

DOI: 10.13382/j.jemi.B2206136

# 基于六轴机械臂驱动的微波球面扫描成像系统\*

邱世振<sup>1</sup> 白靖文<sup>2</sup> 张晋行<sup>1</sup> 刘晓瑞<sup>1,3</sup>

(1. 青岛大学自动化学院 青岛 266071; 2. 中电科思仪科技股份有限公司 青岛 266071;

3. 山东省工业控制技术重点实验室 青岛 266071)

**摘要:**基于合成孔径成像原理的扫描成像技术(ESM)在电子设备电磁干扰(EMI)检测领域具有明显的技术优势与应用价值,但是其在球面成像算法与系统设计方面仍需进一步的研究与完善。针对以上需求,本文提出了球面扫描成像任务下的机械臂系统设计方法与控制策略。在系统模型上,对机械臂构型、球面扫描边界与检测天线姿态进行建模,探索在以上约束下的最优球面孔径求解方法。在控制策略上,设计实现基于关节角搜索的机械臂控制策略与微波成像聚焦算法。以上模型、方法与策略在仿真实验中实现平均关节变化角降幅60.21%,在由六轴机械臂与基准微波辐射源搭建的验证实验实现自动聚焦与精确成像(聚焦精度0.1 mm,成像精度不低于3.14 dBm),可望应用于电子系统的EMI检测定位。

**关键词:**机械臂运动学;电磁辐射源定位检测(ESM);最优控制;路径规划;微波成像

**中图分类号:** TP241.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

## Microwave spherical scanning imaging system based on 6-DOF manipulator

Qiu Shizhen<sup>1</sup> Bai Jingwen<sup>2</sup> Zhang Jinhang<sup>1</sup> Liu Xiaorui<sup>1,3</sup>

(1. Automation School of Qingdao University, Qingdao 266071, China; 2. Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao 266071, China;

3. Shandong Key Laboratory of Industrial Control Technology, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Emission source microscopy (ESM) based on synthetic aperture imaging principle has obvious technical advantages and application value in the field of electromagnetic interference (EMI) detection of electronic equipment, but it still needs further research and improvement in spherical imaging algorithm and system design. In view of the above requirements, this paper proposes the design method and control strategy of the manipulator system under the spherical scanning imaging task. On the system model, the manipulator configuration, spherical scanning boundary and detection antenna attitude are modeled, and the optimal spherical aperture solution method under the above constraints is explored. In terms of control strategy, manipulator control strategy based on joint angle search and the microwave microscopic imaging focusing algorithm are designed and implemented. The above models, methods and strategies achieve a 60.21% reduction in the angle of the average joint change in the simulation experiment. In the verification experiment built by the six-axis manipulator and the reference microwave radiation source, the automatic focusing and accurate imaging are realized (the focusing accuracy is 0.1 mm, and the imaging accuracy is not less than 3.14 dBm), which is expected to be applied to EMI detection and positioning of electronic systems.

**Keywords:** kinematics of manipulator; emission source microscopy (ESM); optimal control; path planning; microwave microscopy

## 0 引言

随着电子系统电路密度与集成化程度的不断提高,

业界对电子设备电磁干扰(electromagnetic interference, EMI)检测技术也提出了越来越高的要求<sup>[1-2]</sup>。鉴于目前近场扫描技术与微波暗室技术在天线尺寸、成像能力与检测精度方面存在的问题,国内外相关领域已广泛认识

到对电子设备 EMI 进行成像分析 (emission source microscopy, ESM) 的必要性<sup>[3]</sup>, 其研究重点也逐渐由远场限值检测转向基于远近场变换的成像扫描检测<sup>[4]</sup>。在现有的研究成果中, 通用的实现思路是采用合成孔径原理完成受测设备远场到近场的变换<sup>[5]</sup>, 其中将设备的电磁场传播近似为平面波进行计算<sup>[6]</sup>。由于电磁波在空间中实际以球面波的形式传播, 这将不可避免的影响成像精度<sup>[7]</sup>。

为了解决以上问题, 近年来人们从多个角度进行过研究与讨论, 如在理想辐射源前提下对稀疏采样<sup>[8-9]</sup>与多重球面展开<sup>[10]</sup>算法的研究, 其中 Kim 等<sup>[11]</sup>还试图根据球面波展开理论对任意扫描曲面的远近场变换过程进行预测。国内的相关研究中, 也有针对球面扫描下远近场双向计算方法的研究与仿真<sup>[12-13]</sup>报道。综上所述可以发现, 目前国内外在 EMI 球面扫描成像技术方面仍缺乏系统化的设计思路, 对于基于球面波开展的远近场变换研究多集中在理论计算与仿真, 部分成果需要进一步的测试验证。在系统实现方面, 有将机械臂投入电磁兼容检测应用的报道 (如美国的 FMCW 雷达系统<sup>[14]</sup>), 该类研究的主要内容是探索 ESM 技术在指定扫描构件基础下的控制策略。目前对于多关节扫描执行器的运动学求解<sup>[14]</sup>与路径规划问题研究较多<sup>[15-16]</sup>, 但是对于关节自由度低于任务自由度的非冗余环境下的控制策略仍需探索攻关<sup>[17]</sup>。

本文将机械臂与微波扫描成像技术相结合, 重点研究其在球面扫描模式下的系统建模方法与运动控制策略, 以期实现对电子设备 EMI 的远近场变换成像与辐射源的精准定位。为实现以上目标, 对机械臂构型、探测天线极化特征与球面扫描边界等约束条件进行建模, 提出在以上约束条件下机械臂的构型选择与扫描面 (成像孔径) 生成方法。在获得最大扫描孔径的基础上, 进一步研究机器人在该任务下的最佳运动规划与自动聚焦算法。以上模型与方法在仿真与实验中进行测试, 结果证明可以为球面 ESM 扫描机器人的设计提供理论与方法支撑。

