

DOI: 10.13382/j.jemi.B2105060

面向 ESM 任务的机械臂控制策略与优化算法^{*}

张德慷¹ 马桂金¹ 李 坤² 刘晓瑞^{1,3}
(1. 青岛大学自动化学院 青岛 266071; 2. 青岛大学电子信息学院 青岛 266071;
3. 山东省工业控制技术重点实验室 青岛 266071)

摘 要:针对机械臂在电磁兼容检测领域的应用需求,本文研究并提出了其在电磁辐射源定位检测(emission source microscopy, ESM)任务中的设计方法与控制策略。在设计方法上,对机械臂结构、天线姿态以及采样面完整性等约束条件进行建模,依据面积最优原则生成 ESM 采样柱面。在控制策略上,基于关节搜索策略改进 RRT^{*}算法(RRT^{*}-JSS),实现在给定扫描面下对机械臂关节状态的最优规划。以上方法与策略在仿真实验中使机械臂在 ESM 任务中以扫描路径损失 4.3%的代价实现平均关节变化角降幅 68.96%。在基于 Elfin5 型机械臂与点状辐射源搭建的验证实验中,实际获得的 ESM 成像分布与仿真结果间误差≤0.35 dBm。以上仿真与实验结果证明了研究 ESM 机械臂设计方法与控制策略的有效性,可望在 EMI 检测领域得到应用。

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

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

Control strategy and optimization algorithm for the ESM manipulator

Zhang Dekang¹ Ma Guijin¹ Li Kun² Liu Xiaorui^{1,3}
(1. Automation School, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 2. Electronic and Information School, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 3. Shandong Key Laboratory of Industrial Control Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: According to the requirements on manipulator robot in the electromagnetic compatibility measurement, this paper proposes the design methodology and control strategy of 6-DOF manipulator in emission source microscopy (ESM) task. The task constraints, the structure of the manipulator, orientation of the antenna and the integrity of scanning surface are modeled, and the ESM sampling cylinder is generated according to the principle of area optimization. The improved RRT^{*} algorithm based on joint search strategy (RRT^{*}-JSS) realizes the optimal planning of the joint position state of the manipulator under a given scanning plane. In the simulation experiments, above method and strategy enable the manipulator to achieve a reduction of 68.96% in the average joint change angle, under the scanning path loss of 4.3%. In the verification experiment based on Elfin5 manipulator and patch-shaped radiation source, the error between the actual obtained ESM imaging and the simulation results is below 0.35 dBm. Above simulation and experimental results prove the effectiveness of the studies, which is expected to apply in the field of EMI measurement.

Keywords: kinematics of robotic arm; electromagnetic compatibility; emission source microscopy (ESM); optimal control; path planning

0 引 言

随着电子工业的发展特别是 5G 乃至太赫兹技术的兴起,对电子设备产品的电磁兼容检测技术提出了越来越高的要求^[1]。对于目前广泛存在于高速电子系统中的电磁干扰(electro magnetic interference, EMI)问题,目前较为流行检测定位的微波暗室定值检测法^[2]以及近场扫描法^[2]。随着电路系统结构密度与功能密度的提高,以上检测方法都面临瓶颈^[3]。以近场扫描为例,该技术是

以检测探头(或天线)直接扫描电路系统表面获得受测设备(device under test, DUT)的近场辐射强度分布^[4],但是当前近场探头的小型化进程已滞后于电路密度的增长,难以满足高密度电路近场分布的成像精度要求^[5]。此外,高速电子系统表面都附着有倏逝杂波,其对近场扫描精度的影响也缺乏有效的平抑手段^[6]。针对以上问题,国内外已广泛认识对电子设备 EMI 进行电磁辐射源定位检测(emission source microscopy, ESM)的必要性^[7]。在已有的研究成果中,通用的方法是将 DUT 远场近似为平面波进行计算^[8],已报道的样机设备也只具有单一扫描自由度^[9]。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的精度。

为了解决以上问题,也有将多轴机械臂投入电磁兼容检测应用的报道,如美国的双臂测试系统(large antenna positioning system, LAPS)^[10]以及 NSI-MI 公司提出机器人天线检测系统(robotic antenna measurement system, RAMS)等^[11]。以上新型检测系统与技术都是通过机器人抓持检测天线完成对目标辐射源的检测^[12]。由于机械臂受制于扫描任务中辐射源特征、检测天线(或探头)极化方向、扫描边界等条件的约束,其应用局限于平面扫描与定值检测,对空间复杂平面的扫描需要研究对应的控制策略。目前对于多关节机器人的运动学求解^[13]与路径规划问题研究较多^[14-15],但是对于特定多重约束下的,特别是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^[16]。

本文将六轴机械臂与微波近场成像技术相结合,重点研究其在柱面扫描模式下的机械臂控制策略,以期构建符合电磁辐射机理的扫描平面与检测模式,实现对电子设备 EMI 近场的精确成像。为实现以上目标,对机械臂结构、探测天线极化特征与空间采样面等约束条件进行建模,提出在以上约束条件下机械臂最大柱状扫描平面(即成像孔径)的生成方法。在获得最大成像孔径的前提下,进一步求解出机器人在柱面 ESM 扫描任务下关节位状态的最佳运动规划与控制策略。仿真与实验结果验证了以上工作准确性,证明可以为 ESM 扫描机器人的设计提供理论与方法支持。

