

基于电磁感应原理的定位跟踪系统电路设计

马奎, 罗益民, 刘伟
(南京工业大学, 南京 211816)

摘要: **目的** 针对包装机器人在工程应用中遇到的定位跟踪方面的问题, 设计一种新型定位跟踪系统。**方法** 基于电磁感应原理, 从硬件电路设计着手设计系统。该系统的激励信号源通过功率放大电路激励发射线圈产生交变磁场, 在接收线圈上产生感应信号。通过前级放大、带通滤波和程控放大等电路, 实现对感应信号调理。将感应信号的幅值带入磁偶极子模型, 计算出传感器的位置信息。**结果** 经实验表明, 电磁定位系统的相对定位精度可达 1.47 mm。**结论** 基于电磁感应原理的定位跟踪系统可满足包装机器人在定位跟踪方面的要求。

关键词: 包装机器人; 定位跟踪; 电磁感应; 幅值; 磁偶极子

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)11-0153-06

Circuit Design of Location Tracking System Based on Electromagnetic Induction Principle

MA Kui, LUO Yi-min, LIU Wei
(Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

ABSTRACT: The work aims to design a new location tracking system with respect to the location tracking problems encountered in the application of packaging robot in the engineering. Based on electromagnetic induction principle, the system was designed starting with hardware circuit design. The excitation signal source stimulated transmitting coil to generate an alternating magnetic field through the power amplifier circuit and a corresponding induction signal was generated in the receiving coil. A preamplifier, a band-pass filter and a programmable amplification were also adopted to achieve the induction signal conditioning. According to the amplitude values of the induction signal put into the magnetic dipole model, the position information of the sensor could be calculated. Experiments showed that the relative positioning accuracy of the electromagnetic positioning system was 1.47 mm. Location tracking system based on electromagnetic induction principle can meet packaging robot's requirements of location tracking.

KEY WORDS: packaging robot; location tracking; electromagnetic induction; amplitude; magnetic dipole

空间位置跟踪技术有很多种, 目前常用的有电磁式^[1-3]、光学式^[4]、射频式^[5]、超声式^[6]、机械式、图像处理和惯性跟踪系统^[7]。电磁定位跟踪技术具有精度高, 设计灵活, 操作简便, 无遮挡, 不受地磁干扰, 定位范围大等优点, 在微创无创手术、物体运动跟踪、虚拟现实^[8-9]、机器人包装^[10-12]等领域有着广泛的应用前景。自动化包装行业是机器人使用最为广泛的行业之一, 其中包括物料分拣、码垛、搬运等。机器人不仅提高了自动化包装机械的工作效率, 并且将自动包装设备提升了一个高度。针对目前工程应用

中包装机器人在定位跟踪方面高精度、高可靠性、高自主性的要求, 需要对机器人的运动信息有高准确地实时反馈, 得到位姿信息^[13], 因此设计了该电磁定位跟踪系统。

1 电磁定位跟踪原理

电磁定位跟踪技术可以检测运动部件的精确位姿信息。3组三轴正交的电感线圈作为激励源置于所测空间中任意位置(文中采用等腰三角形布局), 跟踪目标在有效空间内任意一点, 见图1。通过在激励

收稿日期: 2016-12-13

作者简介: 马奎(1991—), 男, 南京工业大学硕士生, 主攻轨迹定位跟踪。

通讯作者: 罗益民(1958—), 男, 南京工业大学副教授、硕导, 主要研究方向为检测仪器的研发及应用。

线圈上施加一定频率和幅度的电流,在跟踪目标处产生磁场,磁场的大小和方向与所施加在线圈上的电流的大小和方向相关。在目标处放置三轴正交的传感线圈对所在点的磁场进行检测。依次选通激励电感线圈,传感器输出感应电动势,利用接收到的感应电动势,基于磁偶极子模型^[14],见图2,计算出位姿信息。

