

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514089

绳驱动外肢体机器人碰撞检测及振动反馈控制研究*

齐 飞, 孙 露, 孙 杰, 葛奕玮, 刘先军
(常州大学机械与轨道交通学院 常州 213164)

摘 要:针对外肢体机器人在人体协作中存在的安全性低、可靠性差及运动相容性不足等问题,提出了一种面向外肢体机器人碰撞检测及振动反馈的控制策略,以提高人机交互的安全性与可靠性。首先,基于 D-H 法和常曲率原理建立了绳驱动外肢体机器人的运动学模型,并通过蒙特卡洛法对其工作空间进行仿真分析。而后构建了外肢体机器人的包围盒简化模型,并提出了一种基于最小距离的外肢体机器人碰撞检测方法,对外肢体双臂间的碰撞问题进行仿真验证。同时为实现对外肢体碰撞力/位置的检测和反馈,设计了一种基于压力传感器的外肢体碰撞检测装置,研究了外肢体机器人接触静力学模型并对参数进行标定,以实现对接触力/位置的检测和估计。最后提出了一种基于振动触觉反馈的外肢体机器人安全控制策略,并搭建了实验样机平台,分别通过多组实验对所建外肢体运动学模型、碰撞检测方法及安全控制策略进行验证,结果表明:绳驱动外肢体机器人在工作空间内拥有良好的运动性能,外肢体机器人碰撞检测算法能在 0.12 s 内完成接触力和碰撞位置的检测,并通过振动手套实现了接触力的感知和安全反应控制,可在 0.7 s 内实现有效的主动避障控制,验证了所提的外肢体机器人碰撞检测和振动反馈控制策略的正确性和有效性。

关键词: 外肢体机器人碰撞检测; 振动反馈; 包围盒; 安全反应机制

中图分类号: TP242 TH113 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.50

Research on collision detection and vibration feedback control strategies for cable-driven supernumerary robotic limbs

Qi Fei, Sun Lu, Sun Jie, Ge Yiwei, Liu Xianjun

(School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: To address the problems of low safety, poor reliability, and insufficient motion compatibility in human collaboration with supernumerary robotic limbs, this study proposes a collision detection and vibrotactile feedback control strategy to enhance the safety and reliability of human-robot interaction. Firstly, a kinematic model of the cable-driven SRLs is formulated based on the Denavit-Hartenberg method and the constant curvature principle. The workspace is analyzed using the Monte Carlo method. Then, a simplified bounding box model of the SRLs is constructed, and a minimum-distance-based collision detection method is proposed and verified through simulations involving potential collisions between the dual arms of the SRLs. To enable detection and feedback of contact force and position during collisions, a collision detection device based on pressure sensors is designed. The static contact model of the SRLs is studied and calibrated to realize accurate estimation of contact force and location. Finally, a safety control strategy based on vibrotactile feedback is proposed. An experimental prototype platform is developed, and multiple experiments are conducted to validate the proposed kinematic model, collision detection method, and safety control strategy. The results demonstrate that the cable-driven SRLs exhibit good motion performance within the workspace. The proposed collision detection algorithm can detect contact force and collision location within 0.12 seconds, and the vibrotactile glove enables intuitive perception of contact force and safe reactive control. Effective active obstacle avoidance can be achieved within 0.7 seconds, verifying the correctness and effectiveness of the proposed collision detection and vibrotactile feedback control strategy for supernumerary robotic limbs.

Keywords: supernumerary robotic limbs collision detection; vibration feedback; bounding box; safety response mechanism

收稿日期: 2025-05-28 Received Date: 2025-05-28

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(52305092)、江苏省“青蓝工程”项目(苏教师函[2025]4号)资助

0 引 言

外肢体机器人 (supernumerary robotic limbs, SRLs) 不同于协作机器人和外骨骼机器人,能够通过机械肢体与人体肢体对接融合、相互协作来完成单人双手无法完成的复杂任务,提高人体肢体功能和作业范围^[1]。外肢体与人体肢体共享操作空间,人机协作中易发生肢体干涉及碰撞等风险,造成人机运动相容性和协作效能降低,严重影响外肢体系人机操作的安全性和可靠性。因此,亟需研究一种面向外肢体机器人碰撞检测和振动反馈控制的方法,以实现对外肢体碰撞检测和反馈控制,提高外肢体系人机协作的安全性和可靠性。

