

磁定位系统中传感器阵列布局优化研究*

俞浙君 刘璐 高子博 孔明

(中国计量大学计量测试与仪器学院 杭州 310018)

摘要: 目前关于磁定位系统的传感器阵列布局研究主要围绕传感器数量和间距展开,相关研究中传感器阵列布局一般采用均匀分布的方式,并未深入研究传感器阵列空间设计对系统定位精度的影响。针对磁定位系统中传感器阵列非均匀分布研究,提出了一种基于遗传算法结合有限元仿真的优化方法,该方法能够根据特定的永磁体运动轨迹确定对应的最优传感器布局。首先,建立仿真模型进行磁定位过程的数值模拟,通过遗传算法优化得到了每个目标运动轨迹对应的传感器阵列布局。其次,在仿真优化的基础上,设计并搭建了可自由调整磁传感器安装位置的磁定位系统实验台。最后,在5个特定的永磁体运动轨迹下,分别对采用传感器均匀分布与优化后非均匀分布的磁定位系统进行了对比实验,以布局5为例,优化布局后的磁定位系统平均定位误差比优化前减小了14.3%,平均定向误差比优化前减小了16.3%。结果表明均匀分布的传感器阵列并非最佳的布局方案,优化传感器阵列布局能够有效提高系统定位及定向精度。

关键词: 磁定位技术;布局优化;遗传算法;有限元仿真

中图分类号: TN98;TP212

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.40

Optimization of the sensor array layout for magnetic positioning system

Yu Zhejun Liu Lu Gao Zibo Kong Ming

(School of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Current research on sensor array layout in magnetic positioning systems primarily focuses on quantity and spacing. In related research, the sensor array layout is typically evenly distributed, with limited investigation into the impact of spatial design on system positioning accuracy. Addressing the non-uniform distribution of sensor arrays in magnetic localization systems, this paper proposes an optimization method combining genetic algorithms with finite element simulations. This method determines the optimal sensor layout based on specific trajectories of magnetic targets. Firstly, a simulation model was established for numerical simulation of the magnetic positioning process, and the sensor array layout corresponding to the motion trajectory of each target was optimized by genetic algorithms. Secondly, based on the simulation optimization, an experimental platform for magnetic positioning systems with adjustable sensor installation positions was designed and constructed. Finally, comparative experiments were conducted on five specific magnetic target trajectories using both uniformly distributed and optimized non-uniformly distributed sensor layouts. For example, under trajectory five, the average positioning error of the optimized layout is reduced by 14.3% compared to the pre-optimization layout, and the average orientation error is reduced by 16.3%. The results indicate that uniformly distributed sensor array is not the optimal layout, and optimizing sensor array layout can effectively improve system localization and orientation accuracy.

Keywords: magnetic positioning technology; layout optimization; genetic algorithms; finite element simulation

0 引言

随着我国经济和社会的持续发展,定位技术的精度需求越来越高,研究和开发高性能的定位技术对于推动我国的经济和社会发展、推进科技进步等都有着重要的意义,实现对目标的实时定位、方向跟踪以及自动控制在各个领域都十分关键。常用的定位方法包括惯性定位^[1]、超声定位^[2]、射频定位^[3]、视觉定位^[4-5]及磁定位^[6]等,每个方法都有各自的优点和局限性。其中,磁定位方法具有时间分辨率高、不会对人体造成伤害、不受遮挡影响等优点,在室内导航、智能交通、智慧医疗等领域具有广泛的应用前景。以永磁体为磁源的磁定位技术,通过磁传感器阵列获得被测目标的磁场信息,再使用反演算法将传感器位置信息和目标磁场信息进行融合并计算出目标的位置和姿态,实现对目标的定位跟踪。

磁定位精度不仅与磁传感器的性能、信号采集系统的性能、定位算法的性能相关,还受到传感器数量与布局影响。为了提高磁定位系统的定位精度,科研人员对传感器布局优化方法进行了研究。Su 等^[7]通过仿真和实验研究发现磁体与传感器阵列的距离与跟踪精度之间的关系可以用一个三次多项式方程表示,与磁体的特性和传感器输出的信噪比有关,当磁铁位于传感器阵列上方 36~96 mm 的距离时,系统的性能最好,平均定位和方向误差分别为 0.70 mm 和 1.22°。Shao 等^[8]提出了根据传感器测量信噪比确定传感器最佳分布间距的优化策略,通过仿真验证了测量信噪比与距离估计精度之间的关系,确定了传感器最佳分布间距为 40 mm,定位误差的均方根从 0.052 9 mm 减小到 0.036 4 mm,方位误差从 17.3°减小到 13.7°。上述研究证明了基于均匀分布情况下,对传感器的间距进行了调整能够有效提高定位精度,并未探讨非均匀布局对系统定位精度的影响。随着研究的深入,有科研人员对传感器阵列非均匀布局的优化效果进行了研究与验证,Marechal 等^[9]提出了两种方法:一种均匀分布的网格法,另一种基于遗传算法,对二维空间的传感器阵列布局进行了优化,系统定位均方误差从 1.6 mm 降低到 1 mm,最大误差也从 4.1 mm 显著减小到 1.8 mm。Song 等^[10]提出了一种基于网格方法的传感器布局策略及其优化方法,通过限定布局优化条件缩减了传感器布局方案数量,优化后系统的平均位置和角度误差分别为 1.4 mm 和 3.4°。

磁定位技术外的其他研究领域也对传感器布局展开了研究。高钱豪等^[11]提出了一种面向电磁频谱环境地图重构的传感器布局和优化方法,可以用于辅助真实环境下频谱数据的高效采集和频谱地图的精确构建。汪涛^[12]以复杂天气条件下的高维土壤相对含水率数据为