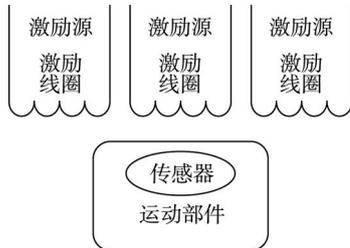


图1 电磁定位原理

Fig.1 Electromagnetic location principle

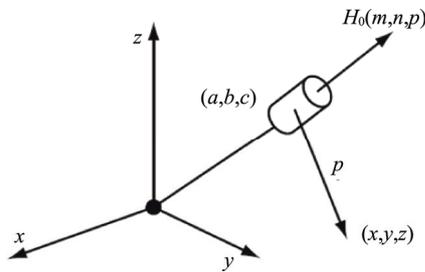


图2 磁偶极子模型

Fig.2 Magnetic dipole model

$$\vec{B} = B_T \left[\frac{3(\vec{m}\vec{r})\vec{r}}{r^5} + \frac{\vec{m}}{r^3} \right] \quad (1)$$

式中: \vec{B} 为磁场强度; B_T 为常量,大小与线圈的匝数、尺寸及激励电流大小有关;发射线圈磁场方向 $\vec{m} = (m, n, p)$,其中 (m, n, p) 为单位向量; $\vec{r} = (x-a, y-b, z-c)$,半径 $r = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2}$; (x, y, z) 为传感器线圈的坐标位置; (a, b, c) 为发射线圈坐标位置; $m^2+n^2+p^2=1$ 。

正交方向三轴分量形式为:

$$\begin{aligned} B_x &= B_T \left(\frac{3(mx-a) + n(y-b) + p(z-c)}{R^5} (x-a) - \frac{m}{R^3} \right) \\ B_y &= B_T \left(\frac{3(m(x-a) + n(y-b) + p(z-c))(y-b)}{R^5} - \frac{n}{R^3} \right) \\ B_z &= B_T \left(\frac{3(m(x-a) + n(y-b) + p(z-c))(z-c)}{R^5} - \frac{p}{R^3} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

通过 LM 算法^[15]便可计算出目标的精确位置。LM 算法融合了梯度下降法和高斯-牛顿迭代,并加入了信任域的方法。定义目标姿态参数为 $P=(x, y, z, m, n, p)$,那么某位置的理论感应电压值可表示为 $\hat{E} = f(P)$,实际测得感应电压值表示为 E ,另 $\varepsilon = E - \hat{E}$,则求解 $E=f(P)$ 的问题转化为使 $\varepsilon\varepsilon^T$ 最小。LM 算法的基础是在 P 的临域内对 f 的线性似,对于很小的 $\|\delta_P\|$,由泰勒展开: $f(P+\delta_P) \approx f(P) + J\delta_P$,其中 J 为雅克比矩阵,

其值为 $\frac{\partial f(P)}{\partial P}$ 。LM 算法是一种迭代算法,每一步都希望找到一个 δ_P 使得误差 $\|E-f(P+\delta_P)\| \approx \|E-f(P)-J\delta_P\| = \|\varepsilon - J\delta_P\|$ 最小。LM 求解过程就转化为一个求解线性最小二乘问题。解方程 $f(P+\delta_P) \approx f(P) + J\delta_P$ 即可得到 δ_P : $J^T J \delta_P = J^T \varepsilon$,其中 $J^T J$ 是 Hessian 矩阵的近似。为了提高 LM 算法的收敛速度,实际求解的方程为 $N\delta_P = J^T \varepsilon$,其中 $N = J^T J + \mu I$, I 为单位矩阵, $\mu_i > 0$ 称为阻尼项,它可以调节迭代的速度,还可以消除 N 的奇异性。在最开始迭代的时候, $\mu_i = k[J^T J]_{ii}$, $k \ll 1$ 为常数。如果当前的迭代值距离最优解很远,增大 μ_i 就可使收敛速度加快;如果当前的迭代值距离最优解很近,减小 μ_i 的值就可以提高精度。在迭代过程中,若 $\|E-f(P+\delta_P)\| < \|E-f(P)\|$,则 δ_P 更新 P ,同时减小 μ_i 的值,进入下一次迭代。否则增大 μ_i 的值,重新计算 δ_P 。直至满足中止条件。由于 LM 算法是局部最优算法,不能保证全局收敛。所以在实际跟踪过程中,该次计算的迭代初值采用上次计算的结果,这样可以减少迭代次数,加快计算速度,同时能保证计算中收敛到全局最优解。