1 ESM 检测原理与机械臂建模

ESM 技术衍生自合成孔径雷达成像原理^[17],在检测过程中使用多关节机器人抓持检测天线在空间范围内进行平面或扇面扫描。通过在给定空间采样面上分析检测天线与固定参考天线复振幅对比,可以实现在条件下对电路系统辐射近场的反演成像(如图 1 所示)。在获取了受测设备夫琅禾费衍射区域(距离受测辐射体 $3 \sim 5\lambda$)内的辐射强度与相位分布后,ESM 的成像算法可以通过

式(1)反演辐射源近场电磁场强度分布。

$$E_i^0(x, y, 0) = \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}\{E_i(x, y, z_0)\} \cdot e^{jk_z z_0}] \quad (1)$$

式(1)算子 $e^{jk_z z_0}$ 对应图 1 柱状扫描平面,其中 k_z 表示受测源电磁辐射的传播矢量,受测辐射源 O_c 处于该平面的中心轴上,且与机械臂坐标系中的 x_0 轴相交。实际检测中取远场距离为采样柱面的半径($z_0 = R$),通过在有限远场空间内采集受测电子设备的平面辐射强度与相位分布 E_i 并使用二维傅里叶变换($\mathcal{F}$)将电磁波的空间分布转化到了频率域内进行变焦,即可以获得受测设备的近场电磁辐射强度成像 E_i^0 。由于近场扫描中检测/参考天线存在固有的极化特征与校正参数,这就要求对机器人的末端三维姿态给予闭锁(固化天线姿态向量 L ,如图 1 所示),并在此约束下对机械臂扫描进行规划与控制。在规划方法讨论中仅考虑天线正交、竖直两种极化方向及其对应的约束条件。

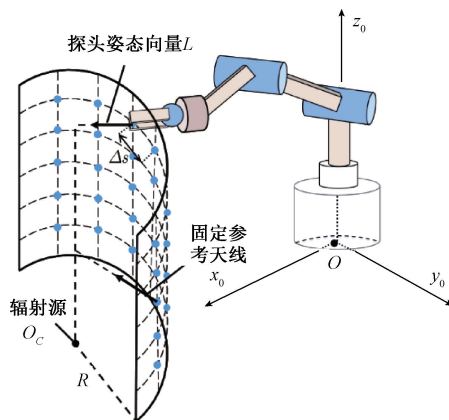


图 1 Elfin5 六自由度机器人空间柱面采样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cylindrical scanning driven by Elfin5 6-DOF Manipulator

实验对象选型为 Elfin5 型六自由度机械臂,其机械结构如图 2 所示。其中 z_i 指示关节轴线方向,基座坐标系 $x_0 y_0 z_0$ 与基坐标系 $x_i y_i z_i$ 满足右手螺旋法则,连杆转角 q_i 表示绕 z_i 轴旋转角度,连杆距离 d_i 表示沿 z_i 轴平移距离, a_i 表示沿 x_i 轴平移距离,连杆扭角 α_i 表示 z_i 绕 x_{i+1} 轴旋转角度, θ_i 表示各个关节可以自由旋转的角度($1 \leq i \leq 6$)。机械臂实际运行时 $q_2, q_3 \in [-q_{lim}, q_{lim}]$ 作为物理约束条件,取 $q_{lim} = 3/4\pi$ 。忽略各关节包络长度,据图 2 所建立的 Elfin5 机器人结构模型,表 1 给出其对应 DH 模型参数。

如前文所定义的,在 ESM 任务中存在对幅值分布的相位分布的双重采集,根据采样定理要求在信号的一个周期内需要至少采样两次。应用到图 1 中的模型就是轴向两采样点间的相位差不得大于 π ,其关系如式(2)~(3)所示。

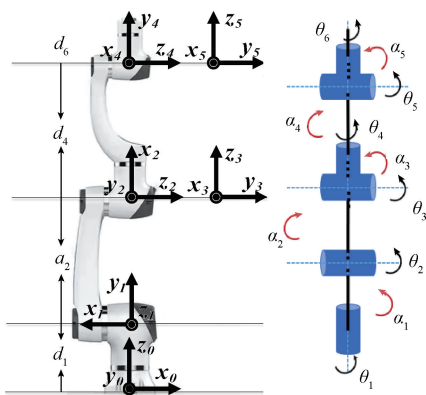


图 2 Elfin5 六自由度机器臂结构

Fig. 2 Structure diagram of Elfin5 manipulator

表 1 Elfin5 机械臂 D-H 参数表

Table 1 D-H parameter table of manipulator

关节	q_i / rad	a_i / m	d_i / m	α_i / rad
1	q_1	0	0.22	$\pi/2$
2	$q_2 + \pi/2$	0.38	0	π
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

$$k \cdot \Delta s \cdot \sin\theta < \pi \Rightarrow \Delta s < \lambda/2\sin\theta \quad (2)$$

$$\sin\theta = R/L \quad (3)$$

式中 R/L 分别表示扫描面尺度以及其与检测天线间的法向距离, Δs 表示在扫描面内均匀分布的采样点间距。以上对应关系说明在检测波段与天线检测距离一定的 ESM 扫描场景中, 反演结果的分辨率与扫描孔径及采样密度呈正相关关系。基于以上结果, 扫描任务将从最大扫描面积与最短扫描路径两方面出发, 具体讨论对机械臂的控制策略。