### 1 ESM 检测原理与机械臂建模

ESM 检测技术基于合成孔径雷达成像原理实现电磁场远近场变换<sup>[13]</sup>, 其实现方式是利用机械臂抓持天线完成空间曲面下的精确定位, 再结合网络分析仪实现指定位置上的电磁场 (检测复振幅、检测/固定天线间相位差, 如图 1 所示) 采样。在 ESM 扫描中扩大扫描孔径可提高成像精度, 接下来将根据 ESM 扫描系统的特性讨论机械臂的构型选择与系统建模。

目前机械臂主要有六自由度 (DOF<sub>6</sub>) 与七自由度

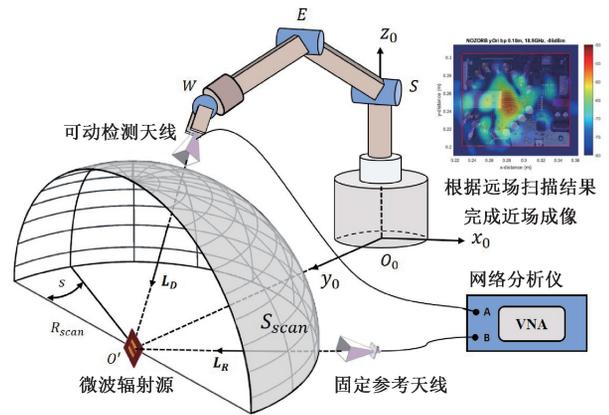


图 1 ESM 球面扫描成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ESM spherical scanning system

(DOF<sub>7</sub>) 两种构型, 其运动学模型如图 2 所示。其中  $z_i$  表示对应关节轴线方向; 基座坐标系  $x_i, y_i, z_i$  满足右手螺旋法则; 连杆转角  $q_i$  表示绕  $z_i$  轴旋转的角度; 连杆距离  $d_i$  表示沿  $z_i$  轴平移的距离; 连杆扭角  $\alpha_i$  表示  $z_i$  绕  $x_{i+1}$  轴旋转的角度;  $a_i$  表示沿  $x_i$  轴平移的距离 ( $1 \leq i \leq 6, 7$ )。

由于不同机械臂构型对 ESM 扫描孔径的生成存在影响, 因此本文首先探讨机械臂自身构型、关节角限制和模型参数与腕部不可达区域的关系 (如图 2 所示)。

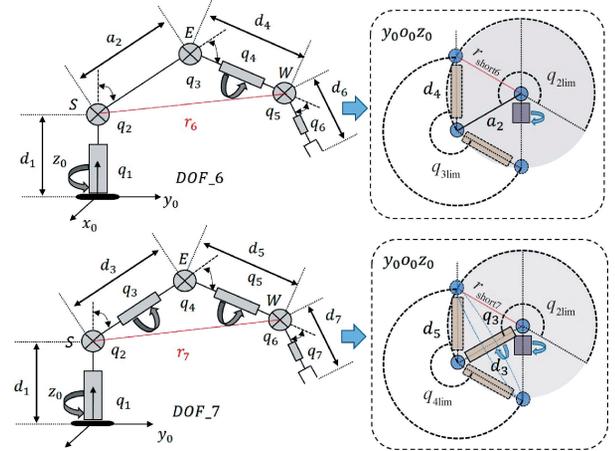


图 2 不同自由度机械臂的不可达区域对比

Fig. 2 Comparison of unreachable areas of manipulators with different degrees of freedom

由图 2 可以发现, DOF<sub>6</sub> 与 DOF<sub>7</sub> 构型在关节角限制下存在腕部位置 W 与肩部位置 S 的最短距离  $r_{short}$ , 此时随着肩部关节的旋转, W 在空间中形成一个以  $r_{short}$  为半径的球面, 该球面内的球形区域即为机械臂的腕部不可达区域  $\Omega_w$  (图 2 圆形阴影部分)。其中不同自由度机械臂的  $r_{short}$  如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} r_{(\text{short},7)} = \left\| \begin{bmatrix} d_3 \sin(q_{4\text{lim}}) \\ d_3 + |\cos(q_{4\text{lim}})| \end{bmatrix} \right\| \\ r_{(\text{short},6)} = \left\| \begin{bmatrix} d_4 \sin(q_{3\text{lim}}) \\ a_2 + |\cos(q_{3\text{lim}})| \end{bmatrix} \right\| \end{cases} \quad (1)$$

当 DOF\_6 与 DOF\_7 满足式(2)时两种机械臂的  $\Omega_w$  完全相等。

$$\begin{cases} d_3 = a_2 \\ d_5 = d_4 \\ q_{4\text{lim}} = q_{3\text{lim}} \end{cases} \quad (2)$$

其中,两种构型参数定义  $\{a_2, d_4, q_{3\text{lim}}\} \in \text{DOF}_6$ ,  $\{d_3, d_5, q_{4\text{lim}}\} \in \text{DOF}_7$ 。通过对比可以发现,在  $\Omega_w$  的形成过程中,相对于 DOF\_6, DOF\_7 所多出的  $q_3$  对于减小  $\Omega_w$  是冗余的。对于 DOF\_6 和 DOF\_7 的腕部最远分布区域其讨论过程与上述讨论类似,由此判断出七自由度机械臂对于增加 ESM 采样面积没有实质影响。因此本文以 Elfin5 型六自由度机械臂为对象与载体,研究并讨论其在 ESM 扫描任务中的应用。其中 Elfin5 的  $q_{2\text{lim}}, q_{3\text{lim}}$  均等于  $2\pi/3$ , 定义  $\text{lim} = [-q_{2\text{lim}}, q_{2\text{lim}}]$ , 其 D-H 运动学参数如表 1 所示。