2 电磁定位跟踪系统的整体结构

电磁定位跟踪系统的整体结构见图3,由激励信号的产生、放大与发射,感应信号的接收与调理,感应信号的采集与处理,轨迹跟踪显示等部分组成。

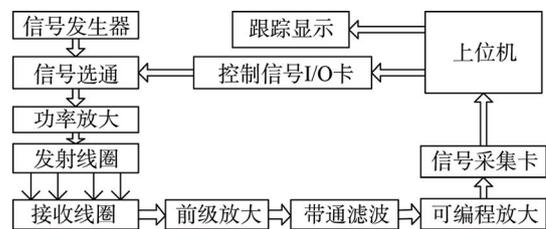


图3 电磁定位跟踪系统结构

Fig.3 Structure diagram of electromagnetic location tracking system

3 电磁定位跟踪系统设计

3.1 激励信号的产生

针对电磁定位跟踪系统的要求,设计了一种基于 AD9850 的激励信号源,AD9850 采用直接数字合成(DDS)技术,内含可编程 DDS 系统和高速比较器,可实现全数字编程控制的频率合成。同时不需要改动外围电路,可实现频率和幅值可调,较 MAX038 等模拟信号发生器,其受外界影响较小,输出信号稳定,信噪比高。电路图见图4。控制单元 STM32 将信号的频率、幅值送至 AD9850 转换为正弦波,输出波形再经低通滤波电路滤除谐波分量,产生需要的正弦激励信号源,信号频率 2.5 kHz,幅值 1 V,波形见图5。

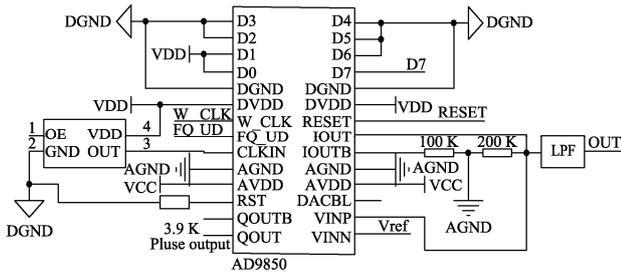


图 4 AD9850 原理
Fig.4 Schematic diagram of AD9850

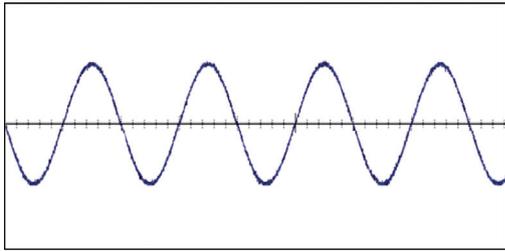


图 5 激励源信号
Fig.5 Excitation source signal

3.2 功率放大

AD9850 产生的正弦激励信号需要进行一定的功率放大并通过发射线圈发出,发射线圈采用三轴正交

方式,用漆包线绕制而成,线圈半径 16 mm,漆包线直径 0.18 mm,每轴 300 匝。该电磁定位跟踪系统采用 TPA3116D2 芯片进行功率放大,电路见图 6。芯片采用 24 V 电源供电,具有 AM 干扰抑制功能的无滤波器 D 类立体声放大器,具有过压、欠压、过热、直流检测和短路等保护电路,MUTE 引脚输出静音信号进行快速禁用/启用,通过数据采集卡的 DIO 控制 NEC2501 的通断,进而通过 MUTE 引脚控制芯片的开通与关断,达到对线圈进行选通的目的。放大后结果见图 7。

