

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于接触状态识别的机器人操作充电枪寻孔策略

徐建明, 胡松达, 董建伟, 俞立

引用本文:

徐建明,胡松达,董建伟,俞立. 基于接触状态识别的机器人操作充电枪寻孔策略[J]. *控制与决策*, 2022, 37(7): 1794–1802.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1826>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于接触状态感知发育的机器人柔性装配方法

Flexible assembly method based on contact state perception development

控制与决策. 2021, 36(4): 876–884 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1079>

### 基于16方向24邻域改进蚁群算法的移动机器人路径规划

Mobile robots path planning based on 16–directions 24–neighborhoods improved ant colony algorithm

控制与决策. 2021, 36(5): 1137–1146 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0600>

### 凸优化与A\*算法结合的路径避障算法

Convex optimization and A–star algorithm combined path planning and obstacle avoidance algorithm

控制与决策. 2020, 35(12): 2907–2914 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0351>

### 基于 $\text{pm}3\sigma$ 正态概率区间分族遗传蚁群算法的移动机器人路径规划

Path planning of mobile robot based on  $\text{pm}3\sigma$  normal probability interval population division using genetic ant–colony algorithm

控制与决策. 2021, 36(12): 2861–2870 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0745>

### 基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制

Coordinated impedance control for dual–arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller

控制与决策. 2021, 36(6): 1311–1323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>

# 基于接触状态识别的机器人操作充电枪寻孔策略

徐建明, 胡松达, 董建伟, 俞立<sup>†</sup>

(浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

**摘要:** 针对机器人操作充电枪寻孔过程, 研究一种基于接触状态识别的寻孔策略. 基于以接触力为基本特征点的支持向量机(SVM)的线性分割算法, 提出一种寻孔接触状态识别方法. 针对端面接触状态、两点接触状态和三点接触状态, 分别给出充电枪插头坐标系下的向心力方向、侧向力方向和扭矩方向的寻孔速度轨迹规划方法, 并提出一种跟踪  $Z$  方向寻孔装配力与  $XY$  平面寻孔速度轨迹的力位混合控制方法. 最后基于 6 自由度协作机器人、充电枪插头及插座的实验平台, 通过寻孔操作实验验证所提出方法的正确性和有效性.

**关键词:** 接触状态识别; 寻孔策略; 机器人; 充电枪; 支持向量机; 轨迹规划

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1826

**引用格式:** 徐建明, 胡松达, 董建伟, 等. 基于接触状态识别的机器人操作充电枪寻孔策略[J]. 控制与决策, 2022, 37(7): 1794-1802.

## Hole-finding strategy for charging gun operated by robot based on contact state recognition

XU Jian-ming, HU Song-da, DONG Jian-wei, YU Li<sup>†</sup>

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Based on the recognition of the contact state, a hole-finding strategy is studied for the operation of the electric vehicle charging gun (EVCG). A method for identifying the contact state in the EVCG hole-finding process is proposed based on the linear segmentation algorithm of the support vector machine (SVM) with contact force as the basic feature. For the end-face contact state, two-point contact state, and three-point contact state, the hole-finding velocity trajectory planning methods of the centripetal force direction, the lateral force direction and the torque direction are respectively given under the coordinate system of the charging gun plug. Furthermore, a hybrid force/position control method is proposed for tracking the  $Z$ -direction hole-finding assembly force and the  $XY$  plane hole-finding velocity trajectory. Finally, based on the constructed 6-DOF collaborative robot and EVCG and its holder as the experimental platform, the accuracy and effectiveness of the proposed strategy are verified through experiments.

**Keywords:** contact state recognition; hole-finding strategy; robot; charging gun; support vector machine; trajectory planning

## 0 引言

随着新能源汽车的不断普及, 电动汽车在生活中越来越常见, 随之而来的就是电动汽车充电问题. 当今电动汽车的充电主要由人工完成, 因为人工可以通过利用感觉(如视觉、触觉和动觉)适应充电枪位置或姿态的变化. 随着工业机器人技术的发展, 高效率和低成本的工业机器人代替人完成充电枪的装配操作是发展趋势.

搭载传感器的机器人完成充电枪的装配是一个

挑战. 首先充电枪装配问题不同于常见的圆形轴孔装配, 是一个类圆形轴孔装配; 其次充电枪与充电枪座的配合公差仅为 0.25 mm. 由于初始定位的误差可能会超过配合公差, 容易导致装配失败, 针对充电枪的装配需要设计寻孔策略.

目前, 寻孔策略分为被动的寻孔策略和主动的寻孔策略两大类. 被动的寻孔策略包括盲搜索和使用被动柔顺机器人装配装置, 其中盲搜索是解决装配问题的常用方法, 其针对圆形零件装配问题有效, 但缺

收稿日期: 2020-12-29; 录用日期: 2021-03-29.

基金项目: 国家自然科学基金-浙江省自然科学基金联合基金两化融合项目(U1709213); 国家自然科学基金面上项目(61374103).

责任编辑: 誉斌.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: lyu@zjut.edu.cn.

点是在实际工业应用中较为耗时. 采用被动柔顺机器人装配装置的方法主要针对特定应用场景, 通过一些具有柔顺特性的机械结构, 实现装配过程中主配件对接触环境的顺从性. 主动的寻孔策略通过视觉和力/扭矩等传感器模拟人类感官来完成寻孔, 包括主动柔顺控制、基于智能控制的寻孔策略以及两者相结合的寻孔策略.

近些年的装配问题研究中, 被动的寻孔策略仍是解决装配问题的常用方法. 吴炳龙等<sup>[1]</sup>采用力/位混合控制和螺旋搜孔策略解决了高精装配中的轴孔装配问题. Park等<sup>[2]</sup>提出了令方形轴按螺旋轨迹运动进行寻孔的策略. Lou等<sup>[3]</sup>提出了一种4自由度的电缆驱动自动充电机器人(CDACR), 其末端执行器是一种柔性插头, 能承受较小的弹性形变, 再通过控制移动平台的运动实现插拔策略. 使用被动柔顺机器人装配装置虽然具有低成本、响应快等优点, 但是存在适用性低、精度不高等缺陷.