表 1 Elfin5 机械臂 D-H 参数表

Table 1 D-H parameter table of Elfin5 manipulator

关节	$q_i / \text{rad}$	$a_i / \text{m}$	$d_i / \text{m}$	$\alpha_i / \text{rad}$
1	$q_1$	0	0.22	$\pi/2$
2	$q_2 + \pi/2$	0.38	0	$\pi$
3	$q_3 + \pi/2$	0	0	$\pi/2$
4	$q_4$	0	0.42	$-\pi/2$
5	$q_5$	0	0	$\pi/2$
6	$q_6$	0	0.185	0

## 2 机械臂建模与最大采样球面求解

### 2.1 机械臂腕部工作区域分析与求解

在完成机械臂建模的基础上,对式(1)代入上文机械臂的 D-H 参数可以得到  $\Omega_w$ , 如式(3)所示。

$$\Omega_w: x^2 + y^2 + (z - d_1)^2 \leq r_{\text{shortest6}}^2 \quad (3)$$

当机械臂肘部 E 伸直 ( $q_3 = 0$ ) 时机械臂 W 与 S 的距离  $r$  最大,如果在满足上述条件下的同时  $q_2$  处于关节极限,则随着  $q_3$  变化 W 在  $x_0o_0z_0$  平面处的分布如图 3 所示。

从图 3 中可以发现当  $q_2 = q_{2\text{lim}}$  时,  $q_3$  的运动会使 W 遍历形成不规则曲面。为求解该曲面的数学表达式,此处基于  $x_1y_1z_1$  建立对应的球坐标系,图中  $\vec{w}$  两端点分别位于球坐标系原点和不规则曲面上。通过利用  $\vec{w}$  作为辅助向量,可以得到不规则曲面在球面坐标系中的数学表达式。相应的,腕部位置最远区域  $W_{\text{from}}$  在极坐标系中可以具体表达,如式(4)所示(其中  $\varphi$  表示  $x_1y_1z_1$  中的

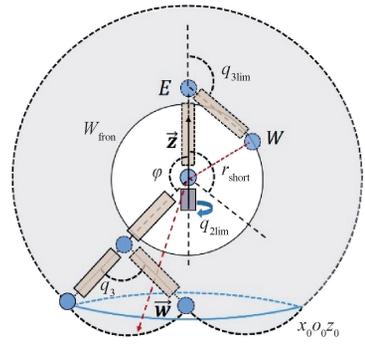


图 3  $x_0o_0z_0$  平面机械臂腕部工作区示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the wrist workspace of the manipulator in  $x_0o_0z_0$  plane

仰角)。

$$\begin{cases} r \leq a_2 + d_4, (\varphi \in \text{lim}) \\ r \leq (a_2 + d_4) \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right), (\varphi \notin \text{lim}) \\ \varphi = \text{acos}\left(\frac{z - d_1}{r}\right) \\ r = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - d_1)^2} \end{cases} \quad (4)$$

在得到  $W_{\text{from}}$  后可以表示出腕部工作区间  $W_{\text{space}}$  如式(5)所示。

$$W_{\text{space}} = W_{\text{from}} \cap \overline{\Omega_w} \quad (5)$$

基于  $W_{\text{from}}$  将讨论在 ESM 扫描任务中机械臂工作区间的表示方法,进而分析并生成最大扫描孔径。

### 2.2 末端约束下机械臂工作空间分析

在 ESM 扫描过程中的各个采样点处机械臂末端需要指向辐射源,即机械臂末端与 W 之间有一个附加偏移

向量  $\vec{l}$ 。通过偏移  $W_{\text{space}}$  即可得到末端约束下的工作区间  $EE_{\text{space}}$ , 原理如图 4 所示。其中  $A \in \Omega_w$ ;  $A'$  为 A 点偏移  $\vec{l}$  后的位置;  $O'$  为扫描球心;  $\overrightarrow{AO'}$  为扫描球心与 A 点构成的方向向量;  $\overrightarrow{AO'_e}$  为  $\overrightarrow{AO'}$  的单位向量; 设  $\vec{l} = \overrightarrow{AO'_e} \cdot d_6 = [l_x \ l_y \ l_z]^T$ 。

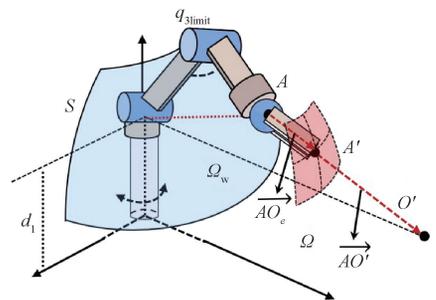


图 4 在末端约束下机械臂不可达区域的产生

Fig. 4 The generation of unreachable areas of the manipulator under end constraints

由图4可知末端约束下的机械臂不可达区域 $\Omega$ 由 $\Omega_w$ 上的点集 $A$ 偏移对应的 $\vec{i}$ 得到,机械臂的最远分布区域 $EE_{\text{from}}$ 也同样满足以上的对应关系,将式(3)与式(4)代入可以得到 $\Omega$ 和 $EE_{\text{from}}$ ,结果如式(6)~(7)所示。

$$\Omega: \sqrt{(x-l_x)^2 + (y-l_y)^2 + (z-l_z-d_1)^2} \leq r_{\text{short}} \quad (6)$$

$$EE_{\text{from}}: \begin{cases} r \leq a_2 + d_4 (\varphi \in \text{lim}) \\ r \leq (a_2 + d_4) \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) (\varphi \notin \text{lim}) \\ r = \sqrt{(x-l_x)^2 + (y-l_y)^2 + (z-l_z-2d_1)^2} \\ \varphi = \arccos\left(\frac{z-l_z-2d_1}{r}\right) \end{cases} \quad (7)$$

由此得到机械臂末端约束下的工作区间 $EE_{\text{space}}$ 如式(8)所示。

$$EE_{\text{space}} = EE_{\text{from}} \cap \Omega \quad (8)$$

在得到 $EE_{\text{space}}$ 后,分析其与假想采样面的空间分布情况来最大化的生成扫描孔径,进而可以研究机械臂运动路径的生成问题以及机械臂的运动规划与控制问题。