3.3 前级放大

接收探头同样采用三轴正交的方式,接收线圈同样采用漆包线绕制而成,线圈半径为 8 mm、漆包线直径 0.08 mm、每轴 1600 匝,为了增大磁导率,接收线圈内加入了磁芯。根据电磁感应定律(放在变化磁通量中的导体,会产生电动势):变化的磁场信号在三轴接收线圈上会产生感应电动势,根据此电动势的值可计算出磁感应强度,进而进行定位跟踪的相关计算。由于接收到的信号十分微弱,所以需采用 AD620 对接收到的微弱感应电动势进行前级放大,电路见图 8,AD620 是一个低成本,高精度的仪表放大

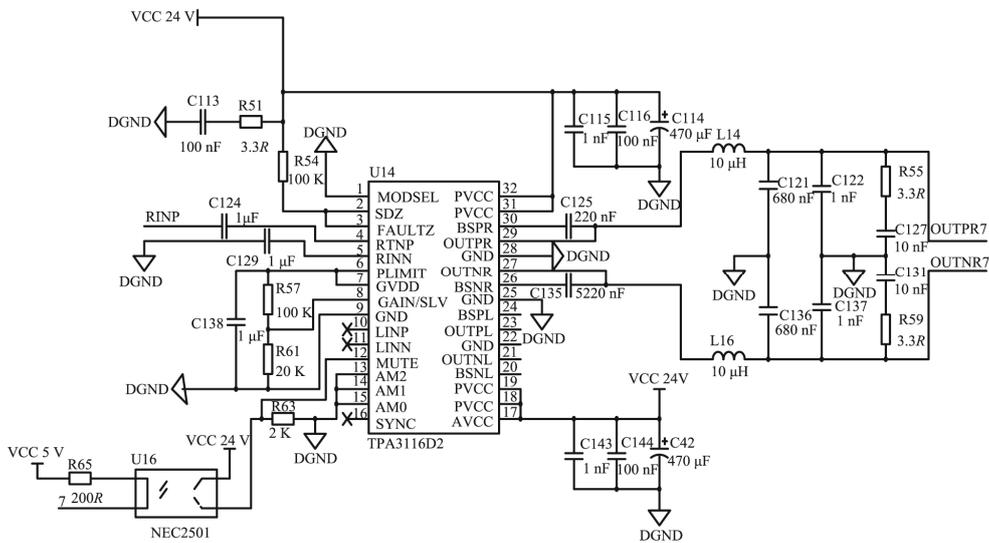


图 6 功率放大电路
Fig.6 Power amplifier circuit

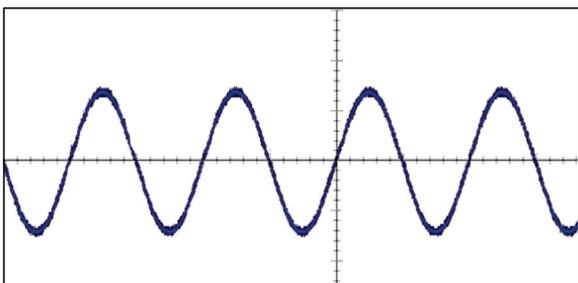


图 7 功率放大后波形
Fig.7 Power amplified waveform

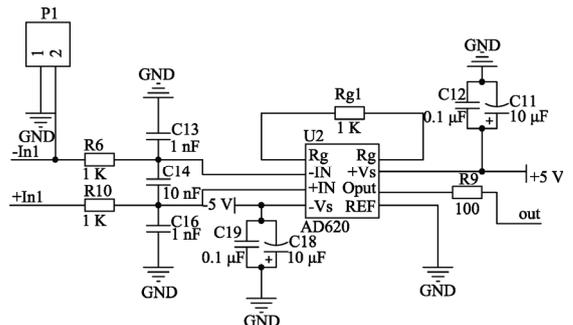


图 8 前级放大电路
Fig.8 Preamplifier circuit

器,使用方便,仅需要使用一个外部电阻即可设置增益。其放大倍数为 1~1000。其增益 G 为: $G = \frac{49.4}{R_G} + 1$ 。通过调节 R_G 的值,可以调节 AD620 的放大倍数,接受信号经前级放大后波形见图 9。