对于主动的寻孔策略的研究, Abdullah等<sup>[4]</sup>提出了使用力/扭矩传感器和视觉系统的自动轴孔装配方法, 根据力/扭矩传感器的数据创建模型估计孔中心在寻孔过程中的位置, 所建立模型估计的接触角的准确度为86%. Song等<sup>[5]</sup>提出了通过观察人类运动模式确定装配的方向和力阈值的轴孔装配策略, 有效地补偿了视觉定位系统存在的位置/方向识别误差, 但装配操作时间较长. 基于智能控制的寻孔策略主要通过不同的机器学习算法(如神经网络(NNs)、模糊逻辑、隐马尔可夫模型(HMMs))学习接触状态<sup>[6-10]</sup>. 以往识别接触状态是从零件配合过程的分析模型出发, 利用统计方法确定实际情况与模型情况的相似性, 根据相似度确定当前的接触状态<sup>[11-16]</sup>. 除了用于识别接触状态, Pan等<sup>[17]</sup>采用基于卷积神经网络(CNN)的方法识别充电端口, 通过调节光强度提高识别成功率. Xu等<sup>[18]</sup>将装配任务表述成马尔可夫决策过程, 提出了MDDPG(model-driven deep deterministic policy gradient)算法, 无需分析接触状态, 基于力控制模型进行学习, 通过反馈探索策略避免了学习过程中的安全隐患问题. 然而, 上述基于智能控制的寻孔策略都是在大量实验数据的基础上对接触状态进行学习.

近年来, 支持向量机(SVM)<sup>[19]</sup>及其变种<sup>[20-22]</sup>已广泛应用于分类问题, 它具有良好的泛化特性, 并且与上述方法相比效率较高. 综合以上考虑, 有必要研究一种以接触力为基本特征点的SVM线性分割算法

的寻孔接触状态识别方法, 并在此基础上研究一种基于接触状态分类与静力分析的机器人操作充电枪寻孔策略.

本文从充电枪充电操作应用场景出发, 通过模拟操作人员的充电操作过程, 利用接触力为基本特征点的SVM线性分割算法, 结合侧向力和装配力的判断条件, 实现寻孔接触状态的识别. 基于接触状态分类与静力分析, 结合导纳方程得到的期望速度, 针对3种接触状态提出端面接触状态下的向心方向轨迹规划、两点接触状态下的侧向力方向轨迹规划、三点接触状态下的扭矩方向轨迹规划, 实现机器人操作充电枪寻孔策略. 在构建的6自由度的协作机器人和充电枪及充电枪座的实验平台上验证所提出算法的有效性.

## 1 问题描述

机器人充电操作系统如图1所示, 主要包括双目视觉系统、机器人、六维力传感器、充电枪、充电枪座. 同时在系统中建立机器人基坐标系 $\{B\}$ 、六维力传感器坐标系 $\{S\}$ 、充电枪插头坐标系 $\{T\}$ 和充电枪座坐标系 $\{G\}$ .

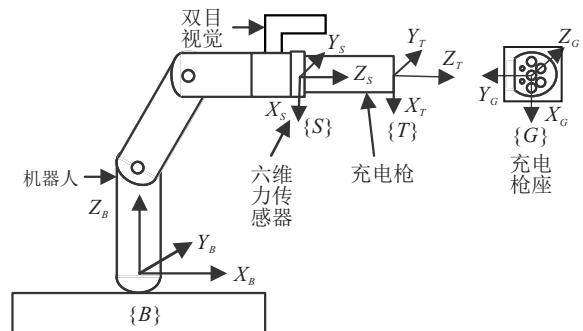


图1 机器人充电操作系统

类似于操作员携带充电枪的充电操作, 机器人使用双目视觉定位充电枪座的位置, 即定位. 从定位到寻孔的过程中, 在机器人末端施加的装配力作用下充电枪会移向充电枪座所在的表面, 直到接触. 大多数情况下, 仅靠视觉系统无法精确对准充电枪座中心, 机器人还需要靠六维力传感器识别不同的接触状态, 据此确定偏差方向进行寻孔, 当机器人受到阻力突然减小时, 意味着充电枪插头寻到了充电枪座孔, 接下来进行插孔操作.

图2所示在装配力作用下充电枪寻孔过程的4种接触状态. 如图2(a)所示, 充电枪与充电枪座之间为端面接触状态, 当充电枪头部中心位于充电枪座表面之外时, 通常会出现这种情况. 如图2(b)所示, 如果

充电枪的中心靠近充电枪座,则充电枪会因为倾斜而与充电枪座发生两点接触,这种接触状态下接触点处的滑动是允许的,因此充电枪可以沿着充电枪座的边缘移动,以保持两点接触. 三点接触如图2(c)所示,当充电枪与充电枪座之间配合公差较大且充电枪插头初始定位姿态误差较大时,便会发生三点接触. 如果初始定位姿态误差较小并且配合公差较小,则充电枪会插入孔中,发生如图2(d)所示的侧面接触.

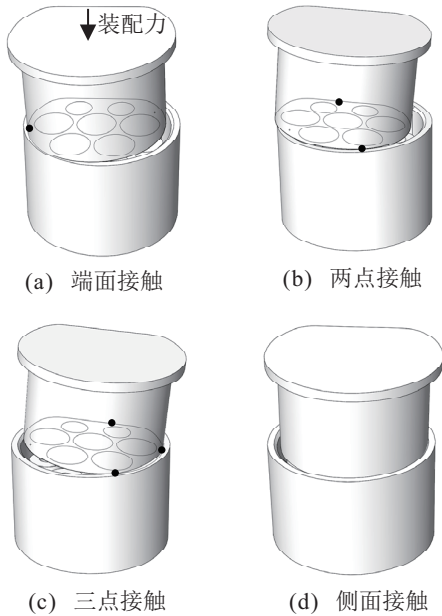


图2 装配力作用下的充电枪寻孔接触状态

图3为基于接触状态识别的寻孔策略结构. 基于接触力为基本特征点的SVM线性分割算法,提出一种寻孔接触状态识别方法. 通过线性分割线正确识别端面接触状态与其他接触状态. 最后基于接触状态分类与静力分析,结合导纳方程得到的期望速度,针对3种接触状态提出3种寻孔策略:

- 1) 端面接触状态下的向心方向轨迹规划;
- 2) 两点接触状态下的侧向力方向轨迹规划;
- 3) 三点接触状态下的扭矩方向轨迹规划.