### 2.3 ESM 任务下最大采样面的分析

在上文获得的 $EE_{\text{space}}$ 区间内,设采样球面以辐射源 $O'$ 为球心以 $R_s$ 为采样半径。在 $R_s$ 逐渐增大的过程中,采样球面在空间中的分布如图5所示。为了简化计算忽略 $EE_{\text{space}}$ 中的不规则区域对采样面积的影响,只考虑在 $x_1o_1y_1$ 平面以上的属于 $EE_{\text{space}}$ 的部分采样球面面积 $S_{\text{up}}$ ,同时固定 $O'$ 位于 $y_1$ 轴且在该轴上对应坐标为 $w$ ;定义完整采样球面与 $EE_{\text{from}}$ 边界相交时的交线为 $L$ 。将工作区域内生成最大的采样球面问题简化为生成最大 $S_{\text{up}}$ 的问题,并对该问题的计算方法进行讨论。

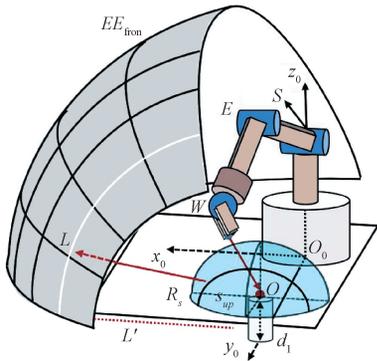


图5 采样球面在空间中的分布情况

Fig. 5 The distribution of sampling sphere in space

由于采样球面与 $EE_{\text{from}}$ 在空间中相对于坐标轴 $y_1$ 具有对称性,当 $R_s$ 较大时采样球面与 $EE_{\text{from}}$ 在 $x_1o_1y_1$ 平面

以上的相交部分为一条平行于 $x_1o_1z_1$ 平面的空间曲线 $L$ ,因此交线 $L$ 在 $x_1o_1y_1$ 上的投影 $L'$ 为一条线段。为了便于计算 $S_{\text{up}}$ 首先确立 $L'$ ,这里以 $O'$ 为原点,以与射线 $o_1x_1$ 平行且方向相同的射线 $O'x'$ 作为极轴建立二维极坐标系 $x'O'y'$ ;  $\beta$ 为该坐标系中的极角,变化范围为 $[-\pi, \pi]$ 。因此 $L'$ 在 $x_1o_1y_1$ 中可表示如式(9)所示。

$$L': \begin{cases} x = r\cos(\beta) \\ y = w + r\sin(\beta) \end{cases} \quad (9)$$

其中,极角 $\beta$ 可以联立采样面空间方程和式(7)得到,在 $x_1o_1y_1$ 中表示如式(10)所示:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{(d_4 + a_2)^2 - w^2 - (d_1 + R_s)^2}{2w(d_1 + R_s)}\right) \quad (10)$$

对应的 $S_{\text{up}}$ 表示如式(11)所示:

$$S_{\text{up}} = \pi R_s^2 (1 + |\sin(\beta)|) \quad (11)$$

考虑到机械臂自身构型参数和采样面与 $EE_{\text{from}}$ 的相交条件, $w$ 与 $R_s$ 应满足如式(12)所示的约束条件。

$$\begin{cases} 0.1 \leq w \leq 1 \\ R_s \leq d_4 + a_2 - d_6 + w \\ d_4 + a_2 - d_6 - w \leq R_s \end{cases} \quad (12)$$

以 $S_{\text{up}}$ 最大为目标函数进行非线性规划来最大化生成采样球面面积 $S_{\text{scan}}$ 。在得到最大 $S_{\text{up}}$ 及其相应的 $w$ 与 $R_s$ 之后还需对 $S_{\text{up}}$ 进行处理以得到更大的 $S_{\text{scan}}$ ,以此来减小上文的简化处理对生成最大采样面积的影响。为了避免 $S_{\text{scan}}$ 与 $EE_{\text{from}}$ 下方的不可达区域相交,将在 $EE_{\text{from}}$ 不规则区域中的具有最大 $z$ 坐标值的点处生成平面,通过对位于该平面以下的扫描面进行切除来得到处理后的最终的采样面积 $S_{\text{scan}}$ 。之后将在该采样区域中生成采样点集以及对机械臂进行运动控制和路径规划。

## 3 最短路径选取与轨迹规划

### 3.1 路径生成与路径搜索算法

在获得ESM采样球面的孔径参数后,本节将确定机械臂的采样路径,同时利用基于关节角搜索策略的快速扩展随机树算法(rapid-exploration random tree based on joint angle search strategy, RRT\*-JSS)搜索一条减少总路径长度且相邻序列关节角变化平滑的路径。首先对得到的采样球面进行栅格化预处理,根据采样点的空间关系构造无向图 $G(D, B)$ 如图6所示。其中 $D$ 为采样点之间的连线, $B$ 为连线的权重这里设置为连线的欧氏距离。使用Greedy算法搜索没有重复采样的最短路径,得到的路径序列在空间中的遍历顺序如图6中灰色粗线走向所示。

为获得任务约束下的机械臂末端位姿矩阵,对空间中的采样点(设采样点的位置矩阵 $\mathbf{P}_{\text{end}} = [x, y, z]^T$ )使用