研究对象,进行茶园土壤墒情传感器布局优化研究,可以降低传感器的数据冗余度,减少传感器的投入数量,并精准获取土壤相对含水率信息。郭延宁等^[13]针对挠性航天器振动抑制中的作动器优化配置问题,提出一种新型的复合优化指标,在完成振动抑制的同时,有效缩减作动器电缆长度,减小航天器能量损耗及电磁干扰,并采用遗传算法完成作动器布局优化。

综上所述,优化传感器阵列布局对提高磁定位系统的检测精度有重要意义。因此,提出了一种遗传算法结合有限元仿真的优化方法,针对三维空间中不同的永磁体运动轨迹进行传感器阵列布局优化。从磁定位技术的理论基础出发,对磁定位系统模型进行推导和建立,通过 COMSOL Multiphysics 建立仿真模型进行磁定位过程的数值模拟,利用遗传算法优化得到每个目标运动轨迹对应的传感器阵列布局,分别对采用传感器均匀分布与优化后非均匀分布的磁定位系统进行了对比实验,针对所提方法的有效性进行验证。

1 磁定位技术原理

1.1 磁定位系统磁场模型

描述空间中磁场分布模型的方法主要有等效磁荷法、等效电流法、磁偶极子法等。其中,磁偶极子模型可以准确地描述小尺寸闭合回路产生的磁场分布情况^[14],相较于其他两种方法,运算简单,适合用来求解磁定位系统中永磁体位姿。

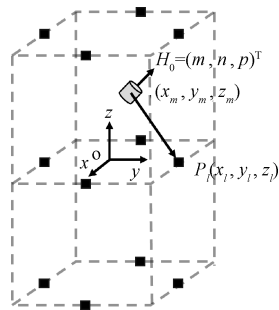


图 1 基于传感器阵列的磁偶极子模型

Fig. 1 Magnetic dipole modeling based on sensor arrays

当磁体的尺寸远小于磁体与传感器之间的距离时,可以用磁偶极子模型来表示磁体产生的磁场^[15],以磁定位系统中心为原点建立系统坐标系的磁场模型如图 1 所示。图中, (x_m, y_m, z_m) 为永磁体在空间中的位置, $\mathbf{H}_0 = (m, n, p)^T$ 为永磁体的姿态, (x_i, y_i, z_i) 为传感器 p_i 的空间位置。

假设传感器阵列共有 N_s 个磁传感器,基于上述模型,高度为 h 、半径为 r 的圆柱形永磁体产生的磁场在第

l 个传感器 ($1 \leq l \leq N_s$) 处的磁场强度可表示为:

$$\mathbf{B}_l = B_{lx}\mathbf{i} + B_{ly}\mathbf{j} + B_{lz}\mathbf{k} = B_r \left(\frac{3(\mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{P}_l)\mathbf{P}_l}{R_l^5} - \frac{\mathbf{H}_0}{R_l^3} \right) \quad (1)$$

其中, $B_r = \mu_r \mu_0 \pi r^2 h M_0 / 4\pi$, 是一个由永磁体的材料和尺寸决定常数, 用于表征磁场强度, μ_r 为介质相对磁导率 (空气中 $\mu_r \approx 1$), μ_0 为真空磁导率 $4\pi \times 10^{-7} / (\text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1})$, M_0 为永磁体的磁化强度。 $\mathbf{P}_l = (x_l - x_m, y_l - y_m, z_l - z_m)^T$ 是传感器空间位置指向永磁体空间位置的空间

向量, 传感器与永磁体之间的距离可以表示为:

$$R_l = \sqrt{(x_l - x_m)^2 + (y_l - y_m)^2 + (z_l - z_m)^2} \quad (2)$$

1.2 反演算法

永磁定位方法实现包括两个关键部分: 永磁体和磁传感器阵列。永磁体作为磁场源, 磁场信息用磁传感器阵列来获取。式(1)中, B_{lx}, B_{ly}, B_{lz} 分别为第 l 个 3 轴磁传感器在 x, y, z 轴方向上输出的 3 个正交方向的磁场强度分量, 可表示为:

$$\begin{cases} B_{lx} = B_r \left\{ \frac{3[m(x_l - x_m) + n(y_l - y_m) + p(z_l - z_m)](x_l - x_m)}{R_l^5} - \frac{m}{R_l^3} \right\} \\ B_{ly} = B_r \left\{ \frac{3[m(x_l - x_m) + n(y_l - y_m) + p(z_l - z_m)](y_l - y_m)}{R_l^5} - \frac{n}{R_l^3} \right\} \\ B_{lz} = B_r \left\{ \frac{3[m(x_l - x_m) + n(y_l - y_m) + p(z_l - z_m)](z_l - z_m)}{R_l^5} - \frac{p}{R_l^3} \right\} \end{cases} \quad (3)$$

第 l 个传感器处的磁场强度可描述为: $\mathbf{B}_l = f(x_m, y_m, z_m, m, n, p, x_l, y_l, z_l)$, f 为向量函数。为了求解位置参数, 假设 (B_{lx}, B_{ly}, B_{lz}) 为传感器测得磁场强度值, $(B'_{lx}, B'_{ly}, B'_{lz})$ 为磁场强度估计值, 定义目标误差函数为 E 。

$$E = \sum_{l=1}^N (B_{lx} - B'_{lx})^2 + \sum_{l=1}^N (B_{ly} - B'_{ly})^2 + \sum_{l=1}^N (B_{lz} - B'_{lz})^2 \quad (4)$$