2 末端姿态约束下的任务分析与路径规划

2.1 末端执行器限制下的不可达工作区分析

实际应用中的机械臂轴关节存在转角限制且 ESM 任务的天线极化方向约束下机械臂只能通过五自由度进行非冗余任务空间的运动控制。设计 ESM 扫描系统时, 需要结合机械臂关节限位约束与末端天线极化方向约束现行求解机械臂的实际不可达工作区, 进而在其主(可达)工作区内开展路径计算与运动控制。预期分步骤研究施加末端姿态约束前后对机械臂可达性的影响, 首先不考虑末端姿态即轴关节 4~6, 由文献[18]可知轴关节 1 有各向同性, 只需任取 q_1 并对特例下的二维不可达区域进行旋转即可得到对应笛卡尔坐标系下的不可达区

域, 其对应关系如图 3 所示。

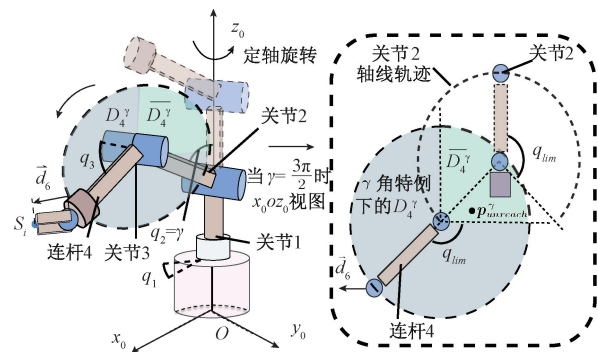


图 3 未考虑末端执行器约束的轴连杆 4 不可达区域示意图

Fig. 3 Schematic diagram of unreachable area of axis link 4 without considering the end effector constraint

在图 3 中 q_1 被设定为已知定量并认为对于机械臂基座坐标系 $x_0y_0z_0$ 下的任意坐标点 $p: (x, y, z)$, $\forall q_2 = \gamma$, 其中 $\gamma \in [-q_{lim}, q_{lim}]$, 若机械臂轴连杆 4 末端在 p 处不存在运动学逆解, 则称该点 p 为轴连杆 4 一不可达奇点 $p_{unreach}^\gamma$, 而其构成的点集 $\{p_{unreach}^\gamma\}$ 则称为轴连杆 4 末的不可达区域 $\overline{D_4^\gamma}$ 。在此基础上, 遍历 γ 在 $[-q_{lim}, q_{lim}]$ 内取到的所有不可达区域称为集合 $\{D_4^\gamma\}$ 。至此即可得到轴连杆 4 末端在限位角下的不可达区域 $\overline{D_4} = \bigcap \{\overline{D_4^\gamma}\}$, 对 $\overline{D_4}$ 围绕轴关节 1 做定轴旋转得到的区域 $\overline{\Omega_4}$ 封闭边界方程为式(4), 其中 $R_{untouch}$ 为不可达球域的半径 $= a_2 \cdot \sin(\pi/4)$ 。

$$\overline{\Omega_4}: x^2 + y^2 + (z - d_1)^2 = R_{untouch}^2 \quad (4)$$

根据式(4)表述的不考虑末端姿态下的不可达域 Ω_4 , 现施加末端抓持天线正交采样面的约束, 即研究 4~6 关节连杆对 Ω_4 的影响。若正交采样面上有一点 S_i 且轴连杆偏移 6 末端在该点处不存在运动学逆解, 则应将 $\overline{\Omega_4}$ 向正交采样面方向偏移 $\vec{d}_i$ 得到轴连杆偏移 6 末端的不可达区域 Ω_6^i 。遍历正交约束的所有情况, 最终得到末端执行器抓持天线中点的不可达区域 $\overline{\Omega_6} = \bigcup \{\Omega_6^i\}$, 对应的笛卡尔封闭边界参数方程如式(5)所示。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R_i \begin{bmatrix} \cos\varphi \cos\theta \\ \cos\varphi \sin\theta \\ \sin\varphi \sin\theta \end{bmatrix} + R_o \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix} \\ R_i = R_{untouch} - d_6 \\ R_o = R_{untouch} + d_6 \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_i, R_o 表示 $\overline{\Omega_6}$ 的内径与外径, $\varphi, \theta \in [-\pi, \pi]$ 表示参数方程的参数角。根据由表 1 给出的 D-H 参数, 通过式(5)即可计算出 Efin5 机器人末端执行器的实际不可