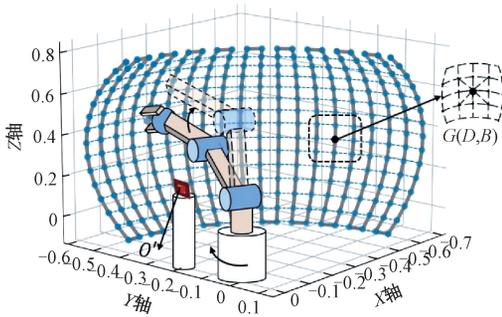


图 6 部分采样面路径示意图

Fig. 6 Schematic diagram of partial sampling surface path

欧拉角旋转俯仰角 ( $pt$ ) 与航偏角 ( $ya$ ) 来满足末端约束条件(设置  $[1, 1, 1]$  为基坐标系), 其数学表示为式 (13)。

$$\begin{cases} pt = \text{atan2}(w - y, d_1 - z) \\ ya = \text{acos}\left(\frac{-x}{\sqrt{x^2 + (w - y)^2 + (d_1 - z)^2}}\right) - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (13)$$

对应的旋转矩阵可表示如式 (14) ~ (15) 所示:

$$R_{pt} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(pt) & -\sin(pt) \\ 0 & \sin(pt) & \cos(pt) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$R_{ya} = \begin{bmatrix} \cos(ya) & 0 & \sin(ya) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(ya) & 0 & \cos(ya) \end{bmatrix} \quad (15)$$

对应扫描点的旋转矩阵  $R_{end}$  如式 (16) 所示:

$$R_{end} = R_{ya} R_{pt} \quad (16)$$

在已知最短采样序列与相应采样点的位姿矩阵下根据文献[18-19]求出关节角逆解, 由于通过快速扩展随机树算法\*(rapid-exploration random tree\*, RRT\*)搜索得到的路径其关节角变化幅度往往过大, 这将使得机械臂运行时部分关节运动超速从而降低整体扫描过程的稳定性与准确性。而使用 RRT\*-JSS 算法搜索得到的路径平滑度将明显上升, 考虑到机械臂在执行 ESM 扫描任务时关节六的自转对机械臂末端运动情况没有影响而只对其前 5 个关节角进行搜索。其中 RRT\*-JSS 算法伪代码<sup>[20]</sup>如算法 1 所示。

上述改进后搜索策略的搜索时间会随着节点维度上升而增加, 但是由于采样点在空间中的间隔较小使得总体增加时间处于可接受的范围内。通过调整 RRT\*-JSS 算法的重布线半径  $r_{min}$  也可以提高算法速度, 从而使 RRT\*-JSS 算法的单位时间成本满足实际使用要求。

算法 1 基于关节角搜索策略的 RRT\* 算法伪代码

```

输入: 指定路径中初始采样点逆解集合  $q_{start}(x, y, z)$ , 目标采样点逆解集合  $q_{goal}(x, y, z)$ , 扩展步长  $step$ , 迭代次数  $N$ 
输出: 整条路径的关节角集合  $q_{path}(q_1-q_5)$ 

 $Tree_1 = Tree(q_{start}(x, y, z), q_{goal}(x, y, z))$ 
for  $k = 1$  to  $N$  do
     $q_{rand} \leftarrow sample(Tree_k)$ 
     $q_{nearest} = LeastDistance(q_{rand})$ 
     $q_{new} = ExtendTree(Tree(q_{nearest}, q_{rand}), step)$ 
    if  $JointLimit(q_{nearest}, q_{new})$  and !  $collision(q_{nearest}, q_{new})$  then
         $TreeConnect(Tree_k, q_{new})$ 
         $\{q_k\} = Nearest(q_{new}, q_{ran})$ 
    for each  $q_k = q_1$  to  $q_n$  do
         $Tree_k = Rewrite(q_k, q_{new})$ 
 $q_{path}(q_1-q_5) = LeastCostTree(Tree)$ 
return  $q_{path}(q_1-q_5)$ 
    
```

3.2 机械臂路径规划策略仿真

为验证 RRT\*-JSS 算法的性能, 以机械臂关节序列中前 5 个关节角的前后变化幅度为评判指标, 实验使用 Matlab 中的 robotics-toolbox 工具箱进行机械臂物理仿真建模并得到 RRT\* 算法、RRT\*-JSS 算法与 N-RRT\*(nodes controlled RRT\*) 算法的仿真结果, 对程序运行时间和机械臂路径的相关数据进行分析。3 次实验的采样点数  $N$  均为 1 200; 扩展步长  $step$  为 0.5 rad;  $q_{min}$  为 0.6 rad, 其中 N-RRT\* 算法的目标偏置概率为 0.6, 扩展控制方向为  $10^\circ$ 。3 组实验中初始点对应的 6 组逆解均选取最合适的一组逆解作为输入, 仿真结果如图 7 与表 2 所示。

表 2 算法仿真结果对比

Table 2 Comparison of simulation results of algorithm			
	RRT* 算法	RRT*-JSS 算法	N-RRT* 算法
关节突变数/次	27	1	122
平均角度变化/ $(^\circ)$	0.851 8	0.338 9	1.604 1
$q_4$ 平均变化/ $(^\circ)$	10.187	0.274 6	2.852 6
路径距离/m	12.852	13.266 8	10.68
平均时间/s	0.544 7	1.130 6	0.874 1

图 7 中未给出的 N-RRT\* 算法仿真图与 RRT\* 算法仿真图相似, 其仿真数据如表 2 所示。由仿真数据可知, N-RRT\* 算法平均时间损耗介于另外两个算法之间, 平均路径距离小于 RRT\* 与 RRT\*-JSS, 但平均关节变化角度与关节突变次数较高。RRT\*-JSS 算法的时间损耗多于另外两个算法, 但是其关节平均变化角度比 RRT\* 算法小 60.21%, 比 N-RRT\* 算法小 78.87%; 关节角度突变次数为 1 次(较于 27 次与 122 次其算法性能显著提升);  $q_4$