磁定位系统通过最小化累积误差函数求解出目标永磁体的位姿参数 $\boldsymbol{\zeta} = (x_m, y_m, z_m, m, n, p)^T$:

$$\hat{\boldsymbol{\zeta}} = \argmin E \quad (5)$$

在传感器 p_l 位置 (x_l, y_l, z_l) 、永磁体位姿 (x_m, y_m, z_m) 已知情况下, 可以通过磁场强度公式求解空间中某点的磁场强度值。同理, 通过磁传感器测得磁场强度值 $\mathbf{B}_l$, 可以求解永磁体的位置 (x_m, y_m, z_m) 和姿态 $\mathbf{H}_0 = (m, n, p)^T$ 。由于使用的是轴向磁化的永磁体, 当磁铁绕其中心轴旋转时不会引起磁场变化, 磁体的姿态 $\mathbf{H}_0$ 为二维参数, 因此要实现磁定位至少需要 5 个及以上单轴磁传感器或两个及以上三轴磁传感器, 并添加约束条件 $m^2 + n^2 + p^2 = 1$ 。

常用的反演算法有列文伯格-马夸尔特算法 (levenberg-marquardt, LM)、粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)、梯度下降法 (gradient descent, GD) 等, 考虑到实时性能和精度, 选择 LM 算法进行求解^[16]。

2 传感器阵列布局优化方法

通过网格法优化传感器布局, 可以帮助研究人员找到最合适的传感器布局, 以满足特定的性能要求和约束条件, 提高系统的定位性能和效率。其基本思想是将待布局传感器的区域划分为网格, 然后在每个网格顶点放

置传感器, 并评估每种布局的优劣^[17]。在 N 个网格上放置 N_s 个磁传感器, 会有 $C_N^{N_s}$ 种传感器阵列布局方案, 数量十分庞大, 基于枚举思想的网格法适合解决一些小型和简单的优化问题, 所以在大规模和复杂的传感器布局优化问题中, 需要使用启发式算法或优化算法来解决。

2.1 基于遗传算法优化传感器阵列布局

在遗传算法 (genetic algorithms, GA) 中, 个体被称为基因组, 个体的载体被称为基因, 群体代表一系列基因的组成。GA 通过进化将其他基因的优秀部分结合起来, 从而构建更好的基因, 类似于生物学中的基因重组。通过模拟自然选择和遗传机制, 评估种群中个体的适应度值来进行优化。GA 使用基因编码表示问题的解, 通过交叉、变异和选择等操作来生成新的解, 通过迭代优化逐步逼近最优解。

在网格法的基础上, 通过 GA 将待布局传感器的区域离散为节点来减小搜索空间, 每个节点都可以布局传感器。考虑到传感器电路板体积限制和安装条件, 将尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的磁定位腔体的 4 个面划分成 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 大小的网格, 将节点按照从左到右、从上到下的顺序进行编号, 由于最外圈网格顶点在实际系统中很难固定传感器, 因此编号不包含最外圈网格顶点, 最终共有 144 个节点可安装传感器。基于网格法的传感器阵列空间设计方法的示意图 (以第 1 面为例) 如图 2 所示, 白点为传感器可安装点, 黑点为传感器安装点。

优化流程如下:

1) 编码: 为了防止进行交叉变异的时候导致传感器数量的改变, 采用二重结构编码^[18]来对传感器布局进行编码, 由表示传感器可安装位置编号的附加码和用 0/1 表示是否在该位置安装传感器的变量码组成。其中编码

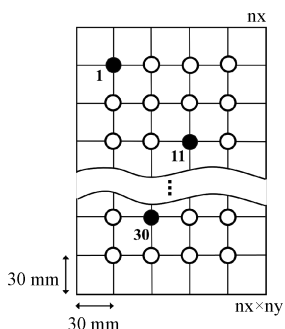


图 2 传感器阵列空间设计方法

Fig. 2 Approaches in spatial sensor array configuration

长度为 n , 表示系统采用的传感器数量, “1” 表示该节点安装传感器, “0” 表示该节点不安装传感器。示例如下: 在编号为 1, 11, 30 的位置上安装传感器, 则上述点置 “1”, 其余点置 “0”, 以输出的二重编码表示传感器安装布局。

2) 选择、变异、交叉: GA 通常从随机生成的初始基因种群开始, 计算每个基因的适应度值, 并根据适应度值选择优秀个体; 交叉是一个群体中的两个基因交换部分基因组以产生新的第 3 个基因的过程; 变异是基因中基因组的随机替换。平均定位、定向误差是 GA 交叉变异的依据, 交叉变异原理如图 3 所示。

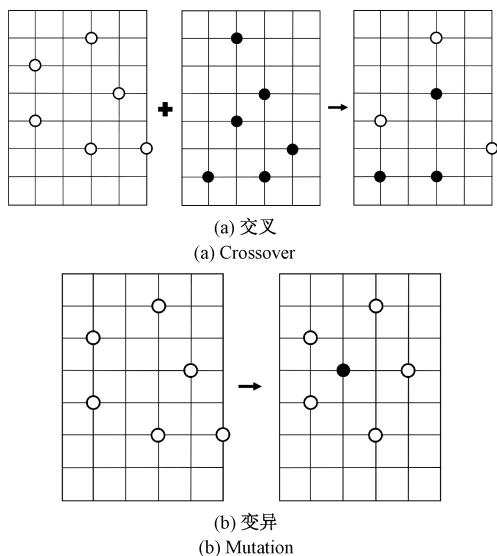


图 3 交叉、变异原理图

Fig. 3 Schematic diagram of crossover and mutation

选择算子设计: 采用轮盘赌选择筛选个体, 个体的选择概率与其适应度成正比, 从当前种群中选择适应度较高的个体, 并确定其参与繁殖的概率。选择概率 $P(X_i)$ 为:

$$P(X_i) = \frac{f(X_i)}{\sum_{j=1}^{N_S} f(X_j)} \quad (6)$$

其中, $f(X_i)$ 表示 X_i 的适应度值。

交叉算子: 因为采用二重结构编码, 为了不让附加码重复, 所以采用双切点交叉, 通过交换两个个体的附加码来生成新的子代个体, 选择两个父体中的两个交叉点, 然后交换交叉点间的编码部分。