达区域 $\bar{\Omega}_6$ 及其内外径 R_i, R_o , 其计算结果如图 4 所示。

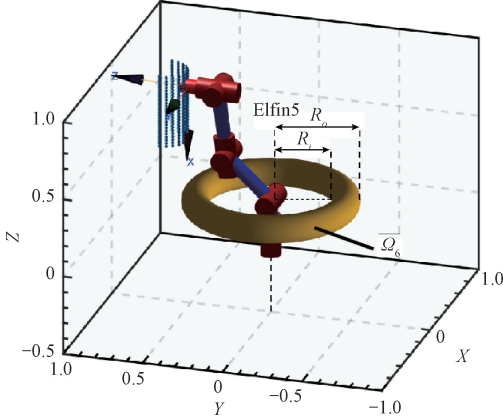


图 4 Efin5 机器人末端执行器约束下的不可达区域示意图

Fig. 4 Schematic diagram of unreachable area constrained by the Efin5 robot end effector

2.2 六自由度机械臂下 ESM 最大扫描面的分析

已经对 Efin5 机器人在末端执行器约束下的不可达区域 $\bar{\Omega}_6$ 进行分析后,接下来进一步研究 ESM 最大采样柱面参数的选取。假设基座坐标系下有 C 采样面满足如式(6)条件。

$$D_{\text{offset}} = \min \{ \| C - \bar{\Omega}_6 \| \mid C \cap \bar{\Omega}_6 = \emptyset \} \quad (6)$$

其中, D_{offset} 为 C 与 $\bar{\Omega}_6$ 间最短欧氏距离,取 C 上一采样点 (x, y, h) 为 $s_{x,y}^h$,轴连杆偏移 6 末端夹持天线在点 $s_{x,y}^h$ 处正交约束矢量称为 $\vec{d}_6^{x,y}$,考虑到 $\vec{d}_6^{x,y}$ 任意高度下均具有相同约束效应,只需研究 $x_0o_0z_0$ 视图投影下点 $s_{x,y}^h$ 处天线约束矢量 $\vec{d}_6^{x,y}$ 对采样面选取的影响即可,具体如图 5 所示。

已知忽略 $\vec{d}_6^{x,y}$ 约束下的轴连杆 4 末端可达区域 Ω_4 , 设点 $s_{x,y}^h$ 在 $x_0o_0y_0$ 视图投影为点 $s_{x,y}$ 且 C 上全部的 $s_{x,y}$ 构成集合 S ,易知在点 $s_{x,y}$ 处的 $\vec{d}_6^{x,y}$ 偏移约束下 Ω_4 有且仅对应单一轴连杆偏移 6 末端可达区域 $\Omega_6^{x,y}$,定义为有单映射 $f: S \rightarrow \{\Omega_6^{x,y}\}$ 。若仅在单一静态约束区域 Ω_6 内 $\Omega_6 \subseteq \bigcup \{\Omega_6^{x,y}\}$ 最大化生成扫描柱面,显然受限于 Ω_6 每个 $s_{x,y}$ 对应的 $\Omega_6^{x,y}$ 都没有被充分利用的原因,生成的扫描柱面并非极大值。

鉴于以上问题,本文提出试基于采样点集合 S 来寻找满足采样点单映射的动态约束区域 Ω_6 的方法,方法中 Ω_6 优先考虑单映射 f 关系下生成扫描柱面,即 $\Omega_6 \subseteq \bigcup \{\Omega_6^{x,y}\}$ 且优先满足 $\Omega_6 = f(S)$ 。其中 $\bigcup \{\Omega_6^{x,y}\} = \{\Omega_6^{\text{main}}\} \cup \{\Omega_6^{\text{Bd}}\}$,具体可达区域见式(7)、(8)。式(7)~(8)中 $(m_{x,y}^{\text{lim}}, n_{x,y}^{\text{lim}}, k_{x,y}^{\text{lim}})$ 为 $|q_3| = q_{\text{lim}}$ 时轴连杆 4 末端坐标,

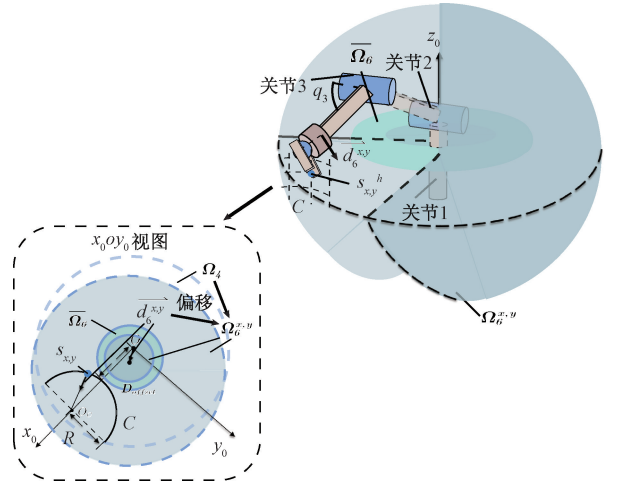


图 5 $x_0o_0y_0$ 视图下 $s_{x,y}^h$ 处 $\vec{d}_6^{x,y}$ 约束对可达区域的影响

Fig. 5 The influence of the constraint $\vec{d}_6^{x,y}$ on the reachable area at $s_{x,y}^h$ under the view of $x_0o_0y_0$

Ω_6^{main} 表示一般情况下即 $|q_3| \neq q_{\text{lim}}$ 时 $\Omega_6^{x,y}$ 的实际空间, Ω_6^{Bd} 表示 $|q_3|$ 取 q_{lim} 时的 $\Omega_6^{x,y}$ 的实际空间, R_{reach} 为 Ω_6^{main} 的封闭半径。