目前,国内外科研人员已对外肢体机器人碰撞检测方法进行了相关研究,主要包括碰撞接触前预警和碰撞接触后感知两种^[2]。碰撞接触前预警指的是在机器人与环境或人体发生潜在碰撞之前,通过预测和监测机制提前识别可能的碰撞风险,并采取措施避免碰撞的发生。如 Safeea 等^[3]提出了一种结合激光扫描仪和惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 的框架,通过实时计算人机最小距离,并利用定制潜在场方法实现碰撞检测。董元发等^[4]结合深度相机骨架信息与稀疏采样实现点云快速重建,构建基于体素逼近的轴对齐包围盒碰撞检测方法,以提升人机协作安全性。席明磊^[5]结合双目视觉与 Alphapose 算法实时感知人体姿态,构建了最小安全距离预警系统和 Unity 可视化平台,提升了工业机器人人机协作安全性与作业效率。Fabrizio 等^[6]将多个深度相机信息进行融合并使用深度网络来计算物体间的距离,具有良好的实时性。Fang 等^[7]用圆柱体代替碰撞物体,通过计算圆柱之间最小距离判断是否发生碰撞。上述方法通过非物理接触方法实现人机碰撞前的检测,以保障紧耦合协作空间下人机安全。但仍存在点云遮挡导致的人体障碍空间感知不全、协作机械臂姿态规划失败等问题。

碰撞接触后感知是在碰撞发生时能够及时有效地检测碰撞并采取相应的控制措施,以实现安全操控的方式。Lu 等^[8]通过六维力/转矩传感器检测机械手的碰撞力和干扰扭矩,并结合神经网络和模型方法实现碰撞力的检测和精确定位,但该方法仅适用于二自由度旋转关节的机械臂。吴海彬等^[9]通过检测机器人关节电流和编码器反馈的位置信息实现实时的碰撞检测,但基于此方法计算得出的关节力矩值误差较大。Someya 等^[10]设计了一种融合有机晶体管 and 电子人工皮肤的薄膜力传感器,虽可直接获得接触力的信息,但存在易损坏,价格昂贵,设计复杂且对环境要求较高等问题。Leng 等^[11]通过力/转矩传感器来检测碰撞点的位置和碰撞力大小,但对于轮

廓复杂的机械臂应用较为困难。山东大学团队^[12]通过构造基于广义动量的碰撞观测器来估算外肢体机械臂外部碰撞力及碰撞位置,从而触发碰撞响应策略,减小碰撞力来保护用户安全。张铁等^[13]设计了一种基于扰动卡尔曼滤波的外力矩观测器,以实现对外肢体碰撞力的检测和估计。上述方法在提高人机协作安全性方面虽取得了一定成效,但大多侧重于碰撞力的检测与干预,缺乏与人体间的有效交互,导致人机交互性较差,限制了外肢体机器人在复杂协作场景中的应用。

为此,将针对自主研发的绳驱动外肢体机器人进行碰撞检测及振动反馈控制研究,以提高机器人的控制安全性和人机交互性。首先基于 D-H 法 (Denavit-Hartenberg, D-H) 和常曲率原理构建外肢体机器人双臂的运动学模型,并对其工作空间进行仿真分析。在此基础上,构建了外肢体机器人包围盒简化模型,提出了一种基于最小距离检测的外肢体机器人碰撞检测方法。同时设计一种基于压力传感器的外肢体碰撞检测装置,推导外肢体机器人接触静力学模型,实现对接触力/位置的检测和估计。最后通过搭建外肢体机器人碰撞检测系统平台对所建运动学模型、碰撞检测模型及振动反馈控制策略的准确性和有效性进行验证。

1 绳驱动外肢体机器人碰撞检测系统

为实现外肢体机器人在人机协作中的碰撞检测,设计了如图 1 所示的绳驱动外肢体机器人碰撞检测系统。

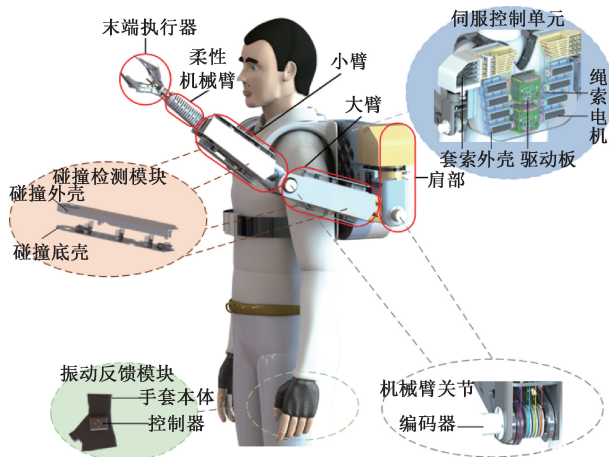


图 1 绳驱动外肢体机器人碰撞检测系统

Fig. 1 Collision detection system for supernumerary robotic limbs

该系统主要包括绳驱动外肢体机器人本体及其伺

服控制单元、碰撞检测模块和振动反馈控制模块。其中外肢体机器人本体是由 3 自由度的绳驱动机械臂及单节连续体弯曲单元构成,整个外肢体系统通过绳索驱动实现对其的运动控制。碰撞检测模块是一种基于压力传感器的接触力/位置检测装置,该装置通过锁扣结构安装在绳驱动机械臂大臂和小臂的外侧,通过可拆卸的模块化设计方式,能够快速更换因碰撞损害的外壳,降低其维修成本。振动反馈装置是一种穿戴在人体手部的触觉感知手套,该系统主要手套本体、控制器和振动电机组成,其中手套采用弹性运动手套作为原型,振动电机沿手腕圆周布局嵌入腕带,确保其紧贴手腕,避免间隙影响振动感知。