变异算子: 为了保证传感器数量保持不变, 所以变量码保持不变, 仅对附加码引入变异, 在父体中选择两个变异点进行附加码重新排列。

2.2 遗传算法结合仿真优化布局

通过遗传算法将磁定位系统的空间离散为 144 个可以安装磁传感器的节点, 通过实验同时采集这些位置处的磁场强度需要数量庞大的磁传感器, 以及冗余且复杂的硬件电路设计和高昂的成本。通过 COMSOL Multiphysics 有限元仿真模拟实验过程, 可实现同时采集所有节点处的磁场强度信息, 再将这些数据导入到优化算法中, 对磁传感器阵列布局进行优化, 达到简化实验进程的目的。图 4 是遗传算法结合 COMSOL 静磁场仿真优化磁传感器阵列布局原理流程图。

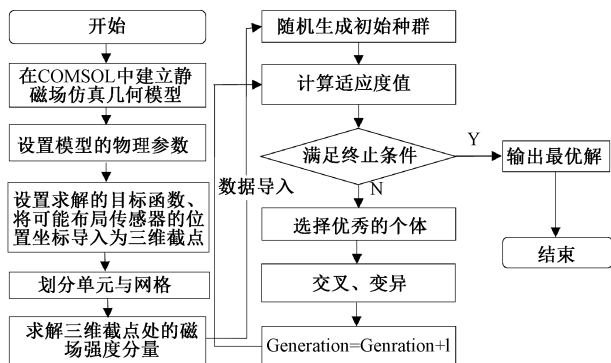


图 4 遗传算法结合仿真优化原理流程图

Fig. 4 Genetic algorithm combined with simulation optimization principle flowchart

首先, 利用 COMSOL 建立完磁场仿真模型, 设置传感器位置、永磁体位置等参数后, 通过 MATLAB 控制循环仿真求解出所有的磁场强度值^[19]; 其次, 将磁场强度数据导入到遗传算法中, 通过选择交叉和变异操作, 寻找平均定位误差最小的解, 输出磁传感器阵列最优布局。为了验证本文提出方法的有效性, 设计了 5 个不同的永磁体运动轨迹, 针对不同的轨迹进行一对一的磁传感器阵列布局优化, 得到每个轨迹各自对应的最优化布局。

为了评估优化效果, 首先定义永磁体的位置误差 E_{posi} 和方向误差 E_{ori} 为:

$$\begin{cases} E_{posi} = \sqrt{(x_{mi} - x_{mi}')^2 + (y_{mi} - y_{mi}')^2 + (z_{mi} - z_{mi}')^2} \\ E_{orii} = \sqrt{(m_i - m_i')^2 + (n_i - n_i')^2 + (p_i - p_i')^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $(x_{mi}, y_{mi}, z_{mi}, m_i, n_i, p_i)$ 为设定的永磁体位置和姿态， $(x_{mi}', y_{mi}', z_{mi}', m_i', n_i', p_i')$ 为计算得到的永磁体位置和姿态。在使用遗传算法优化磁定位系统中传感器布局时，定义目标函数为运动轨迹上所有目标位置的平均定位误差最小， N 代表运动轨迹上目标位置点的总数，定位误差可以定义为：

$$\begin{cases} \bar{E}_{pos} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{posi} \\ \bar{E}_{ori} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{orii} \end{cases} \quad (8)$$

假设传感器的位置为决策变量 X ，每个传感器在系统坐标系下的位置坐标为 (x_i, y_i, z_i) ，其中 $i = 1, 2, \dots, N_s$ 。

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N_s} & y_{N_s} & z_{N_s} \end{bmatrix} \quad (9)$$

为了减小搜索空间，排除冗余布局，对传感器之间的最小距离、传感器数量进行了约束。

$$s. t. \begin{cases} S = \{S_1, S_2, \dots, S_{N_s}\} \\ \forall (S_i, S_j) \in S, i \neq j: d(S_i, S_j) \geq D_{\min} \\ N_s = 12 \end{cases} \quad (10)$$

式中： S 为传感器位置集合， N_s 为传感器数量， $d(S_i, S_j)$ 表示两个传感器之间的距离， $D_{\min}$ 为任意两个传感器间最小距离。这些约束条件和目标函数一起组成多目标优化问题，通过遗传算法对传感器布局进行优化，满足平均定位误差最小时得到最优的传感器布局。

表 1 优化后的传感器阵列布局与系统检测误差

Table 1 Optimized sensor array layout and system detection error			
轨迹名称	优化后传感器布局位置编号	平均定位误差/mm	平均定向误差/(°)
Traj1	4, 22, 33, 39, 54, 70, 80, 95, 106, 110, 130, 133	1.18±0.23	0.86±0.11
Traj2	4, 13, 33, 48, 49, 63, 76, 85, 97, 119, 123, 144	1.24±0.35	0.92±0.15
Traj3	10, 13, 31, 44, 58, 61, 76, 92, 104, 113, 131, 115	1.37±0.28	0.66±0.09
Traj4	4, 17, 26, 48, 55, 68, 75, 86, 98, 109, 127, 141	1.21±0.18	0.74±0.20
Traj5	10, 17, 36, 42, 60, 72, 83, 93, 97, 116, 124, 143	1.06±0.21	0.43±0.16