Ω_6^{main} :

$$\begin{cases} (x - \cos \vec{d}_6^{x,y})^2 + (y - \sin \vec{d}_6^{x,y})^2 + (z - d_1)^2 \geq D_{\text{offset}} \\ (x - \cos \vec{d}_6^{x,y})^2 + (y - \sin \vec{d}_6^{x,y})^2 + (z - d_1)^2 \leq R_{\text{reach}} \\ \pi/2 + q_{\text{lim}} > \text{Arctan} \frac{z - d_1}{x - \cos \vec{d}_6^{x,y}} > -\pi + q_{\text{lim}} \end{cases} \quad (7)$$

Ω_6^{Bd} :

$$(x - m_{x,y}^{\text{lim}})^2 + (y - n_{x,y}^{\text{lim}})^2 + (x - d_1 - k_{x,y}^{\text{lim}})^2 \leq d_4^2 \quad (8)$$

通过设置采样柱面的半径 R 、高度 H 以及偏移量 D_{offset} 来生成不同的点集 S ,并以采样面的实际采样面积 A 最大为目标函数在 S 各采样点单一映射的非冗余空间中进行非线性规划,最大化地生成扫描柱面,其采样面积与约束条件如式(9)所示。

$$\begin{aligned} \max A &= \pi RH \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \Omega_6 = f(S) \\ \Omega_6 \subseteq \bigcup \{\Omega_6^{x,y}\} = \{\Omega_6^{\text{main}}\} \cup \{\Omega_6^{\text{Bd}}\} \\ D_{\text{offset}} = \min \{ C - \bar{\Omega}_6 \mid C \cap \bar{\Omega}_6 = \emptyset \} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

2.3 末端姿态约束下的搜索策略与路径规划

得到的 ESM 扫描采样面参数后,此处对 Efin5 机器人路径规划进行设计,目标是得到一条在保证 ESM 反演成像效果基础上,减小采样序列的路径长度且保证序列

相邻关节角变化平稳的路径。

首先对采样柱面作栅格化预处理,将采样点与相邻采样点的空间关系构建无向图结构 $G(V, W)$, 其中采样点之间的连线构成 V , 连线的欧式距离构成权重 W (如图 6 所示)。为找到不重复经过所有采样点的最短路径则需要求解得到 TSP 问题下的最短 Hamilton 通路, 运用 Christofides 算法^[19]与目标损失函数式 (10), $W(i, j)$ 为前后两采样端点 v_i 和 v_j 构成的边权重, 最终得到最短采样序列 Q 迹路径及其距离。

$$\min \{ \sum W(i, j) \mid v_j \in V - \{v_i\} \} \quad (10)$$

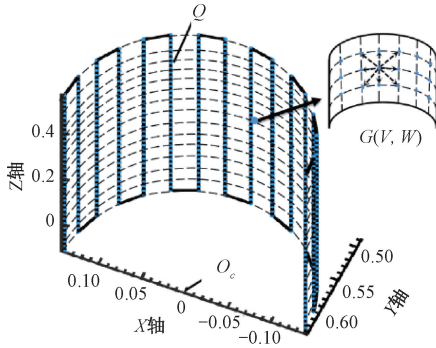


图 6 栅格化采样面上 Hamilton 通路示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Hamilton path on rasterized sampling surface

假设已知基座坐标系下不考虑正交约束的末端执行器中点位姿矩阵为 0T_6 , 在机器臂运动学逆解求解步骤时需要在其基础上再对姿态 (即轴关节 4~6) 进行旋转变换后才能满足正交约束条件, 0T_6 具体变换见式 (11)~(12)。机械臂逆解求解方法参考^[20-21], 0R_6 为考虑正交约束的末端执行器中点位姿矩阵, ${}^{i-1}T_i$ 代表坐标系 $x_{i-1}o_{y_{i-1}}$ 变换至坐标系 $x_i o_{y_i}$ 的齐次变换矩阵, $R_x(\alpha)$, $R_y(\beta)$ 为绕 x , y 轴的三阶旋转变换矩阵, 旋转角 $\alpha = -\pi/2, \beta = -\text{atan2}(x_{o_c} - \cos \vec{d}_{6^{x,y}, y_{o_c}} + \sin \vec{d}_{6^{x,y}})$, 其中 $(x_{o_c}, y_{o_c}, z_{o_c})$ 代表采样面 C 底面的圆心坐标。

$$\begin{aligned} {}^0R_6 &= \\ {}^0T_6 R_x(\alpha) R_y(\beta) &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 R_x(\alpha) R_y(\beta) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{aligned} R_x(\alpha) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & p_y \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ R_y(\beta) &= \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 & p_x \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (12)$$

在已知最短采样序列 Q 与其对应正交约束下位姿矩

阵 0R_6 , 通过传统 RRT* 方法对相邻采样点进行路径规划得到的关节角组存在变化幅度过大的问题, 其路径的关节序列前后分布不均, 导致机械臂速度、加速度变化可能会超出伺服电机与减速器调节范围, 进而造成轨迹的累计误差。