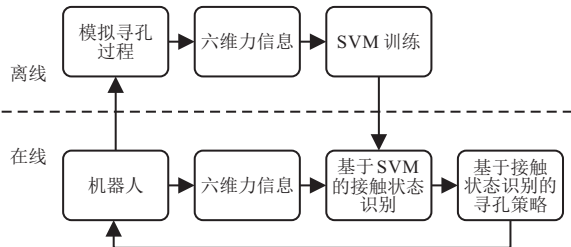


图3 基于接触状态识别的寻孔策略结构

## 2 控制方式

充电枪寻孔阶段采用力位混合控制,控制框图如图4所示. 力位混合控制由Z方向的力(装配力)跟踪导纳控制和XY平面上寻孔速度控制两部分组成,进

而合成机器人操作充电枪插头的期望速度.

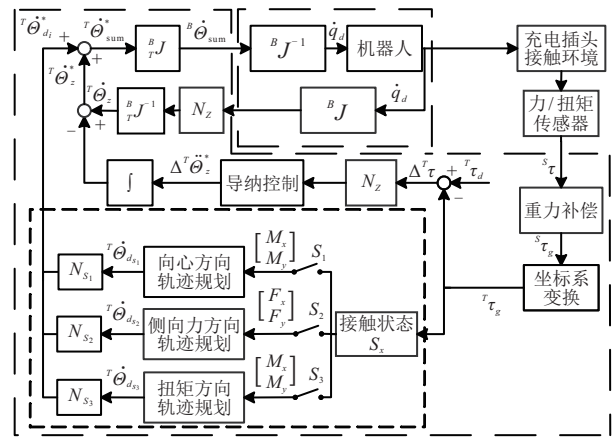


图4 系统控制框图

针对不同接触状态对XY平面上寻孔期望线速度方向和角速度方向进行规划,基于导纳方程和期望阻抗参数确定期望速度大小. 为了描述力位混合控制与寻孔期望线速度和角速度的规划,首先对相应变量以及坐标系进行定义.

如图5所示,定义 $\theta$ 描述 $\{T\}$ 坐标系相对于 $\{G\}$ 坐标系的位置与姿态. 其中: $x, y, z$ 为 $\{T\}$ 坐标系原点相对于 $\{G\}$ 坐标系的位置, $\phi, \varphi, \psi$ 为 $\{T\}$ 坐标系依次绕 $x_G, y_G, z_G$ 轴的旋转角度, $\tau$ 为 $\{S\}$ 坐标系下的六维力/扭矩矢量, $F_x, F_y, F_z$ 为 $x_S, y_S, z_S$ 方向的力, $M_x, M_y, M_z$ 为绕 $x_S, y_S, z_S$ 轴的扭矩,且有

$$\theta = [x, y, z, \phi, \varphi, \psi]^T, \tag{1}$$

$$\tau = [F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T. \tag{2}$$

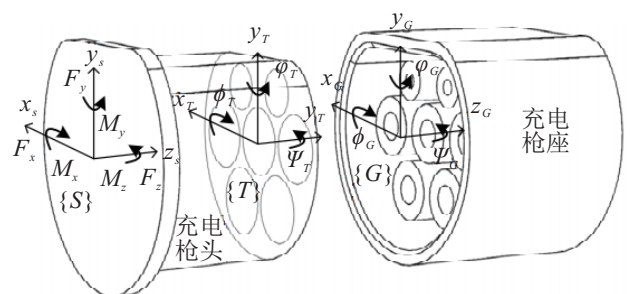


图5  $\{S\}$ 坐标系、 $\{T\}$ 坐标系与 $\{G\}$ 坐标系

力位混合控制中的力控制体现于在寻孔过程中所需要的恒定装配力,这是为了在寻孔过程中使充电枪插头与枪座能够始终保持良好的接触,尤其是接触状态的转换瞬间,因此需要在 $\{T\}$ 坐标系下Z方向进行力跟踪导纳控制. 六维力传感器采集到 $\{S\}$ 坐标系下的接触力 ${}^S\tau$ ,先通过重力补偿和滤波得到 ${}^S\tau_g$ ,再通过坐标系变化得到 $\{T\}$ 坐标系的接触力 ${}^T\tau_g$ . 因为在Z方向上进行力闭环控制,定义 $N_z$ 为Z方向上选择矩阵,有

$$N_Z = \text{diag}[0, 0, 1, 0, 0, 0]. \quad (3)$$

设定期望力为 ${}^T\tau_d$ , 力偏差为 $N_Z \cdot \Delta^T\tau$ . 通过导纳控制将 $Z$ 方向的力偏差转换成笛卡尔空间的速度修正分量 $\int \Delta^T \ddot{\theta}_Z^* dt$ , 与机器人反馈速度 ${}^T\dot{\theta}_Z$ 相加后得到 $Z$ 方向的期望速度分量 ${}^T\dot{\theta}_Z^*$ , 在没有寻孔期望线速度和角速度 ${}^T\dot{\theta}_{d_i}$ 时, 实现了在 $Z$ 方向上的力控制, 得到恒定的装配力.

对于寻孔期望线速度和角速度的规划, 需要根据不同接触状态下的静力分析采取不同的规划方式. 寻孔时接触状态分为3种: 端面接触状态 $S_1$ 、两点接触状态 $S_2$ 和三点接触状态 $S_3$ . 针对不同的接触状态规划寻孔期望速度轨迹, 端面接触状态 $S_1$ 通过估计接触点 $A$ 得到速度方向 $\alpha$ ; 两点接触状态 $S_2$ 通过静力分析得到速度方向 $\beta$ ; 三点接触状态 $S_3$ 通过静力分析得到旋转轴方向 $\gamma$ , 并结合侧向力 $F$ 或者合成扭矩 $M$ , 通过导纳方程得到期望速度 ${}^T\dot{\theta}_{d_i}$ . 由于期望速度 ${}^T\dot{\theta}_{d_i}$ 只有两个维度( $XY$ 平面或者旋转方向), 分别对应接触状态 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ , 通过变换矩阵 $N_{S_1}$ 、 $N_{S_2}$ 、 $N_{S_3}$ , 将 ${}^T\dot{\theta}_{d_i}$ 转换成六维向量形式, 即

$${}^T\dot{\theta}_{d_i}^* = N_i \cdot {}^T\dot{\theta}_{d_i}, \quad i = S_1, S_2, S_3. \quad (4)$$

最后将期望速度 ${}^T\dot{\theta}_{d_i}^*$ 与 $Z$ 方向上的期望速度 ${}^T\dot{\theta}_Z^*$ 相加得到总的期望速度 ${}^T\dot{\theta}_{\text{sum}}^*$ , 通过 ${}^B_T J$ 将 $\{T\}$ 坐标系的速度转变成 $\{B\}$ 坐标系的速度并发送给机器人, 实现基于接触状态识别的寻孔策略.