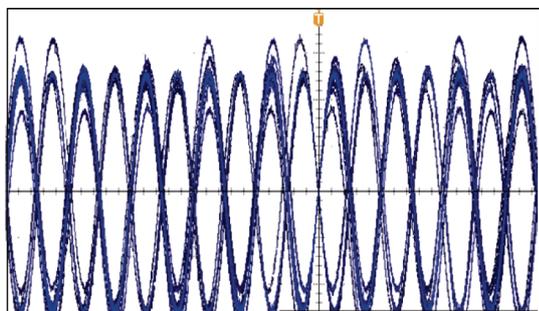


图 9 前级放大波形
Fig.9 Preamplifier waveform

3.4 带通滤波

接收和放大后的感应信号中除了包含与激励信号同频率的有效信号外还存在众多噪声,如工业现场具有电磁干扰较强的场合,由于发射信号与接受信号具有相同的频率,因此可以通过带通滤波将工业现场电磁干扰等噪声滤除,从而得到感应信号值,电路见图 10。UAF42 是一款高集成度有源滤波器,具有设计方便、使用灵活的特点。系统通过选择 UAF42 的 B-Vo 来实现带通功能,以此来获得 2.5 kHz 的感应信号。中心频率 $\omega_n^2 = \frac{R_2}{R_1 R_{F1} R_{F2} C_1 C_2}$ 及品质因数

$$Q = \frac{1 + \frac{R_4(R_G + R_Q)}{R_G R_Q}}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \left(\frac{R_2 R_{F1} C_1}{R_1 R_{F2} C_2} \right)^{1/2}$$

值的计算。式中: R_1

与 R_2 为固定值且相等; C_1, C_2 也为固定值。通过增大 $R_{F1} \times R_{F2}$ 即可减小中心频率,减小 $R_{F1} \times R_{F2}$ 即可增大中心频率。当用 R_{F1} 与 R_{F2} 调节好中心频率后,通过调节 R_G 与 R_Q 来调节 Q 值。滤波后波形见图 11。