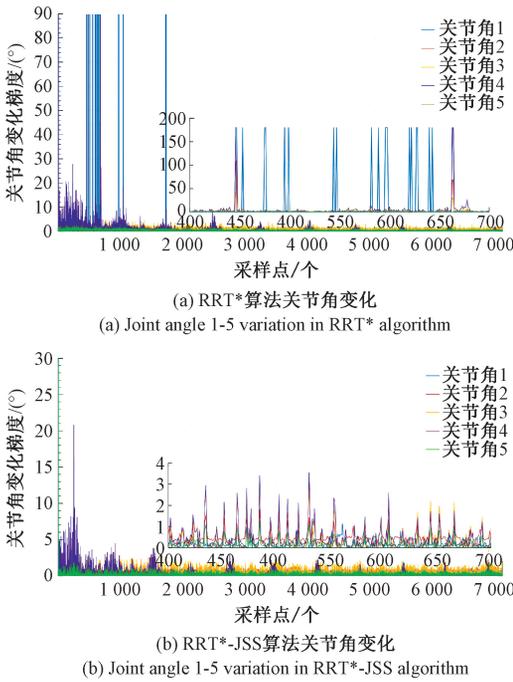


图7 RRT\*算法与RRT\*-JSS算法仿真对比

Fig. 7 Simulation comparison of RRT\* algorithm and RRT\*-JSS algorithm

平均变化角度比 N-RRT\* 算法小 90.37%，比 RRT\* 算法小 97.3%。由以上数据可知，RRT\*-JSS 算法在适当增加时间成本的前提下可以显著的提高机械臂路径中关节序列的平滑程度，这对提高 ESM 实验成像效果有关键作用，符合球面 ESM 扫描实验的要求。该实验在仿真层面上证实上述机械臂路径规划生成策略的可行性。

### 4 ESM 实验与自动聚焦

为了验证所提出的 ESM 球面扫描成像系统的有效性，本文搭建了 ESM 实验系统并进行了实验。

#### 4.1 实验系统搭建与基准源设计

在具体的实验系统搭建过程中，本文选取的扫描球面参数如表 3 所示。

表3 扫描球面参数

Table 3 Scanning spherical parameters

参数	符号	数值
辐射源 $x$ 轴坐标	$w$	0.677 1 m
辐射源高度	$H$	0.22 m
球面半径	$R_s$	0.3 m
球面面积	$S_{scan}$	0.722 7 m <sup>2</sup>
极角范围	$\varphi$	0~96.64°
方位角范围	$\beta$	0~180°

根据以上参数，本文搭建如图 8 所示的实验系统。

该实验系统中被测模块由信号发生器和贴片天线组成，检测模块由检测天线、参考天线组成。其中控制计算机作为整个系统的控制中枢与网络分析仪 VNA 以及机械臂通过 GPIB 构成设备组网进而实现实验的通信。实验使用基于 visa 的 GPIB 通信，该通信方式仅使用 GPIB 的字符串通信指令集而其物理通信介质则使用网口。在实验前首先设置信号发生器输出信号的频率与功率，通过频谱仪确定辐射源复振幅分布的谐振频率。在实验过程中当控制计算机驱动机械臂运动到指定采样点后，由 VNA 获取检测天线与参考天线两个通道的电磁场数据并将其传输给控制计算机。

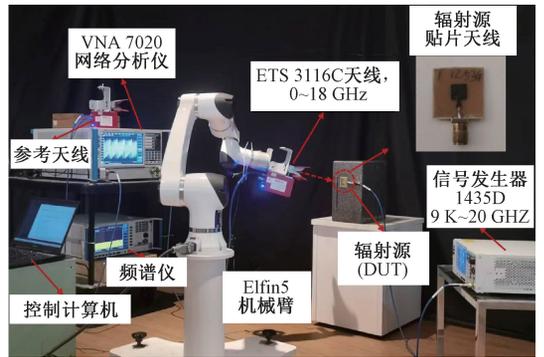


图8 实验场地图

Fig. 8 Schematic diagram of experimental setup

实验中测量基准源为一种由两个正方形微带组成的贴片天线(如图 9 所示)，该贴片天线采用 FR4 材料作为衬底，相对介电常数  $\epsilon_r = 4.4$  F/M，介电损耗正切为 0.02。贴片天线的厚度为 0.8 mm，其他尺寸参数如表 4 所示。利用 HFSS 仿真软件得到的基准源辐射场如图 9(b) 所示。在后续的实验中，该仿真辐射场将作为参考用于验证球面 ESM 扫描成像系统的性能。

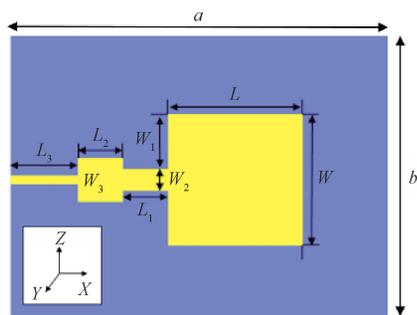
表4 受测源天线几何特性参数

Table 4 Geometric characteristic parameters of the measured source antenna

受测源天线参数	数值/mm	受测源天线参数	数值/mm
$a$	20	$W_1$	2.5
$b$	20	$L_2$	2
$L$	6	$W_2$	1
$W$	6	$L_3$	3
$L_1$	2	$W_3$	0.4

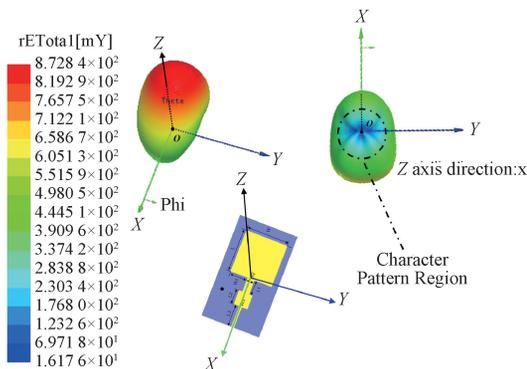
#### 4.2 自动聚焦算法与结果分析

实验中测量天线的电磁学中心点难以通过测量确定，这可能导致系统进行相位变换时存在偏差。为了减小该偏差对成像结果的影响，本文使用自动聚焦算法来确定天线与辐射源的相位变换距离。在获得球面远场扫描数据后，首先将图像处理中灰度差的对比度替换为辐