由于在实际实验中，地磁场和环境各种磁场干扰不可避免，所搭建的系统也会引入误差^[20]，因此对结果添加 50 μT 的噪声，得到仿真数据集，近似模拟真实实验中传感器接收到的磁感应强度。把每个轨迹经过预处理的磁场强度值代入遗传算法中进行优化迭代直至收敛，输出对应的优化后的传感器布局，并计算优化后的平均定位、定向误差，得到的优化结果如表 1 所示。

为了直观地显示优化前后的传感器阵列布局变化，用二维位置图呈现，正方形表示优化前传感器均匀布局，圆形表示优化后传感器非均匀布局。以轨迹一对应的优化前后布局为例，如图 5 所示。

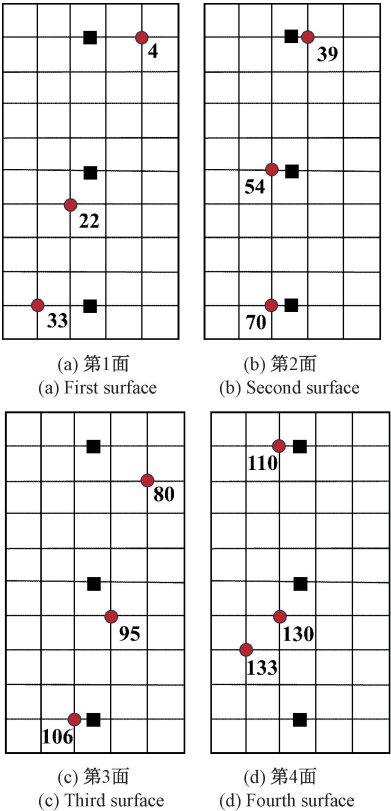


图 5 优化后的传感器阵列布局
Fig. 5 Optimized sensor array layout

3 实验与结果分析

3.1 磁定位实验平台

磁定位系统主要包含 4 个模块：磁定位实验台腔体、磁传感器阵列、数据采集传输和上位机。对比了不同永磁体材料和磁传感器性能，选择了直径和高度均为 10 mm，牌号为 N52 的圆柱形钕铁硼（NdFeB）永磁体作为磁源，并由 12 个 LIS3MDL 三轴磁传感器组成磁传感器阵列初始布局；以 STM32F103 单片机为核心，通过 IIC 总线与磁传感器通信读取磁场信息，并通过串口发送给

上位机,经过预处理的数据由反演算法求解出永磁体的位姿信息,同时对结果进行保存。

永磁体被固定在法奥协作机器人手臂(FR5,精度为 0.03 mm)的末端,在实验中通过机械臂操作界面设置程序控制永磁体按照预设轨迹运动。搭建的磁定位系统实验台如图 6 所示,定位实验腔体均布了间距为 30 mm 的限位槽,可以根据需求自由调整传感器的数量和布局。

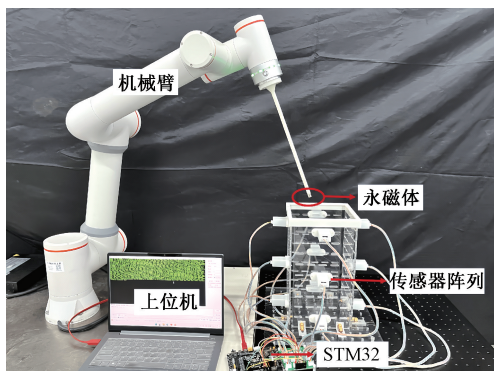


图 6 磁定位实验平台

Fig. 6 Magnetic positioning experiment platform

3.2 磁定位系统标定

考虑到磁定位的实际应用环境,磁传感器采集到的实际磁场由目标磁体的产生的磁场强度,地球地磁的噪声,周围电流或磁性材料的磁场噪声以及铁磁性材料引起的磁化效应和传感器本身的测量误差所组成。因此,为了减小或者消除这些误差对定位精度的影响,需要对磁定位系统进行标定。

空间磁场由环境磁场和永磁体发出的磁场叠加而成,但本课题所搭建的系统物理尺寸小,并且在实验过程中磁传感器阵列姿态保持固定,所以将腔体周围的地磁场视为无矢量变化的均匀静磁场,传感器采集到的磁场值可表示为:

$$\mathbf{B}'_i = \mathbf{B}_i + \mathbf{G} + \varepsilon \quad (11)$$

其中, $\mathbf{B}_i = (B_{ix}, B_{iy}, B_{iz})$ 表示永磁体产生的磁场, $\mathbf{G} = (G_x, G_y, G_z)$ 表示均匀地磁场, ε 为服从高斯分布的测量噪声。

使用量程为 $(-100 \sim 100)$ Oe,分辨率为 0.2 mOe 的多维科技 USB21023 三轴磁强计,对空间中可能影响实验结果的电子产品进行磁干扰测量,如图 7 所示,距离超出一定范围后,电子产品产生的磁场干扰几乎为 0。

磁传感器自身误差由制造工艺和材料特性引起,包括偏置误差、灵敏度误差和非正交误差^[21],为了实现系统的精准定位,必须对各个传感器进行标定。其次,磁定位系统每个部分加工、安装等引入误差都会对系统精度造成影响。

在系统搭建完毕后,如图 8 所示进行传感器阵列标

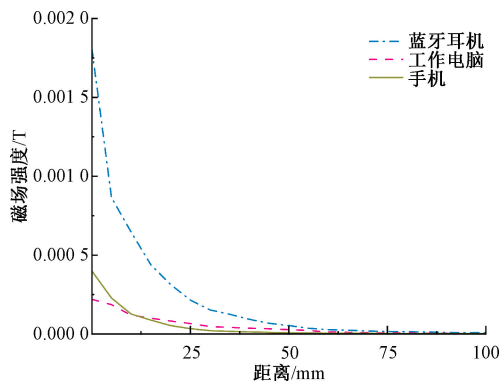


图 7 空间中电子产品磁干扰测量

Fig. 7 Measurement of magnetic interference in electronics in space

定,使用三坐标测量机 CMM(HEAGON LEITZ PMM-C,测量精度为 5 μm)对磁传感器安装位置进行测量,得到磁传感器实际安装位置与方向:一是作为标定算法的初始值,加快收敛速度;二是作为磁定位仿真中的三维截点设置参数。