为获得平滑稳定的关节角变化序列, 本文提出一种基于关节搜索策略的 RRT* 算法 (RRT* -JSS)。该方法将采样序列 Q 上的采样点 $s_{x,y}^h$ 通过运动学逆解从笛卡尔空间转换至关节角空间, 并插补出相邻关节角变化幅度最小的路径。考虑到六自由度机械臂第 6 关节对其整体运动影响并不显著, 因此算法优先规划并找到一条 1~5 关节角总体变化幅度最小的路径, 算法流程如算法 1 所示。

算法 1: 基于关节角搜索策略 RRT* 算法

输入: 哈密顿路径中初始点关节角集合 $qstart_{(x,y,z)}$, 目标点关节

角集合 $qgoal_{(x,y,z)}$, 树生长步长 step, 迭代的次数 N 。

输出: 关节角平滑过渡的路径点关节角集合 $qpath_{(q1-q6)}$

$Tree_1 = \text{InitializeTree}(qstart_{(x,y,z)})$

for $i = 1$ to N do

$q_{rand} = \text{GenerateRandSample}(Tree_i)$

$q_{nearest} = \text{FindLeastAmplitude}(q_{rand})$

$q_{new} = \text{Extend}(Tree(q_{nearest}, q_{rand}), \text{step})$

if $\text{JointLimit}(q_{nearest}, q_{new})$ and $\text{NotBorderBlock}(q_{nearest}, q_{new})$ then

$TreeConnect(Tree_i, q_{new})$

$\{q_i\} = \text{Nearest}(q_{new}, r_{range})$

for each $q_i = q_1$ to q_n do

$Tree_i = \text{Rewrite}(q_i, q_{new})$

$qpath_{(q1-q6)} = \text{LeastCostTree}(Tree)$

return $qpath_{(q1-q6)}$

改进的搜索策略相较于经典 RRT*, 其维度会由三维上升至五维, 但较短的栅格化的采样间距离使 RRT* 规划收敛速度较快, 且通过控制 Rewrite 步骤中的重布线半径 r_{range} 能够实现平衡搜索效率与关节角变化幅度间的平衡, 因此单次搜索下单位时间成本较小且相对固定。

3 机械臂路径规划策略仿真

为验证改进算法运动规划策略的性能, 以测试 Elfin5 机器人关节角平稳采样为目标, 实验使用 Matlab Toolbox 工具箱进行机械臂物理仿真建模, 并分别进行传统 RRT* 与 RRT* -JSS 算法下的两组路径规划仿真实验与结果分析。两者仿真的迭代次数 N 为 1 000 次, 步长 step 设置为 0.5 rad, 重布线半径 r_{range} 范围为 $[0.01 \text{ rad}, 0.15 \text{ rad}]$, 根据路径 Q 上下文选择采样序列 8 组逆解中合适的关节角组作为输入起始、目标关节集, 算法仿真结

果见图 7 与表 2。

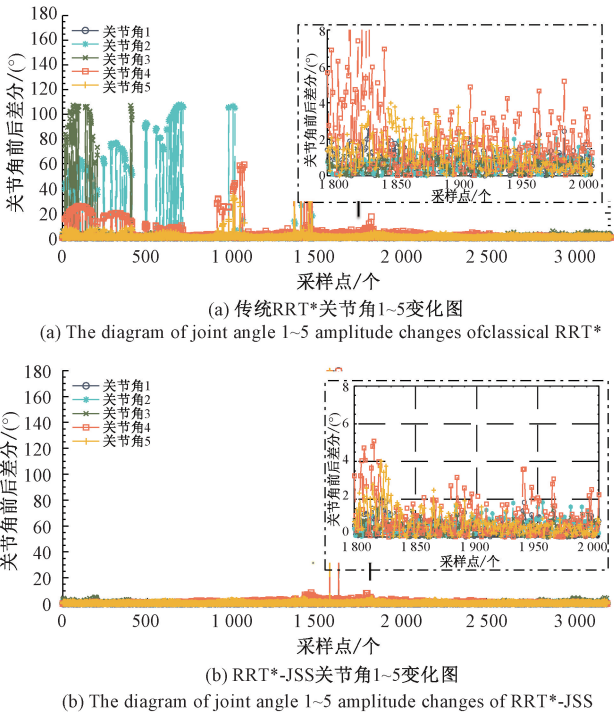


图 7 经典 RRT* (a)、RRT* -JSS(b) 关节角 1~5 变化对比图
Fig. 7 Comparison chart of amplitude changes of joint angle 1~5 between classical RRT* (a) and RRT* -JSS (b)

表 2 两种算法仿真结果对比
Table 2 Comparison of simulation results of two algorithms

算法	差分超过 90°/次	平均变化角/(°)	关节 4 平均变化角/(°)	扫描距离/m	平均时间/s
RRT*	79	1.973 4	2.141 9	16.857 5	1.043 5
RRT* -JSS	8	0.612 5	1.312 0	17.583 2	1.343 2

通过比较图 7 中 RRT*，RRT* -JSS 算法下两组关节角集合序列 $q_{path}(q_1 \sim q_5)$ 构成的差分序列,发现 RRT* 算法下关节角差分变化剧烈而 RRT* -JSS 算法下采样差分序列更稳定平滑,由表 2 可知序列差分角突变超过 90° 的次数显著下降(约 10 倍), $q_1 \sim q_5$ 平均关节变化角下降了 68.96%。在图 7 中的关节角差分序列局部图(采样点 1 800~2 000)也可以看到关节角 4 的平均变化更加平滑化(平均变化角下降 0.837°)。