### 3 寻孔接触状态分析

为了识别寻孔接触状态, 需要选取具有代表性和区别性的特征值突出不同接触状态的静力特点. 而端面接触与两点接触和三点接触最大的区别在于在装配力的作用下侧向力不同. 在视觉定位姿态误差较小的情况下, 端面接触下的侧向力接近零, 而两点和三点接触下的侧向力不为零, 因此在采集到的六维力信息中选取装配力和侧向力作为特征值.

通过寻孔过程模拟实验, 采集不同接触状态下的六维力/扭矩传感器信息, 进而利用采集的接触力分析寻孔接触状态. 定义两个特征值 $x_1$ 和 $x_2$ 以区分接触状态, 如下所示:

$$x_1 = F_z, \quad (5)$$

$$x_2 = F/F_z. \quad (6)$$

以特征值 $x_1$ 为横坐标、特征值 $x_2$ 为纵坐标描述坐标系中的点, 图6为两种特征值下的接触状态分布.

将端面接触状态下的特征值用十字符号与其他接触状态(叉号)进行区分, 可大致分为两大部分: 上

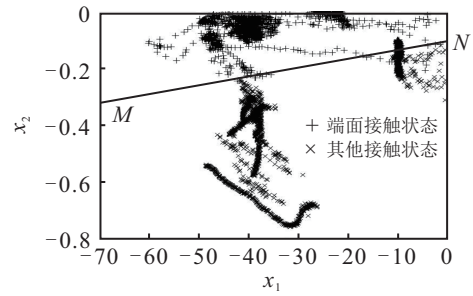


图6 两种特征值下的接触状态分布

半部分端面接触状态和下半部分其他接触状态. 若能求出线性分割线 $MN$ 的表达式, 则可根据这两种特征值将端面接触状态识别出来. 这里使用SVM方法求解线性分割线 $MN$ 的表达式.

### 4 基于接触状态识别的寻孔策略

图7为基于接触状态识别的寻孔策略流程. 通过线性分割线正确识别端面接触状态 $S_1$ . 对于区分两点接触 $S_2$ 与三点接触 $S_3$ , 还需在装配力不变的情况下进行观察, 若侧向力 $F$ 突然减小至0则为三点接触状态. 这是由于在两点接触状态下充电枪插头滑向充电枪座中心时侧向力 $F$ 会保持在一定的大小范围内. 最后结合对应接触状态的静力分析, 规划机器人操作充电枪插头的轨迹.

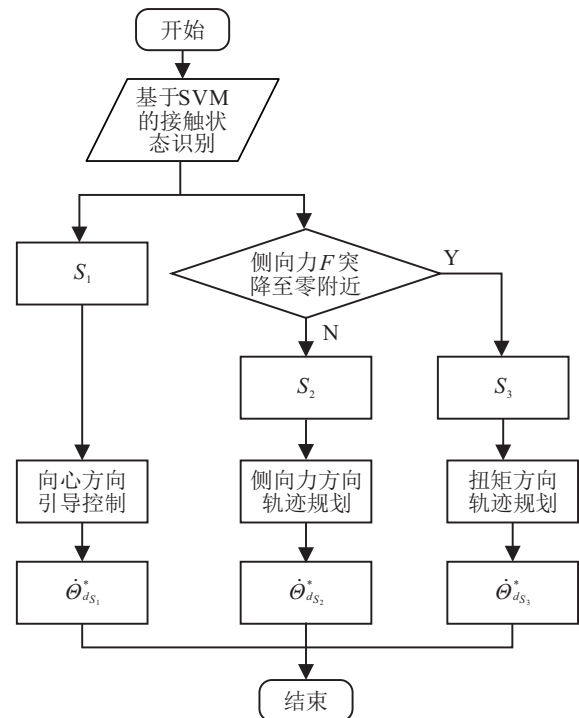


图7 基于接触状态识别的寻孔策略流程

#### 4.1 端面接触状态的向心方向轨迹规划

对于端面接触状态, 需要估计接触点的位置以规划轨迹使枪头朝充电枪座中心移动.

图8为端面接触状态的静力情况. 在 $\{G\}$ 坐标系

下,定义接触点  $A$  坐标为  $(x_a, y_a)$ . 由接触力分析得到

$$F_z = F_1 \cdot \cos \sigma \approx F; \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_a = M_y/F_z, \\ y_a = M_x/F_z; \end{cases} \quad (8)$$

$$\alpha = \arctan M_x/M_y. \quad (9)$$

其中:  $F_1$  为装配力的反作用力,  $\sigma$  为倾斜角度,  $\alpha$  为向量  $O_G A$  与  $x_G$  轴的夹角.

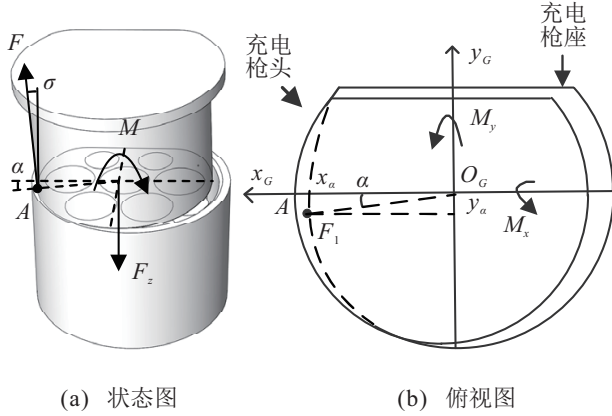


图8 端面接触静力分析

由于双目视觉系统初始定位下的姿态误差较小,  $\cos \sigma$  近似为 1, 结合  $\alpha$  可得到端面接触状态下的速度变换矩阵为

$$N_{S_1} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (10)$$

端面接触状态下需要在  $XY$  平面内进行轨迹规划,  $\{G\}$  坐标系下  $S_1$  状态中相关期望位姿  $\Theta_{d_{S_1}}$  和当前位姿  $\Theta_{S_1}$  分别为