(a) 受测源天线结构示意图

(a) Schematic diagram of antenna structure of measured source



(b) 基准发射源的模拟辐射图

(b) Simulated radiation pattern of reference emission source

图 9 受测源天线结构及仿真

Fig. 9 The structure and simulation of the measured source antenna

射源平面上的场幅值对比度,分析不同聚焦距离下的幅值对比度来得到最准确的相位变换距离(即焦距)。其中对比度的计算如式(17)~(19)所示。

$$G(x, y) = \sum_{i=x-1}^{x+1} |I(x, y) - I(i, y)| + \sum_{j=y-1}^{y+1} |I(x, y) - I(x, j)| \quad (17)$$

$$W(x, y) = \frac{G(x, y) - G_{\min}}{G_{\max} - G_{\min}} \quad (18)$$

$$L(x, y) = \frac{1}{J \times K} \sum_{x=1}^J \sum_{y=1}^K [W(x, y)]^2 \quad (19)$$

式中:  $I(x, y)$  是成像数据中位置  $(x, y)$  处的幅值强度。通过计算不同相位变换距离下成像结果幅值强度的对比度,筛选幅值对比度最小(这意味着反演成像幅值分布图中幅值的相对变化幅度小)的焦距作为系统重聚焦后的相位变换距离(0.3225 m,图 10 所示)。

在有效确认相位变换距离的基础上,球面 ESM 扫描成像系统获得的成像结果如图 11 所示。由图 11(a)可知,非最佳聚焦距离( $R_s = 0.35$  m, 0.4 m)下的成像结果其在场强强度与场强分布上与自动聚焦成像结果具有明显差异,且该情况下的成像不符合实验所采用的辐射源的场强分布(图 9(b));对于不使用自动聚焦算法得到的

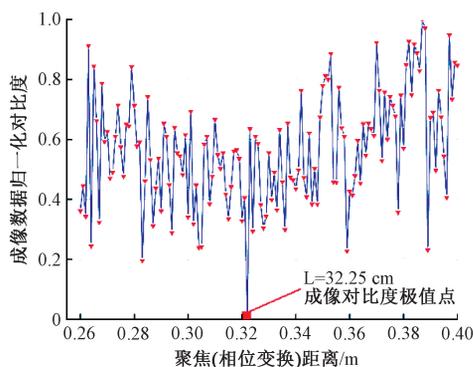


图 10 成像图对比度与聚焦距离的关系

Fig. 10 The relationship between image quality and focusing distance

聚焦距离而使用人工测量得到的聚焦距离( $R_s = 0.3$  m)进行成像的结果,其最大场强处的强度与自动聚焦成像结果相比有约 2 dBm 的衰减,成像准确性低于自动聚焦成像结果;以上对比可以验证聚焦算法的有效性。

同时由图 11 可知,最佳聚焦距离下的实测场相位分布与场强分布均与实验所采用的单贴片天线辐射源的辐射特性吻合,进一步验证本文所搭建的球面 ESM 扫描成像系统的有效性。

## 5 结论

本文以 ESM 球面扫描成像检测任务下机械臂系统模型与控制策略作为研究对象,通过对机械臂构型、球面扫描边界与检测天线姿态进行建模,探索在以上约束下系统的最优设计模式与运动控制算法。以上方法策略在仿真实验中实现平均关节变化角降幅 60.21%,自动聚焦精度 0.1 mm,在由六轴机械臂与基准微波辐射源搭建的验证实验中,实现了自动聚焦与精确成像<sup>[21]</sup>(成像精度不低于 3.14 dBm),可望应用于电子系统的 EMI 检测定位。该工作的未来计划是进一步提高球面模式下的远近场变换精度,并且探索在非规则采样阵列条件下的成像计算方法。

## 参考文献

[ 1 ] LIU Y Z, LI J S, HWANG C, et al. Near-field scan of multiple noncorrelated sources using blind source separation [ J ] IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(4) :1376-1385.

[ 2 ] 刘濮鲲,黄铁军. 太赫兹超分辨率成像评述 I: 非实时成像[ J ]. 微波学报, 2020, 36(3) :1-8.

LIU P K, HUANG T J. Terahertz super-resolution imaging I: Non-real-time imaging [ J ]. Journal of Microwaves, 2020, 36(3) : 1-8.

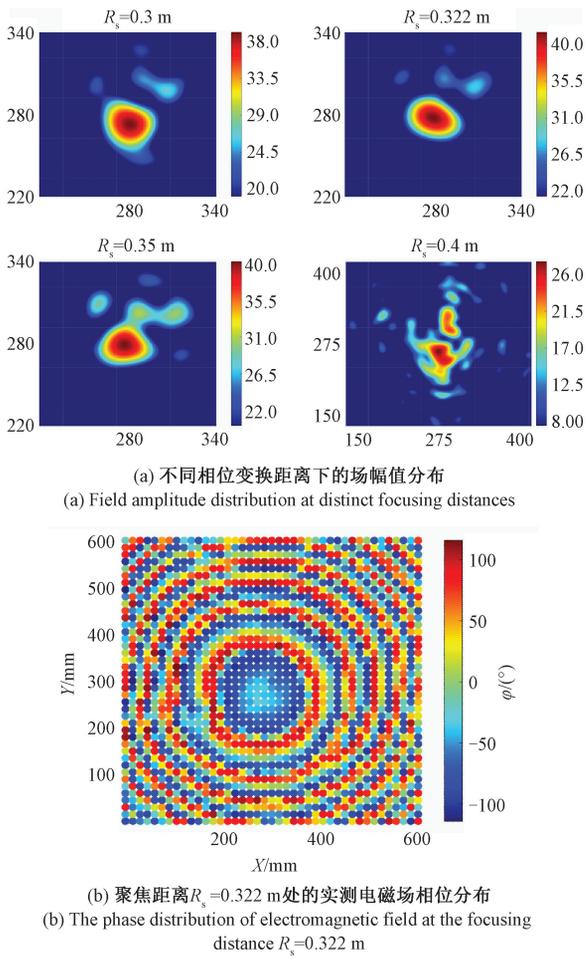


图 11 自动聚焦与成像结果, 其中基准源采样频率  
 $f=9.93$  GHz, 扫描点数  $N=4\ 000$

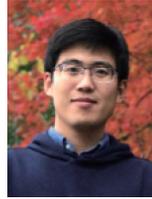
Fig. 11 Automatic focusing and imaging results,  
where the reference source sampling frequency  
 $f=9.93$  GHz, scanning points  $N=4\ 000$