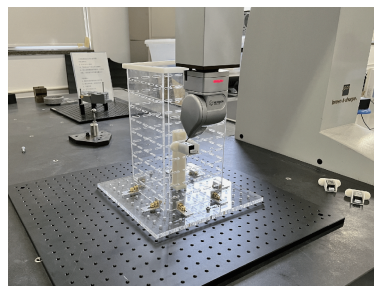


图 8 磁传感器阵列标定

Fig. 8 Magnetic sensor array calibration

最后,为了检验标定效果,对标定前后的系统进行了对比实验。使用标准实验板将永磁体固定在传感器阵列内部不同空间点处,更改永磁体放置的位置和标准实验板支脚长度进行多次重复实验。第 1 层测试点分布图如图 9 所示,共有 51 个定位测试点。

标定前后系统的定位和定向误差对比如图 10 与 11 所示。蓝色标记三角形折线代表标定前系统的定位定向误差,粉色标记圆形折线代表标定后系统的定位定向误差。对实验结果进行分析,标定后各测试点误差基本小于标定前,且标定后系统的平均定位误差从 3.94 mm 降低到 1.42 mm,减小了 2.52 mm,平均定向误差从 4.32° 减小到 1.50°,减小了 2.82°。

3.3 磁定位系统定位实验

首先,在传感器均匀布局下,对 5 个运动轨迹各进行 5 次重复定位实验,对数据进行处理并用反演算法求解定位、定向精度。其次,根据仿真优化后的传感器阵列布

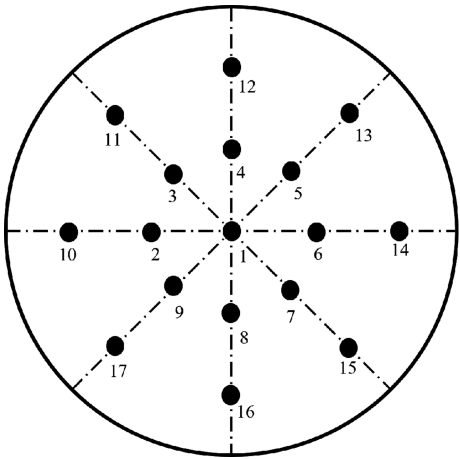


图 9 定位测试点分布图

Fig. 9 Distribution of test points

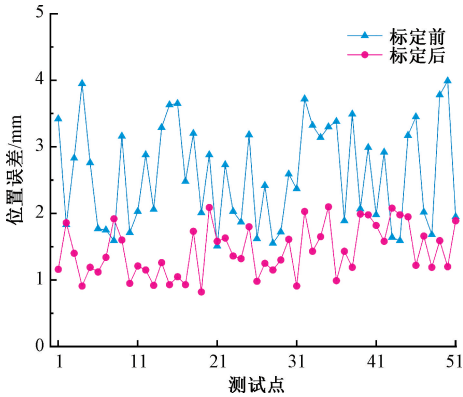


图 10 标定前后的系统定位误差

Fig. 10 Comparison of system position errors

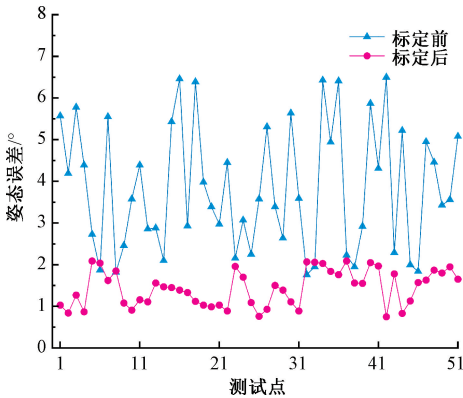


图 11 标定前后的系统定向误差

Fig. 11 Comparison of system orientation errors

局依次调整 12 个磁传感器的安装位置,对 5 个运动轨迹各进行 5 次重复定位实验,并对数据进行处理并用反演算法求解定位、定向精度。最后,对比均匀布局和优化布局磁定位系统的定位、定向精度,分析本文磁传感器阵列布局优化方法的可行性,是否能够进一步提高系统精度。

由于搭建的磁定位系统物理尺寸较小,且在实验过程中磁传感器阵列姿态保持固定,所以将腔体周围的地

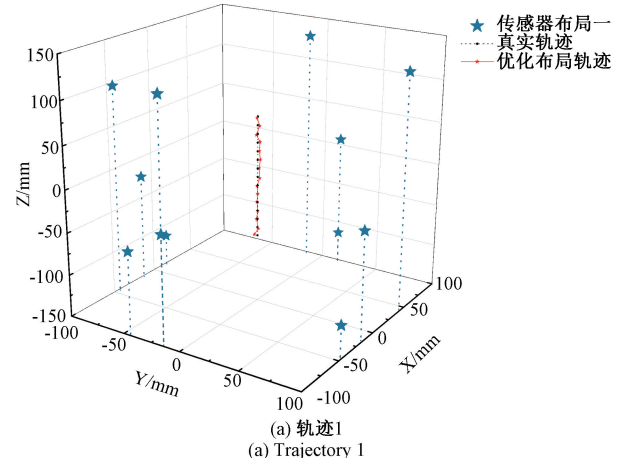
磁场视为无矢量变化的均匀静磁场。每次实验前,在永磁体远离系统条件下进行空测,测得的磁场分量可作为地磁场分量,实验采集到的磁场强度减去该分量即可获得永磁体磁场信息。

