型,提出了误差校正矩阵 P 的概念,同时实现了非正交参数的计算和系统误差的校正。通过构建线性方程组的方法计算矩阵 P 的元素,求解方法简单快速、精度较高。数值模拟验证了所提方法的正确性,矩阵 P 可以校正传感器三轴非理想正交引入的系统参数误差,提高目标参数定位精度,并介绍了一套三轴非正交参数测量的高精度实验平台。

参考文献:

[1] Gandelsman M, Kornblau G. Electromagnetic tracker[P]. United States Patent: US7542869B2, 2009.

[2] Hsieh S J, Rash C E, Thomas H, et al. Helmet-mounted display image quality evaluation system[J]. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2003, 52(6): 1838 - 1845.

[3] Cleary K, Zhang H, Glossop N, et al. Electromagnetic tracking for image-guided abdominal procedures: overall system and technical issues[C]// *Proc. of the 27th Annual Conference of the Engineering in Medicine and Biology*, 2005: 6748 - 6753.

[4] Ana L T, Shiva M, Harman B, et al. An experimental test-bed for robot-assisted image-guided minimally invasive lung brachytherapy[C]// *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007: 392 - 397.

[5] Liu Y, Wang Y T, Zhou D. Study on an experimental AC electromagnetic tracking system[C]// *Proc. of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2004: 3692 - 3695.

[6] 郝绚丽,唐庆玉,刘凯. 电磁跟踪器在人体骨骼虚拟现实教学系

- 统中的应用[J]. 北京生物医学工程, 2002, 21(3): 215 - 217. (Hao X L, Tang Q Y, Liu K. An application of flock of birds in virtual practical teaching system of human skeleton[J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2002, 21(3): 215 - 217.)
- [7] Hollerer T, Feiner S, Terauchi T, et al. Exploring MARS: developing indoor and outdoor user interfaces to a mobile augmented reality system [J]. *Computers & Graphics*, 1999, 23(6): 779 - 785.
- [8] Tenmoku R, Kanbara M, Yokoya N. A searable augmented reality system using positioning infrastructures and a pedometer [C] // *Proc. of the 7th IEEE Symposium on Wearable Computers*, 2003: 110 - 117.
- [9] 李军远, 李盛风, 陈宏钧, 等. 基于磁偶极子模型的管道机器人定位技术研究[J]. 电波科学学报, 2006, 21(4): 553 - 557. (Li J Y, Li S F, Chen H J, et al. Localization technique of pipeline robot based on magnetic dipole model[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2006, 21(4): 553 - 557.)
- [10] Roh S G, Choi H R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines[J]. *IEEE Trans. on Robotics*, 2005, 21(1): 1 - 17.
- [11] 邱立军, 林春生. 基于三轴磁传感器运动噪声消除方法的误差分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2001, 16(1): 112 - 114. (Qiu L J, Lin C S. Error analysis on eliminating the motional noise of magnetometer[J]. *Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2001, 16(1): 112 - 114.)
- [12] 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 X D, Hou W S, Zheng X L, et al. Discussion of magnetic dipole model and its location detecting application[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(2): 326 - 329.)
- [13] Lassahn M P, Trenkler G. Vectorial calibration of 3D magnetic field sensor array[J]. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1995, 44(2): 470 - 471.
- [14] Hakkinen L, Ryno J. Measuring sensitivities and orthogonalities of magnetometer sensors in the numijarvi coil hut [C] // *Proc. of the International Workshop on Geomagnetic Observatory Data Acquisition and Processing*, 1990: 37 - 39.
- [15] 胡海滨, 林春生, 龚沈光. 基于共轭次梯度法的非理想正交三轴磁传感器的修正[J]. 数据采集与处理, 2003, 18(1): 88 - 91. (Hu H B, Lin C S, Gong S G. Correction of incompletely orthogonal three axial magnetic sensor by conjugated approximate gradient algorithm[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2003, 18(1): 88 - 91.)
- [16] 李久春. 三轴磁敏传感器误差分析与校正研究[J]. 测控技术, 2008, 27(8): 11 - 13. (Li J C. Error intelligent modeling and adaptive calibration of tri-axial magnetometer[J]. *Measurement and Control Technology*, 2008, 27(8): 11 - 13.)