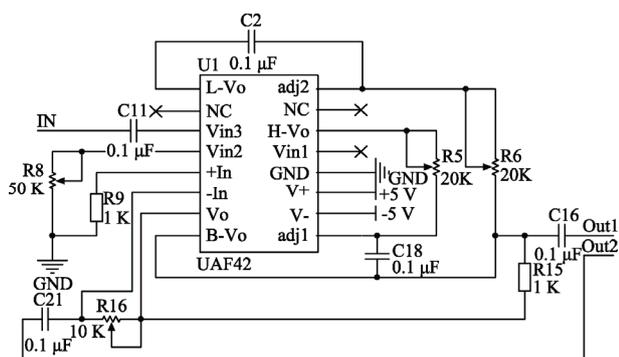


图 10 带通滤波电路
Fig.10 Band-pass filter circuit

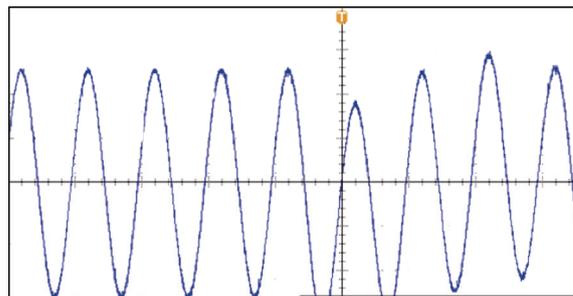


图 11 带通滤波波形
Fig.11 Band-pass filter waveform

3.5 可编程放大与信号采集

磁场信号随着距离的增加衰减很快,随着移动目标(接收线圈)距离发射线圈距离的增大,感应电动势的值也会迅速衰减,因此需要将滤波后的电压信号进行倍数放大,这样需要使用可编程放大器件。设计选用芯片 AD8231 进行信号的可编程放大,见图 12。AD8231 采用 ±2.5 V 供电,通过控制 A10, A11, A12 脚的高低电平来实现 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 和 128 的不同放大倍数。该系统采用 PCI8621 数据采集卡对感应信号进行采集,同时通过其自身的 DIO 来控制发射线圈的选通和 AD8231 的放大倍数,其中线圈选通的时间间隔越短越好,这样可以有效的跟踪到高速运动物体,当遇到多目标跟踪时,需增加接收线圈的个数。采用 DMA(直接存储器存取)方式进行数据采集,设置采样频率为 2.4 kHz,将采集到的正弦信号进行拟合计算得到电压幅值,并将电压幅值上传至上位机上进行计算处理,并将得到的位置信息在屏幕上显示。

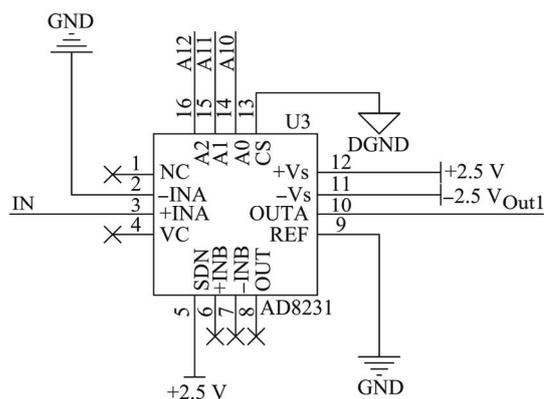


图 12 可编程放大电路
Fig.12 Programmable amplification circuit

4 系统软件设计

经 STM32 驱动 DDS 产生稳定的正弦信号,设定输出正弦波频率为 2.5 kHz,幅值为 1 V。通过发射、接收等过程,将数据采集卡采集到的感应电动经幅值提取算法处理得到传感线圈在空间坐标系中的实时

幅值。利用 LM 算法进行相关的迭代运算，迭代次数设为 200 次。其中 LM 算法是局部最优算法，不能保证全局收敛，所以在实际跟踪中该次计算初值采用上次计算值进行迭代，不仅能加快迭代速度，还能保证全局最优。当满足误差值远小于设定误差或达到最大迭代次数时，终止迭代，系统将输出具体的传感器位置信息，并通过上位机图形界面进行显示跟踪。系统软件流程见图 13。