对重复实验的数据进行处理,传感器阵列在初始布局和优化布局下的系统检测精度如表 2 所示。传感器布局优化后,轨迹 1 平均定位误差上升了 1.2%,平均定向误差降低了 7.5%;轨迹 2 平均定位误差降低了 10.7%,平均定向误差上升了 4.3%;轨迹 3 平均定位误差下降了 11.9%,平均定向误差降低了 9.4%;轨迹 4 平均定位误差下降了 10.4%,平均定向误差降低了 1.6%;轨迹 5 平均定位误差降低了 14.3%,平均定向误差降低了 16.3%。

表 2 传感器阵列在初始布局和优化布局下的系统精度对比

轨迹名称	初始布局		优化布局	
	平均定位	平均定向	平均定位	平均定向
	误差/mm	误差/(°)	误差/mm	误差/(°)
Traj1	1.71±0.35	1.34±0.46	1.73±0.19	1.24±0.36
Traj2	1.86±0.29	1.41±0.39	1.68±0.21	1.47±0.23
Traj3	1.77±0.34	1.49±0.54	1.56±0.18	1.35±0.44
Traj4	1.64±0.23	1.27±0.35	1.47±0.15	1.25±0.32
Traj5	1.89±0.16	1.53±0.24	1.62±0.24	1.28±0.26

如图 12 为磁传感器阵列布局优化后每个轨迹在各自对应的优化布局下的三维轨迹图。黑色虚线代表真实轨迹,红色实线代表定位求解的轨迹,蓝色星星代表传感器在空间中的布局。综合分析实验结果,优化布局后磁定位系统的定位和定向精度大部分都有所提升,个别效果不符合预期,初步考虑是由于实验在非磁屏蔽环境下进行,实验过程中难免会引入随机干扰噪声,以及机械臂在执行轨迹运动命令时也会因为关节移动引入系统误差,但大致优化效果符合预期,验证了本文提出的优化方法对提升磁定位系统定位和定向精度的可行性,为磁定位系统中传感器布局优化提供了思路。



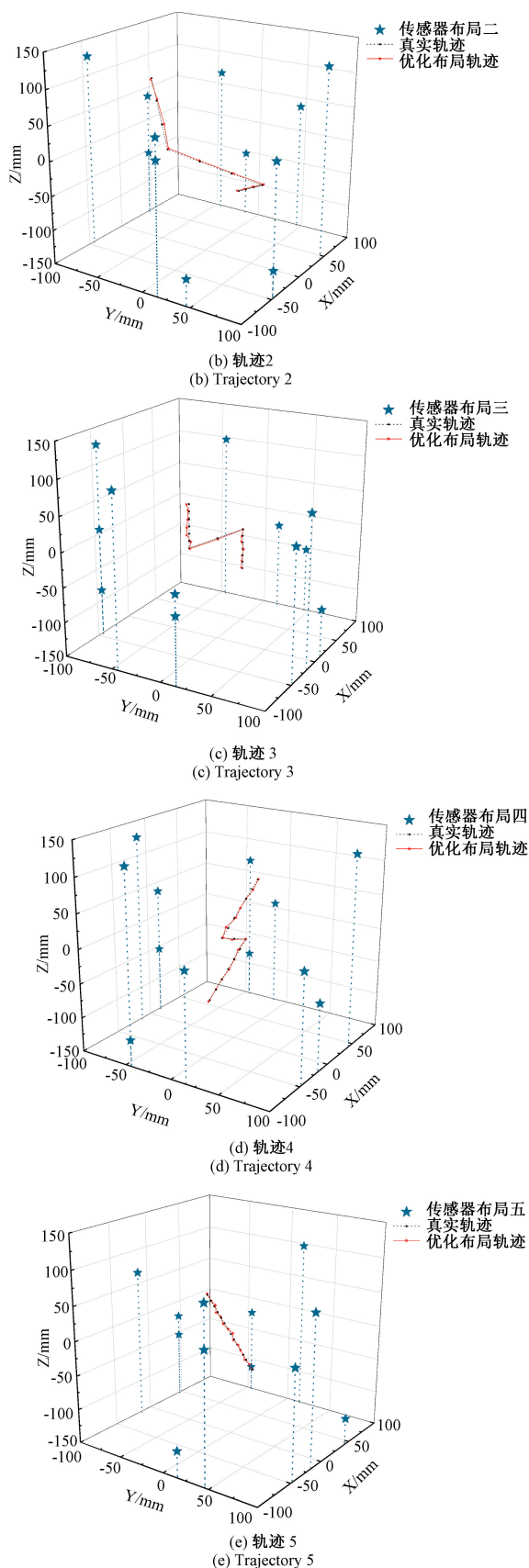


图 12 传感器阵列布局优化后定位效果图

Fig. 12 Positioning effect after sensor array layout optimization

4 结 论

针对磁定位系统中传感器阵列非均匀分布研究,提出了一种遗传算法结合 COMSOL 有限元仿真对传感器阵列布局进行优化的方法,深入研究了传感器阵列空间设计对系统定位精度的影响。该方法通过遗传算法将磁定位系统腔体离散为可布局传感器的位置点,结合有限元仿真模拟实验过程,获取每个节点处的磁场强度信息导入到优化算法中,迭代计算出不同运动轨迹下定位精度最高的磁传感器阵列布局。实验结果表明,与盲目添加更多的传感器来提高定位精度相比,在控制传感器数量的前提下优化传感器阵列布局,不仅可以控制成本令系统更加简洁,而且也能有效提高系统定位精度。未来将进一步研究如何将本研究成果应用于更广泛的领域,如工业自动化、智能驾驶、智慧医疗等,以展示其潜在的应用价值和推广前景。