$$\Theta_{d_{S_1}} = [x_d, y_d]^T, \quad (11)$$

$$\Theta_{S_1} = [x, y]^T. \quad (12)$$

期望速度需要跟随受力变化, 由导纳方程将输入接触力转换成期望速度. 建立如下导纳方程:

$$M_f = K_{p_{x1}}(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + K_{d_{x1}}(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_{e_{x1}}(x_d - x), \quad (13)$$

$$M_f = K_{p_{y1}}(\ddot{y}_d - \ddot{y}) + K_{d_{y1}}(\dot{y}_d - \dot{y}) + K_{e_{y1}}(y_d - y). \quad (14)$$

其中:  $M_f = M_d - M$  为合成扭矩偏差,  $K_{p_{x1}}$ 、 $K_{p_{y1}}$ 、 $K_{d_{x1}}$ 、 $K_{d_{y1}}$ 、 $K_{e_{x1}}$ 、 $K_{e_{y1}}$  分别为  $S_1$  状态下  $x$  轴和  $y$  轴方向上的期望惯性参数、期望阻尼参数和期望刚度参数.

要得到速度大小需要求解三阶微分方程, 由于控制系统为离散系统, 采用积分迭代法求解速度. 已知初始条件为

$$x_d(0) = y_d(0) = 0, \quad (15)$$

$$\dot{x}_d(0) = \dot{y}_d(0) = 0. \quad (16)$$

利用步长  $\Delta t$  (计算周期) 对式 (13)、(14) 进行欧拉积分, 从  $t = 0$  开始进行迭代计算, 有

$$\dot{x}_d(t + \Delta t) = \dot{x}_d(t) + \ddot{x}_d(t)\Delta t, \quad (17)$$

$$\dot{y}_d(t + \Delta t) = \dot{y}_d(t) + \ddot{y}_d(t)\Delta t. \quad (18)$$

对于每次迭代, 由式 (13) 和 (14) 计算一次  $\dot{x}_d$ 、 $\dot{y}_d$ . 由于期望合成扭矩  $M_d$  为零, 合成扭矩偏差  $M_f$  即为  $-M$ , 利用数值积分方法可求出期望速度  $\dot{x}_d$ 、 $\dot{y}_d$ , 即  $\dot{\Theta}_{d_{S_1}}$ .

结合式 (3) 得到在端面接触状态下期望速度  $\dot{\Theta}_{d_{S_1}}$ , 使充电枪沿接触点的反方向进行寻孔.

#### 4.2 两点接触状态的侧向力方向轨迹规划

图9为两点接触状态静力分析. 由于充电枪需要保持一个恒定的装配力, 充电枪座分别在接触点  $A$  和接触点  $B$  对充电枪产生一个反作用力  $F_a$  和  $F_b$ , 其合力方向即为指向装配方向的侧向力  $F$ , 其方向角为  $\beta$ ,  $F_x$  和  $F_y$  则是侧向力在  $\{T\}$  坐标系上的受力分解, 有

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}, \quad (19)$$

$$\beta = \arctan F_y/F_x. \quad (20)$$

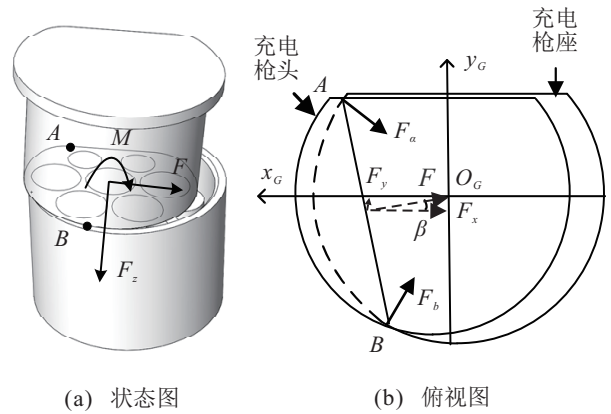


图9 两点接触状态静力分析

结合方向角  $\beta$  得到两点接触状态下的速度变换矩阵  $N_{S_2}$ , 有

$$N_{S_2} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \beta & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (21)$$

建立如下导纳方程:

$$F_f = K_{p_{x2}}(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + K_{d_{x2}}(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_{e_{x2}}(x_d - x), \quad (22)$$

$$F_f = K_{p_{y2}}(\ddot{y}_d - \ddot{y}) + K_{d_{y2}}(\dot{y}_d - \dot{y}) + K_{e_{y2}}(y_d - y). \quad (23)$$

其中:  $F_f = F_d - F$  为侧向力偏差,  $K_{p_{x2}}, K_{p_{y2}}, K_{d_{x2}}, K_{d_{y2}}, K_{e_{x2}}, K_{e_{y2}}$  分别为  $S_2$  状态下  $x$  轴和  $y$  轴方向上的期望惯性参数、期望阻尼参数和期望刚度参数。

同样采用积分迭代法求解期望速度, 由于期望侧向力  $F_d$  为零, 侧向力偏差的大小为  $-F$ , 最后得到两点接触状态下的期望速度  $\dot{\theta}_{d_{S_2}}$ 。

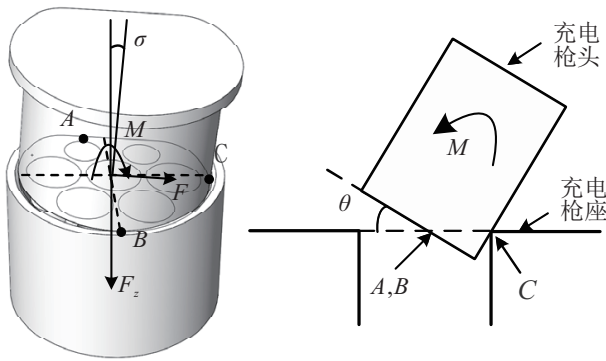
结合式 (3) 得到在两点接触状态下期望速度  $\dot{\theta}_{d_{S_2}}^*$ , 使充电枪沿侧向力  $F$  的方向进行寻孔。