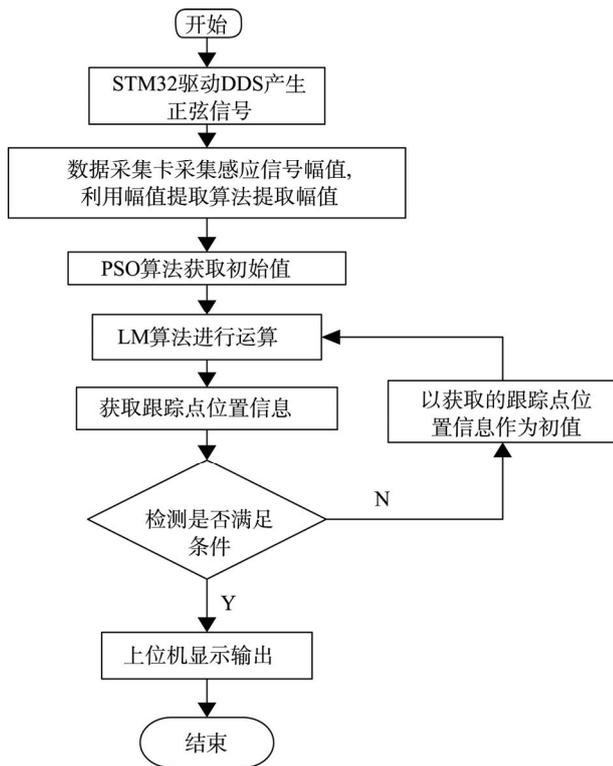


图 13 系统软件设计流程
Fig.13 System software design flow diagram

5 实验结果与分析

在 3 组发射线圈所在平面建立三维直角坐标系，通过分时给每组线圈通入 2.5 kHz 正弦交流信号产生交变的磁场，测得传感线圈感应电动势后进而得到传感器线圈的位置信息。为了便于观察，选取接收传感线圈在 $z=0.1123\text{ m}$ 处，在矩形范围内的 25 个点进行测试，经计算，所测点在正交 x 轴方向的平均误差为 0.65 mm，在正交 y 轴方向的平均误差为 1.01 mm，在正交 z 轴方向的平均误差为 0.53 mm，实测点位置与理论值的平均误差计算公式 $E = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}$ ，其中 (x, y, z) 为实际坐标值， (x_i, y_i, z_i) 为系统测量值，经计算相对误差平均值可达到 1.47 mm，结果见图 14。

为了便于观察，对所测点的真实位置与测试结果进行了模拟，在 x 轴、 y 轴位置上的对比见图 15。同

时，移动目标的 3D 跟踪轨迹及实物见图 16。

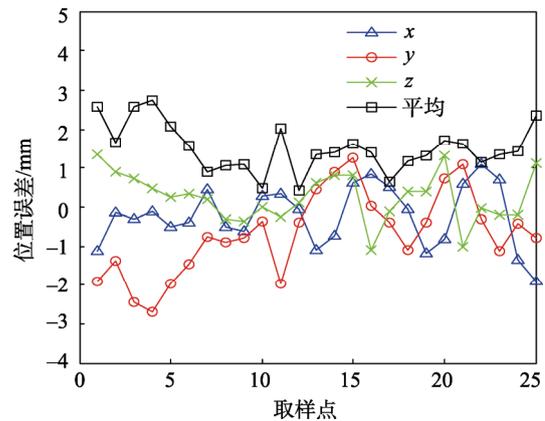


图 14 位置误差
Fig.14 Position error

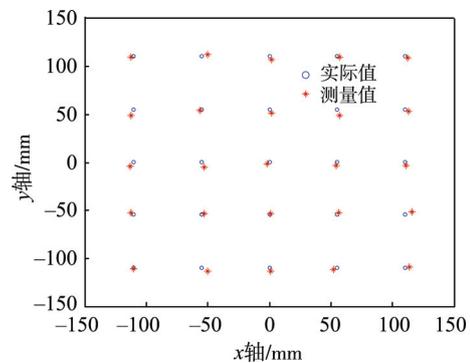


图 15 x/y 轴位置
Fig.15 x/y-axis position plot

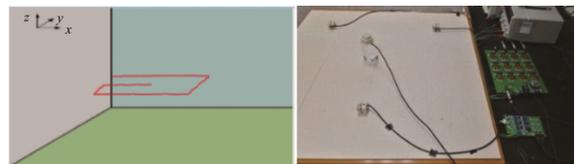


图 16 3D 跟踪轨迹及实物
Fig.16 3D tracking trajectory and physical map

6 结语

从电磁定位的基本原理出发，设计了一套电磁定位跟踪系统。主要完成系统激励源信号的产生、功率放大电路和微弱信号提取电路的模块设计，通过相关定位算法，实现了对移动目标的定位跟踪。系统测试结果表明，在包装机器人可达到的工作空间中，系统定位精度较高，在包装机器人定位跟踪的应用中有一定参考价值。

参考文献：

[1] HU C, SONG S, WANG X, et al. A Novel Positioning and Orientation System Based on 3-axis Magnetic Coils[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012,