- [ 3 ] 袁义生, 兰梦罗, 刘文钦. 电力电子电路 PCB 中回路间的磁场干扰研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 175-183.  
YUAN Y SH, LAN M L, LIU W Q. Research on inter-loop magnetic field interference in power electronic circuit PCB [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 175-183.
- [ 4 ] GONG P, YANG H, GAO H. Scanning near-field fluorescence microscopy applied to ESEM [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(8): 615-618.
- [ 5 ] YONG S, YANG S, ZHANG L, et al. Passive intermodulation source localization based on emission source microscopy [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 62(1): 266-271.
- [ 6 ] ZHENG J, CHEN X, HUANG Y. An effective antenna pattern reconstruction method for planar near-field

- measurement system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71(1): 1-12.
- [ 7 ] FAROUQ M, SERHIR M, PICARD D. Matrix method for far-field calculation using irregular near-field samples for cylindrical and spherical scanning surfaces [J]. Progress in Electromagnetics Research (B), 2015, 63(2): 35-48.
- [ 8 ] ZHANG L, FENG Y R, PU B, et al. A novel machine-learning-based batch selection method in sparse near-field scanning[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(11): 5019-5028.
- [ 9 ] 许敏, 李博涵, 王凯, 等. 特定辐射源个体识别算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(10): 116-123.  
XU M, LI B H, WANG K, et al. Research on individual identification method of specific emitter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(10): 116-123.
- [ 10 ] VARELA R F, IRAGÜEN B G, SIERRA-CASTAÑER M. Near-field to far-field transformation on arbitrary surfaces via multi-level spherical wave expansion [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(1): 500-508.
- [ 11 ] KIM W, IM H R, NOH Y H, et al. Near-field to far-field RCS prediction on arbitrary scanning surfaces based on spherical wave expansion [J]. Sensors, 2020, 20(24): 719-829.
- [ 12 ] 谢志祥, 张云华, 张羽绒, 等. 球面近远场和远近场变换算法[J]. 电波科学学报, 2019, 34(2): 139-144.  
XIE ZH X, ZHANG Y H, ZHANG Y R, et al. The algorithm of near-far and far-near transformation for spherical surface [J]. Chinese Journal of Radio and Science, 2019, 34(2): 139-144.
- [ 13 ] 张德慷, 马桂金, 李坤, 等. 面向 ESM 任务的机械臂控制策略与优化算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 30-38.  
ZHANG D K, MA G J, LI K, et al. Control strategy and optimization algorithm for the ESM manipulator [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(5): 30-38.
- [ 14 ] PIOTROWSKY L, BERNHARDT V, BAROWSKI J, et al. Antenna pattern characterization with an industrial robot assisted FMCW radar system [C]. 34th IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Singapore, Singapore: IEEE, 2019: 153-155.
- [ 15 ] 张春涛, 王勇. 工业机器人六维力传感器在线标定方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(6): 161-168.  
ZHANG CH T, WANG Y. Research on online calibration

- method of six-axis force sensor for industrial robot [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(6): 161-168.
- [16] LI J, ZHOU J, YONG S, et al. Automatic sparse ESM scan using Gaussian process regression [C]. 7th IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI), Reno, NV, USA, 2020: 671-675.
- [17] ZHANG H, JIN H, LIU Z, et al. Real-time kinematic control for redundant manipulators in a time-varying environment; Multiple-dynamic obstacle avoidance and fast tracking of a moving object [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(1): 28-41.
- [18] CHEN B, PAN S, WANG J, et al. Differential crosstalk mitigation in the pin field area of serdes channel with trace routing guidance [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(4): 1385-1394.
- [19] QI W, LIU J, CHEN X, et al. Supervisory predictive control of standalone wind/solar energy generation systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(1): 199-207.
- [20] 林依凡, 陈彦杰, 何炳蔚, 等. 无碰撞检测 RRT~\* 的移动机器人运动规划方法 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 257-267.
- LIN Y F, CHEN Y J, HE B W, et al. Non-collision checking RRT algorithm for mobile robot motion planning [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 257-267.
- [21] ZHANG L, KHLIKEVICH V V, JIAO X, et al. Sparse emission source microscopy for rapid emission source imaging [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(2): 729-738.

### 作者简介



刘晓瑞(通信作者), 2014年、2019年分别于中国海洋大学获得硕士与博士学位, 2018年作为公派博士研究生在密苏里科技大学电磁兼容中心访问学习。现为青岛大学电磁兼容中心访问教授, 主要研究方向为机器人学、电磁兼容检测技术、人机社会交互等。

E-mail: liuxiaorui@qdu.edu.cn

**Liu Xiaorui** (Corresponding author) received the M. Sc. and Ph. D. degree of intelligent information and communication system in Ocean University of China, in 2014 and 2019, respectively. In 2018, he participated the Electro Magnetic Compatibility Lab of Missouri S&T as a visiting Ph. D. scholar. He is currently an associate professor with the department of automation engineering, Qingdao University, China. His main research interests include robotics, EMC measurement technology and human-machine interaction.