### 4.3 三点接触状态的扭矩方向轨迹规划

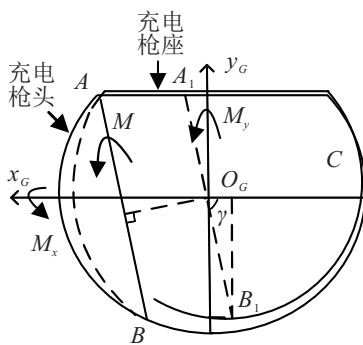
图 10 为三点接触状态静力分析。由静力分析可得, 扭矩分量  $M_x$  和  $M_y$  合成的等效轴为  $A_1B_1$ ,  $A_1B_1$  与连接接触点  $A$  和  $B$  的直线平行, 等效轴  $A_1B_1$  与  $\{G\}$  坐标系  $x_G$  轴的夹角为  $\gamma$ , 可通过扭矩分量  $M_x$  和  $M_y$  求得, 即

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}, \quad (24)$$

$$\gamma = \arctan M_y/M_x. \quad (25)$$



(a) 状态图 (b) 侧视图



(c) 俯视图

图 10 三点接触状态静力分析

结合  $\gamma$  可得到三点接触状态下的速度变换矩阵为

$$N_{S_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin \gamma & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (26)$$

建立如下导纳方程:

$$M_f = K_{p_{\phi 3}}(\ddot{\phi}_d - \ddot{\phi}) + K_{d_{\phi 3}}(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) +$$

$$K_{e_{\phi 3}}(\phi_d - \phi), \quad (27)$$

$$M_f = K_{p_{\varphi 3}}(\ddot{\varphi}_d - \ddot{\varphi}) + K_{d_{\varphi 3}}(\dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}) + K_{e_{\varphi 3}}(\varphi_d - \varphi). \quad (28)$$

其中:  $K_{p_{\phi 3}}, K_{p_{\varphi 3}}, K_{d_{\phi 3}}, K_{d_{\varphi 3}}, K_{e_{\phi 3}}, K_{e_{\varphi 3}}$  分别为  $S_3$  状态下绕  $x$  轴和  $y$  轴方向上的期望惯性参数、期望阻尼参数和期望刚度参数。

同样采用积分迭代法求解三点接触状态下的期望速度  $\dot{\theta}_{d_{S_3}}$ , 结合式 (3) 得到在三点接触状态下的期望速度  $\dot{\theta}_{d_{S_3}}^*$ , 使充电枪绕着等效轴  $A_1B_1$  的方向进行转动, 倾斜角  $\sigma$  将逐渐减小直至充电枪插头滑入充电枪座中。

注 1 为了获得稳定的期望速度, 使其振荡较小, 要使导纳方程处于临界阻尼或过阻尼, 即必须有

$$K_{d_i} \geq 2\sqrt{K_{p_i}K_{e_i}}, \quad i = x_1, y_1, x_2, y_2, \phi_3, \varphi_3. \quad (29)$$

式中参数的确定需要根据充电枪插头寻孔时的运动情况进行选取,  $K_{p_i}, K_{d_i}$  和  $K_{e_i}$  这 3 个参数涵盖了机器人固有部分和主动运动控制时的影响成分, 其中  $K_{p_i}$  需匹配系统的固有属性。在寻孔过程接触调整时, 调节参数  $K_{d_i}$  会影响调整速度, 再结合式 (29) 可基本确定 3 个参数的数值。结合上述分析, 3 个参数通过经验选取不同值进行测试, 并多次实验选取最优值。

## 5 实验验证

如图 11 所示, 机器人充电操作实验平台由大族六轴协作机器人 Elfin10、ATI 六维力传感器和 HT-GE500C 工业摄像头组成。

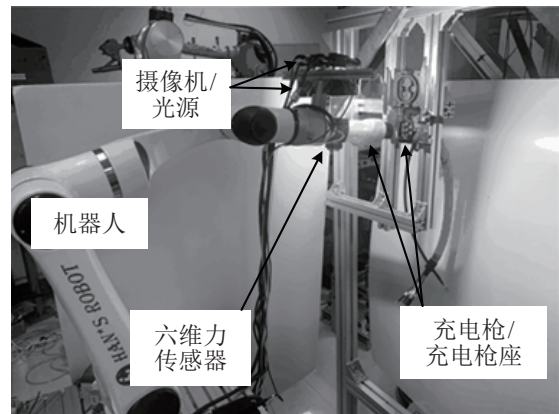


图 11 机器人充电操作实验平台

### 5.1 基于 SVM 的接触状态分类

由于选取的两种特征值均与装配力大小有关, 在寻孔接触状态模拟实验中分别进行对应装配力大小为 10 N 和 40 N 的实验。实验数据对应 10 N 为 8 523 组, 对应 40 N 为 9 366 组。

对数据进行训练, 惩罚因子  $C$  取 300, 分类结果如图 12 所示。线性分割线  $MN$  如下所示:

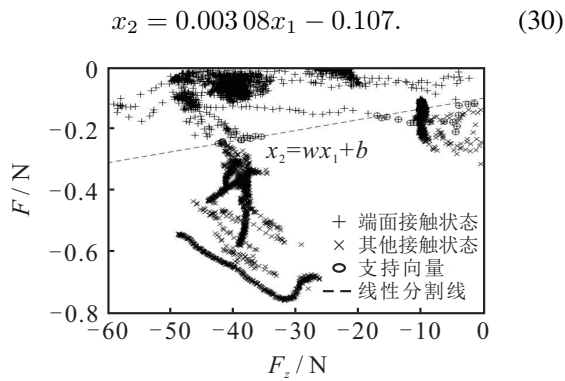


图12 基于SVM分类的接触状态分类

支持向量在总训练集中的比例为2.82%，分类错误占总训练集的比例为0.244%。由线性分割线AB可将端面接触状态与其他接触状态区分开来。

### 5.2 寻孔实验

在寻孔实验中，装配力大小为10N，不考虑姿态误差的情况下，模拟视觉定位位置的误差分布如图13所示。以{G}坐标系原点OG为中心，位置误差OGP的xG轴分量OGPx和yG轴分量OGPy以1mm为单位长度、5mm为半径的圆内进行73组实验，所有实验寻孔均成功，寻孔时间平均为3.2s。