虽然 RRT* -JSS 算法下的扫描距离和时间成本都有所增加,但在保证机械臂末端位置与姿态的准确性的前提下认为其在路径规划策略允许接受范围内。RRT* -JSS 使关节角前后总体变化幅度更加稳定,减少不利机械臂精确定位的关节角突变状况,有利于提高系统的稳定性,也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 系统实验与数据分析

为检验上述控制策略的有效性,本文在 Elfin5 机器人基础上开展 ESM 扫描任务。通过将上文的计算方法付诸于机械臂系统,可得中间参数如表 3 所示。根据算法 1 中的设定,最终由式(3)计算得出机械臂的最大扫描柱面积 $A = 0.378\ 7\ \text{m}^2$,根据 $\Delta s = 1.30\ \text{cm}$ 步进单位计算,在空间中生成数量为 $N = 2\ 913$ 的采样点阵。

表 3 机械臂特征参数
Table 3 Characteristic parameters of manipulator

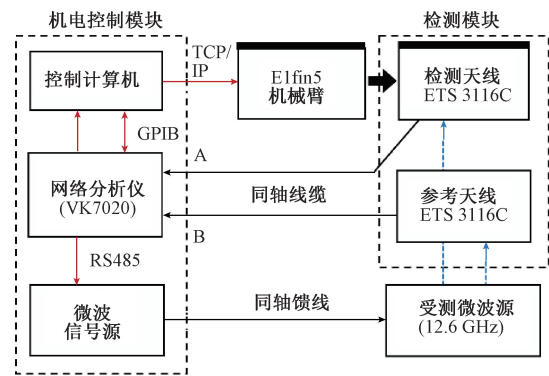
ESM 扫描参数	数值
$\bar{Q}_6$ 内径 R_i/m	0.087
$\bar{Q}_6$ 外径 R_o/m	0.453 7
最短 q_{path} 路径/m	17.583 2
D_{offset}/m	0.45
R/m	0.16
H/m	0.75
L/m	0.125
$\Delta s/\text{cm}$	1.30

ESM 扫描实验设置如图 8 所示,整个检测系统分为 3 部分,分别是由控制计算机、网络分析仪以及微波信号发生器构成的机电控制模块,由天线与受测源构成的检测模块以及机械臂本体如图 8 所示。控制计算机在系统中作为控制器一方面通过局域网实现机械臂的关节运动控制,另一方面通过 GPIB 以及串行总线完成对于网络分析仪及微波信号源的控制与数据读取。网络分析仪的两个通道(A,B)分别连接检测天线与参考天线,在实际执行 ESM 扫描过程中,计算机首先控制机械臂抓持检测天线运动运动到指定空间点位,然后分别读取 A,B 通道的实时幅值与相位角。通过遍历指定扫描面内的远场分布,然后根据式(1)反演出受测辐射源的近场分布。

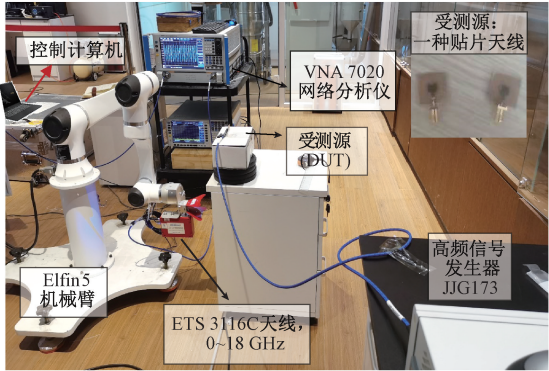
实验中检测天线与参考天线都采用 ETS 3116C 有源天线,受测源(device under test,DUT)为一个由两个正方形微带组成的贴片天线(如图 9 和表 4 所示),该天线衬底采用 FR4 材料,其相对介电常数 ϵ_r 为 4.4,介质损耗角正切为 0.02,厚度 h 为 0.8 mm。

表 4 受测源天线尺寸参数
Table 4 Geometric parameters of the test 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



(a) 实验设置图
(a) Experimental setup diagram



(b) 实验场地图
(b) Experimental site map

图 8 ESM 柱状扫描实验图

Fig. 8 The diagram of ESM experiment

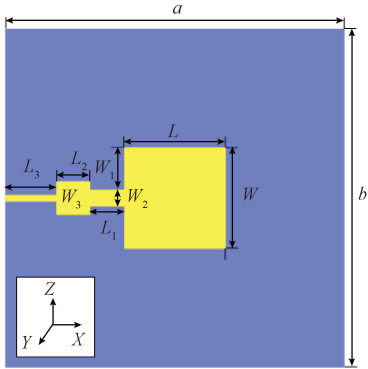
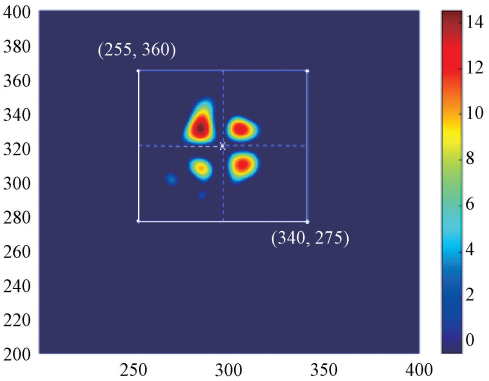