- 48(7): 2211—2219.
- [2] 侯文生, 郑小林, 彭承琳, 等. 体内微型诊疗装置磁定位简化模型的实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(9): 895—897.
HOU Wen-sheng, ZHENG Xiao-lin, PENG Cheng-lin, et al. Study of Simplified Magnetic-location Model for Micro Medical Device inside Human Body[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(9): 895—897.
- [3] 李金, 郑小林, 侯文生, 等. 一种用于消化道内微型装置磁定位的非线性方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 3(3): 895—897.
LI Jin, ZHENG Xiao-lin, HOU Wen-sheng, et al. Non-linear Method Used for Magnetic Localization of Micro-Medical Device in Human Gastrointestinal Tract[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 3(3): 895—897.
- [4] 王豫, 俞超, 张丰全. 双平面导航机器人系统在不同骨科适应症中的应用研究[J]. 机器人, 2007, 29(3): 200—206.
WANG Yu, YU Chao, ZHANG Feng-quan. Application of the Dual planar Navigation Robot System in Different Orthopedic Indications[J]. Robot, 2007, 29(3): 200—206.
- [5] 孙瑜, 范平志. 频识别技术及其在室内定位中的应用[J]. 计算机应用, 2005(5): 1205—1209.
SUN Yu, FAN Zhi-ping. RFID Technology and Its Application in Indoor Positioning[J]. Journal of Computer Application, 2005(5): 1205—1209.
- [6] SAAD M M, BLEAKLEY C J, BALLEL T, et al. High-accuracy Reference-Free Ultrasonic Location Estimation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(6): 1561—1570.
- [7] HEG R O, HALLINGSTAD O. Model-aided INS with Sea Current Estimation for Robust Underwater Navigation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011, 36(2): 316—337.
- [8] 师晓宙, 胡超, 向望华, 等. 用于骨科手术机器人的电磁定位方法[J]. 传感技术学报, 2011, 24(11): 1569—1573.
SHI Xiao-zhou, HU Chao, XIANG Wang-hua, et al. An Electromagnetic Locating Method for Orthopedic Surgery Robot[J]. Journal of Transduction Technology, 2011, 24(11): 1569—1573.
- [9] 徐彤, 王涌天. 虚拟现实系统中六自由度电磁跟踪算法的改进[J]. 传感技术学报, 2000(3): 204—210.
XU Tong, WANG Yong-tian. A Improvement of the Algorithm for Six Degree-of-Freedom Electromagnetic Tracking System[J]. Journal of Transduction Technology, 2000(3): 204—210.
- [10] 肖艳. 机器人在包装自动化领域发展势头强劲[J]. 中国包装工业, 2014(3): 6—22.
XIAO Yan. Robots in the Field of Packaging Automation Development Momentum is Strong[J]. China Packaging Industry, 2014(3): 6—22.
- [11] 李博, 林岳凌, 谭振豪. 基于直角坐标机器人的计量封印自动化包装装置[J]. 轻工机械, 2014, 32(4): 77—79.
LI Bo, LIN Yue-ling, TAN Zhen-hao. Automatic Packing Device of Seal Based on Cartesian Robot[J]. Light Industry Machinery, 2014, 32(4): 77—79.
- [12] 陈志刚, 赵志刚, 苟向锋. 一类鸡蛋包装机器人系统设计及运动分析[J]. 兰州交通大学学报, 2012, 31(1): 69—72.
CHEN Zhi-gang, ZHAO Zhi-gang, GOU Xiang-feng. Design and Motion Analysis of a Kind of Egg Packaging Robot System[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2012, 31(1): 69—72.
- [13] 韩建达, 宋国立, 赵忆文, 等. 脊柱微创手术机器人研究现状[J]. 机器人技术及应用, 2011, 4(7): 1004—6437.
HAN Jian-da, SONG Guo-li, ZHAO Yi-wen, et al. Research Status of Spinal Minimally Invasive Surgical[J]. Robot Technology and Application, 2011, 4(7): 1004—6437.
- [14] 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): 895—897.
WU Xu-dong, HOU Wen-sheng, ZHENG Xiao-lin, et al. Discussion of Magnetic Dipole Model and Its Location Detecting Application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(2): 895—897.
- [15] 王炳莹. LM 优化算法和神经网络预测控制在非线性系统中的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
WANG Bing-xuan. Research on LM Optimization Algorithm and Neural Network Predictive Control in Nonlinear System[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.