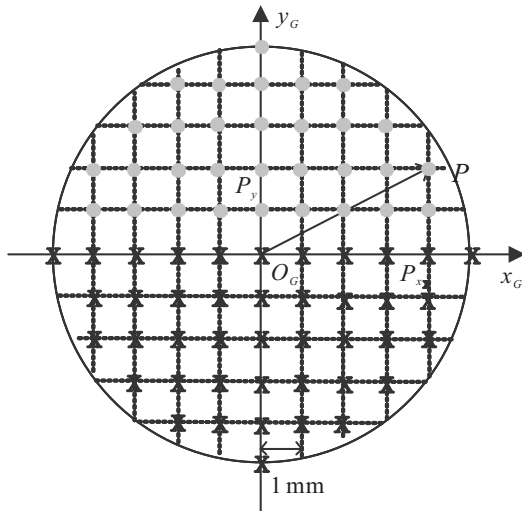


图13 视觉定位位置误差分布

在考虑姿态误差下，设定φ、φ、ψ三个角度的误差值，重复图13的模拟视觉定位位置误差实验，实验结果如表1所示。

表1 视觉定位位姿误差下的寻孔实验

$\phi / (^\circ)$	$\varphi / (^\circ)$	$\psi / (^\circ)$	实验次数	成功率 / %	平均寻孔时间 / s
3	3	3	73	100	4.5
2	2	2	73	100	4.1
1	1	1	73	100	3.3
-1	-1	-1	73	100	3.4
-2	-2	-2	73	100	3.9
-3	-3	-3	73	100	4.3

表1的438次实验寻孔均成功，寻孔时间平均为3.92s，表明较小的姿态误差会略微影响整体寻孔效率。

表2为寻孔实验下3种接触状态下的期望惯性参数、期望阻尼参数和期望刚度参数。

表2 3种接触状态下的期望导纳参数

$i$	$K_{p_i} / (\text{N} \cdot \text{s}^2 / \text{m})$	$K_{d_i} / (\text{N} \cdot \text{s} / \text{m} (\text{N} \cdot \text{s} / \text{rad}))$	$K_{e_i} / (\text{N} / \text{m} (\text{N} / \text{rad}))$
1	0.2	25	300
2	0.2	25	300
3	0.2	1	5

以1组实验为例，φ、φ、ψ三个角度误差均为2°，位置误差的分量OGPx、OGPy分别为3mm和1mm。如图14所示，以时间t、特征值x1和x2为坐标轴，显示了分类边界在寻孔过程中可以区分两种接触状态。由于特征值x1表示Fz，通过判断x1是否达到期望装配力来判断是否开始接触状态识别结果，从0时刻A处充电枪开始接触充电枪座，在接触过程中通过特征值x1和x2所描述的点识别接触状态；b段特征值描述的点位于分类边界平面的上方部分，为端面接触状态；从B处开始的c段特征值描述的点位于分类边界平面的下方部分，为两点接触状态；C处特征值x1回到0，判定寻孔成功。

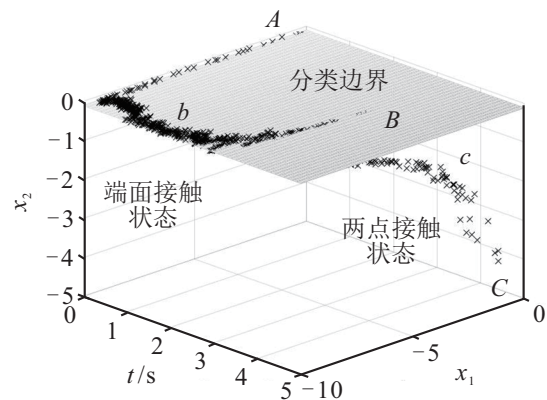


图14 在线接触状态识别结果

图15为充电枪末端轨迹跟踪曲线，其中轨迹a为未接触状态，轨迹b为端面接触状态，轨迹c为两点接触状态，轨迹d为侧面接触状态。基于接触状态识别的寻孔策略从轨迹a的末端开始直到轨迹c的末端结束，完成寻孔操作。

图16为对应充电枪寻孔实验，各分图分别对应了寻孔时各阶段充电枪与充电枪座的状态。

造成三点接触的主要原因有充电枪与充电枪座之间配合公差较大以及充电枪座初始定位姿态误差较大。结合本策略已经通过双目视觉系统初始定位

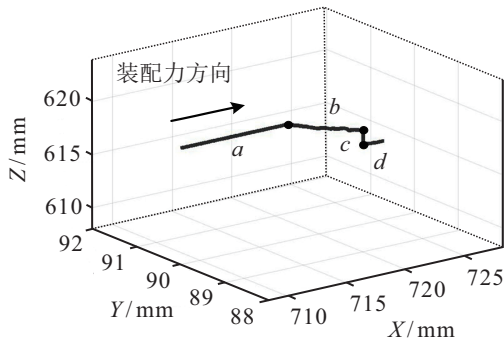
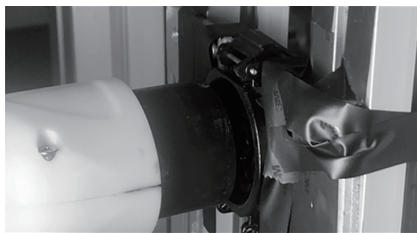
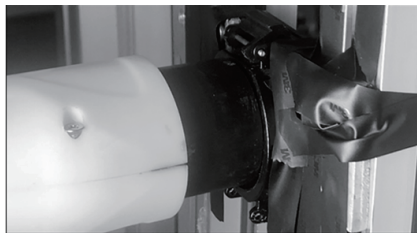


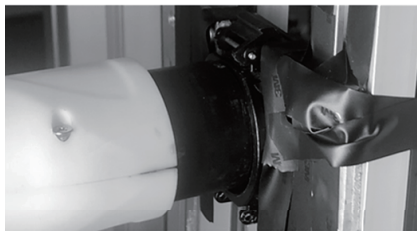
图 15 充电枪末端轨迹跟踪曲线



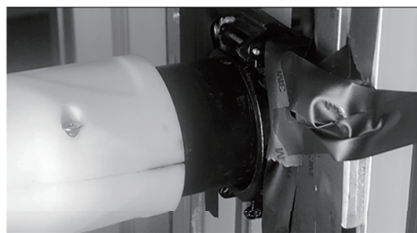
(a) 未接触状态



(b) 端面接触状态



(c) 两点接触状态



(d) 侧面接触状态

图 16 充电枪寻孔实验图

将姿态误差控制在较小的范围内,且实际充电枪装配配合公差仅为0.25 mm,在寻孔实验过程中没有出现三点接触情况.