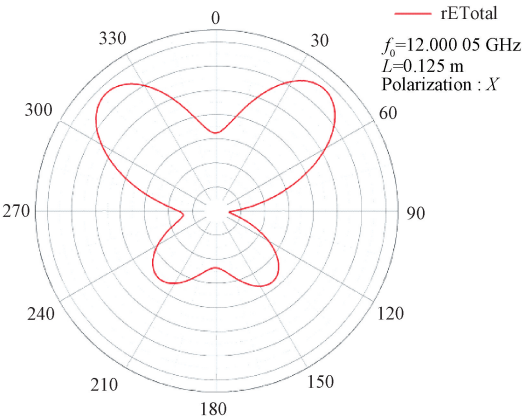
图 9 受测源天线结构示意图

Fig. 9 Source antenna configuration

通过对该受测源远场进行柱面扫描,最终反演获得的近场电场前度分布与仿真结果如图 10 所示(中心频率 12.000 05 GHz, 远场距离 0.125 m,选取 X 极化方向)。通过对比图 10(a) 与近场仿真图 10(b) 可以发现,在远场距离通过柱面扫描模式的 ESM 检测方法能够还原受测源在测试方向上的主瓣分布,且相对强度与仿真图谱基本吻合,其归一化成像强度误差为 ≤ 0.35 dB。这验证了该研究扫描控制策略与反演算法的有效性。



(a) 扫描数据反演获得的近场分布
(a) The near-field amplitude microscopy of source



(b) 通过HFSS仿真获得天线近场强度分布
(b) The simulated near-field amplitude microscopy of source achieved by HFSS

图 10 实验反演成像与仿真成像对比($f = 12.000\ 05\ \text{GHz}$, $L = 0.125\ \text{m}$, $N = 2\ 913$)

Fig. 10 Comparison between the experiment inversion data and the simulation

5 结 论

以应用于 ESM 检测任务的六自由度工业机械臂为实验对象,重点研究其在柱面扫描、正交天线极化方向以及点辐射源检测等多重约束条件下的扫描面生成算法与运动控制策略。基于以上扫描模式及控制策略,在 Elfin5 型机械臂上进行了实验检验,通过对点状辐射源的扫描成像验证了所提出的以上理论方法的可行性和可靠性。该研究为传统的六自由度机械臂执行多重约束下的非冗余任务提供了理论与方法支持。

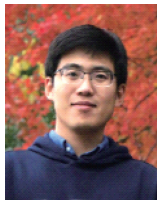
参考文献

[1] 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.
- [2] SØRENSEN M, KAJBAF H, KHLKEVICH V V, et al. Analysis of the effect on image quality of different scanning point selection methods in sparse ESM [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(6): 1823-1831.
 - [3] 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.
 - [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] LI J, KHLKEVICH V, HE R, et al. Imaging distributed sources with sparse ESM technique and Gaussian process regression [C]. 21th International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium, IEEE, 2021: 23-28.
 - [6] 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.
 - [7] 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.
 - [8] 李南京, 李元新, 胡楚锋. 球模式展开理论近远场变换及快速算法 [J]. 电子与信息学报, 2015, 37(12): 3025-3029.
LI N J, LI Y X, HU CH F. Near-field to far-field transformations based on spherical wave expansions and fast algorithm [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(12): 3025-3029.
 - [9] 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.
 - [10] WEISS M, LI-BABOUD Y, ANAND D, et al. A calibration of timing accuracy in nist cyber-physical systems testbed [C]. 12th IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control, and Communication (ISPCS), Geneva, Switzerland: IEEE, 2018: 121-136.
 - [11] 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.
 - [12] STEINER M, GREBNER T, WALDSCHMIDT C. Millimeter-wave SAR-imaging with radar networks based on radar self-localization [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(11): 452-466.
 - [13] 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.
 - [14] NISAR S, ENDO T, MATSUNO F. Design and kinematic optimization of a two degrees-of-freedom planar remote center of motion mechanism for minimally invasive surgery manipulators [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2017, 9(3): 123-136.
 - [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] XIAO B, YIN S, KAYNAK O. Tracking control of robotic manipulators with uncertain kinematics and dynamics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 639-649.
 - [17] 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 (EMC SI), Reno, NV, USA, 2020: 671-675.
 - [18] CHEN Y. The workspace mapping with deficient-DOF space for the PUMA 560 robot and its exoskeleton arm by using orthogonal experiment design method [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2006, 23(4): 478-487.
 - [19] HATZFELD C, CAO S, KUPNIK M, et al. Vibrotactile force perception-absolute and differential thresholds and external influences [J]. IEEE Transactions on Haptics, 2016, 9(4): 586-597.
 - [20] 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.
 - [21] 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.

作者简介



刘晓瑞(通信作者),于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。现为青岛大学助理教授,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. degrees in the 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 Automation School of Qingdao University. His main research interests include robotics, EMC measurement technology and human-machine interaction.