参考文献

- [1] FAN Q G, ZHANG H, PAN P, et al. Improved pedestrian dead reckoning based on a robust adaptive kalman filter for indoor inertial location system [J]. Sensors, 2019, 19(2): 294.
- [2] MCCARTHY M, DUFF P, MULLER H L, et al. Accessible ultrasonic positioning [J]. IEEE Pervasive Computing, 2006, 5(4): 86-93.
- [3] JAGADEESAN N A, KRISHNAMACHARI B. Distributionally robust radio frequency localization [J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, 2019, 5(2): 390-403.
- [4] KHATTAR F, LUTHON F, LARROQUE B, et al. Visual localization and servoing for drone use in indoor remote laboratory environment [J]. Machine Vision and Applications, 2021, 32(1): 32.
- [5] 张旭辉, 沈奇峰, 杨文娟, 等. 基于三激光点标靶的掘进机机身视觉定位技术研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(6): 178-186.
ZHANG X H, SHENG Q F, YANG W J, et al. Research on visual positioning technology of roadheader body based on three laser point target [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(6): 178-186.
- [6] MALAGO P, SLANOVC F, HERZOG S, et al. Magnetic position system design method applied to three-axis joystick motion tracking [J]. Sensors, 2020, 20(23): 6873.
- [7] SU SH J, YANG W A, DAI H D, et al. Investigation of the relationship between tracking accuracy and tracking

- distance of a novel magnetic tracking system[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(15): 4928-4937.
- [8] SHAO G L, GUO Y X. An optimal design for passive magnetic localization system based on SNR evaluation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(7): 4324-4333.
- [9] MARECHAL L, FOONG SH H, SUN ZH L, et al. Design optimization of the sensor spatial arrangement in a direct magnetic field-based localization system for medical applications[C]. The 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Milan, Italy, 2015: 897-900.
- [10] SONG SH, QIU X X, WANG J L, et al. Design and optimization strategy of sensor array layout for magnetic localization system[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(6): 1849-1857.
- [11] 高钱豪,赵翼,朱秋明,等. 面向频谱环境地图重构的传感器布局优化[J]. 电波科学学报, 2023, 1-7, DOI: 10.12265/j. cjsors. 2023294.
- GAO Q H, ZHAO Y, ZHU Q M, et al. Sensor layout optimization for radio environment map reconstruction[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, 1-7, DOI: 10.12265/j. cjsors. 2023294.
- [12] 汪涛. 复杂天气下茶园土壤墒情传感器布局优化方法研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023: 12-21.
- WANG T. Research on the optimization method of soil moisture sensor layout in tea plantations under complex weather[D]. Hefei: Anhui University of Technology, 2023: 12-21.
- [13] 郭延宁,王鹏宇,金珊. 一种新型的挠性航天器作动器布局优化方案[J]. 飞控与探测, 2019, 2(5): 49-54.
- GUO Y N, WANG P Y, JIN SH. A new optimization approach to the flexible space craft actuators placement[J]. Flight Control & Detection, 2019, 2(5): 49-54.
- [14] 刘芙妍,颜冰. 磁偶极子阵列模型的适用性研究与优化分析[J]. 物理学报, 2022, 71(12): 36-48.
- LIU F Y, YAN B. Applicability and optimization analysis of magnetic dipole array model[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(12): 36-48.
- [15] SONG SH, QIU X X, MENG Q H. An improved 6D pose detection method based on multiple magnets tracking[C]. The 2017 IEEE Sensors, Glasgow, UK, 2017: 1-3.
- [16] XU M, KONG D Y, YE L F, et al. A new localization system for tracking capsule endoscope robot based on digital 3-axis magnetic sensors array [C]. The 2017 Chinese Intelligent Systems Conference, Singapore: Springer Singapore, 2018: 487-494.
- [17] XU Y X, LI K Y, ZHAO Z Q, et al. A design approach of 3D optimal mobile sensor array for confidence-box based tracking of a magnetic capsule[C]. The 2021 6th IEEE International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), Chongqing, China, 2021: 809-816.
- [18] 周磊,张力文,周建庭. 基于二重结构编码遗传算法的连续刚构桥传感器优化布置[J]. 公路, 2014, 59(11): 36-41.
- ZHOU L, ZHANG L W, ZHOU J T. Optimized arrangement of sensors for continuous rigid frame bridge[J]. Highway, 2014, 59(11): 36-41.
- [19] 李晶晶. 基于 MATLAB 与 COMSOL 的磁场仿真系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 32-45.
- LI J J. The research of magnetic field simulation system based on MATLAB and COMSOL[D]. Changchun: Jilin University, 2015: 32-45.
- [20] THAN T D, ALICI G, HARVEY S, et al. An effective localization method for robotic endoscopic capsules using multiple positron emission markers [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(5): 1174-1186.
- [21] 尹刚,张林,谢艳,等. 磁梯度张量系统的非线性校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 35-43.
- YIN G, ZHANG L, XIE Y, et al. Nonlinear calibration method of magnetic gradient tensor system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 35-43.

作者简介



俞浙君, 2024 年于中国计量大学获得硕士学位, 主要研究方向为精密测量技术。
E-mail: 1017434699@qq.com

Yu Zhejun received her M. Sc. degree from China Jiliang University in 2024. Her main research interest includes precision measurement technology.



刘璐(通信作者), 2019 年于天津大学获得博士学位, 现为中国计量大学讲师, 主要研究方向为精密仪器设计、微纳结构及检测系统设计。
E-mail: lu_liu@cjl. edu. cn

Liu Lu (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Tianjin University in 2019. Now she is a lecturer in China Jiliang University. Her main research interests include precision instrument design, micro-nano structure and detection system design.