## 6 结论

本文通过模拟人类操作员的充电操作过程,针对机器人操作充电枪的寻孔提出了一种基于接触状态

识别的寻孔策略. 基于接触力为基本特征点的SVM线性分割算法,提出了一种寻孔接触状态识别方法,在此基础上,基于接触状态分类与静力分析,结合导纳方程得到的期望速度,针对3种接触状态,提出了端面接触状态下的向心方向轨迹规划、两点接触状态下的侧向力方向轨迹规划、三点接触状态下的扭矩方向轨迹规划. 通过实验,在模拟视觉定位姿态误差情况下实现了机器人操作充电枪寻孔策略.

所提出方法相对于现有的基于智能控制的寻孔策略更易实现,通过结合接触状态的静力分析与寻孔过程模拟实验,选取具有代表性和区别性的特征值将六维力信息转换成接触状态信息,再根据具体接触状态进行轨迹规划,整个寻孔过程模拟了操作员携带充电枪的寻孔过程,为机器人操作充电枪寻孔方法提供了一个思路.

## 参考文献(References)

- [1] 吴炳龙, 曲道奎, 徐方. 基于力/位混合控制的工业机器人精密轴孔装配[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2018, 52(2): 379-386.  
(Wu B L, Qu D K, Xu F. Industrial robot high precision peg-in-hole assembly based on hybrid force/position control[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2018, 52(2): 379-386.)
- [2] Park H, Park J, Lee D H, et al. Compliance-based robotic peg-in-hole assembly strategy without force feedback[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8): 6299-6309.
- [3] Lou Y N, Di S C. Design of a cable-driven auto-charging robot for electric vehicles[J]. IEEE Access, 2020, 8: 15640-15655.
- [4] Abdullah M W, Roth H, Weyrich M, et al. An approach for peg-in-hole assembling using intuitive search algorithm based on human behavior and carried by sensors guided industrial robot[J]. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48(3): 1476-1481.
- [5] Song H C, Kim Y L, Song J B. Guidance algorithm for complex-shape peg-in-hole strategy based on geometrical information and force control[J]. Advanced Robotics, 2016, 30(8): 552-563.
- [6] Skubic M, Volz R A. Identifying single-ended contact formations from force sensor patterns[C]. International Conference on Robotics and Automation. Houston, 2000: 597-603.
- [7] Wang K J. Fuzzy sliding mode joint impedance control for a tendon-driven robot hand performing peg-in-hole assembly[C]. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Qingdao, 2016: 2087-2092.

- [8] Luo J L, Solowjow E, Wen C T, et al. Reinforcement learning on variable impedance controller for high-precision robotic assembly[C]. International Conference on Robotics and Automation. Montreal, 2019: 3080-3087.
- [9] Son C. A neural / fuzzy optimal process model for robotic part assembly[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(12): 1783-1794.
- [10] Debus T J, Dupont P E, Howe R D. Contact state estimation using multiple model estimation and hidden Markov models[J]. The International Journal of Robotics Research, 2004, 23(4/5): 399-413.
- [11] Mosemann H, Raue A, Wahl F. Identification of assembly process states using polyhedral convex cones[C]. Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit, 1999: 2756-2761.
- [12] Xiao J, Liu L Z. Contact states: Representation and recognizability in the presence of uncertainties[C]. Proceedings of 1998 IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Victoria, 1998: 1151-1156.
- [13] Suárez R, Basañez L, Rosell J. Assembly contact force domains in the presence of uncertainty[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1994, 27(14): 653-659.
- [14] de Schutter J, Bruyninckx H, Dutré S, et al. Estimating first-order geometric parameters and monitoring contact transitions during force-controlled compliant motion[J]. The International Journal of Robotics Research, 1999, 18(12): 1161-1184.
- [15] Lefebvre T, Bruyninckx H, de Schutter J. Polyhedral contact formation identification for autonomous compliant motion: Exact nonlinear Bayesian filtering[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(1): 124-129.
- [16] Gadeyne K, Lefebvre T, Bruyninckx H. Bayesian hybrid model-state estimation applied to simultaneous contact formation recognition and geometrical parameter estimation[J]. The International Journal of Robotics Research, 2005, 24(8): 615-630.
- [17] Pan M, Sun C, Liu J, et al. Automatic recognition and location system for electric vehicle charging port in complex environment[J]. IET Image Processing, 2020, 14(10): 2263-2272.
- [18] Xu J, Hou Z M, Wang W, et al. Feedback deep deterministic policy gradient with fuzzy reward for robotic multiple peg-in-hole assembly tasks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3): 1658-1667.
- [19] Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks[J]. Machine Learning, 1995, 20(3): 273-297.
- [20] Suykens J A K, Vandewalle J. Least squares support vector machine classifiers[J]. Neural Processing Letters, 1999, 9(3): 293-300.
- [21] Huang G B, Zhou H M, Ding X J, et al. Extreme learning machine for regression and multiclass classification[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, 2012, 42(2): 513-529.
- [22] Miche Y, Sorjamaa A, Bas P, et al. OP-ELM: Optimally pruned extreme learning machine[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2010, 21(1): 158-162.

#### 作者简介

徐建明(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电机伺服控制、机器人控制、工业物联网系统和机器人控制系统设计等研究, E-mail: xujm@zjut.edu.cn;

胡松达(1996—), 男, 硕士生, 从事工业机器人轴孔装配、动力学参数辨识等研究, E-mail: hsdzjut@163.com;

董建伟(1990—), 男, 博士生, 从事工业机器人人机交互、动力学参数辨识、轴孔装配等研究, E-mail: dongjw@zjut.edu.cn;

俞立(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 从事鲁棒控制、网络化控制、分布式估计与信息融合、工业机器人等研究, E-mail: lyu@zjut.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)