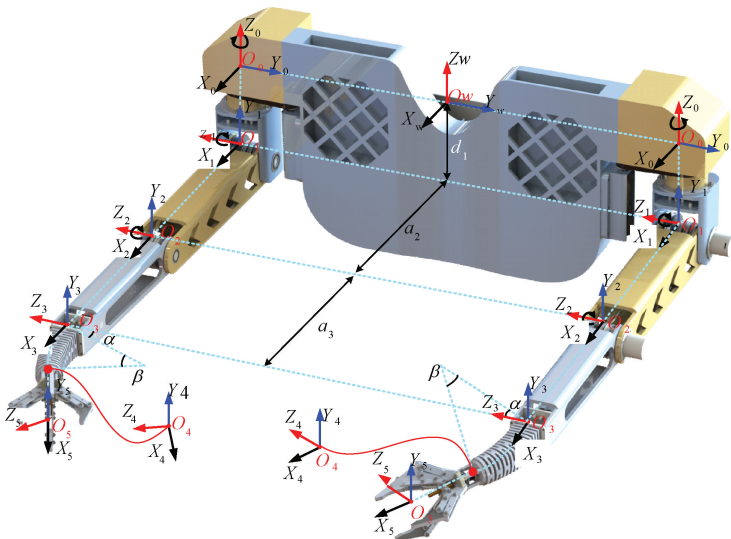


图 2 外肢体机器人连杆坐标系

Fig. 2 Supernumerary robotic limbs linkage coordinate system

表 1 外肢体机器人机械臂 D-H 参数表

Table 1 D-H parameter table for the arm of supernumerary robotic limbs

i	θ_i	$d_i/({}^\circ)$	$a_i/({}^\circ)$	$\alpha_i/({}^\circ)$	θ_i 范围/ $({}^\circ)$
1	θ_1	-150	0	90	-225~45(左)/ -45~225(右)
2	θ_2	0	300	0	-225~45
3	θ_3	0	255	0	-135~135

柔性机械臂由于其超冗余无限自由度的结构特点^[14-15],考虑到在形变过程中其弯曲轴线近似为等曲率圆弧,因此在常曲率圆弧假设下采用几何分析法对柔性机械臂进行运动学分析。首先建立连续体首尾两端坐标系 $O_3 - x_3y_3z_3$ 、 $O_4 - x_4y_4z_4$,其中柔性机械臂的两个自由度为偏转和弯曲运动,其符号分别用 α 和 β 表示。通过对柔性机械臂末端进行平移建立末端执行器坐标系 $O_5 - x_5y_5z_5$ 。

2 外肢体机器人运动学建模及仿真分析

2.1 外肢体机器人连杆坐标系建立

对于外肢体机器人刚性机械臂部分,基于 D-H 法建立外肢体机械臂的连杆坐标系,如图 2 所示。为了建立统一的坐标参考系,首先在外肢体机器人的两个肩部关节的对称中心设立全局基坐标系 $O_w - x_wy_wz_w$,并在每个肩部关节的关节中心设立局部坐标系 $O_0 - x_0y_0z_0$,全局基坐标系与局部坐标系在坐标轴方向上保持一致,仅在 y 轴方向上存在平移关系,平移距离由操作人员的肩部宽度 l 决定。并根据设定的关节坐标系,列出外肢体双臂刚性机械臂的 D-H 参数,具体参数如表 1 所示。

2.2 外肢体机器人运动学求解

为描述刚性机械臂关节参数与刚性机械臂末端位置和姿态间的映射关系,需根据图 2 建立的外肢体机器人坐标系及表 1 中的 D-H 参数列出外肢体刚性机械臂的运动学模型。刚性机械臂相邻连杆坐标系 O_{i-1} 与 O_i 间的映射关系为:

$${}^{i-1}_i\boldsymbol{T} = \text{Rot}(z_{i-1}, \theta_i) \text{Trans}(0, 0, d_i) \text{Trans}(a_i, 0, 0) \text{Rot}(x_i, \alpha_i) \tag{1}$$

O_3 相对于 O_0 的齐次变换矩阵 ${}^0_3\boldsymbol{T}$:

$${}^0_3\boldsymbol{T} = {}^0_1\boldsymbol{T} \times {}^1_2\boldsymbol{T} \times {}^2_3\boldsymbol{T} \tag{2}$$

外肢体机械臂的末端采用的是柔性机械臂方案,通过自身的弯曲变形来调整外肢体末端执行器的位姿。根据几何分析法^[16],相邻坐标系间的齐次变换矩阵可通过欧拉变换计算得到,从而求得坐标系 O_3 到坐标系 O_4 的齐次变换矩阵为:

$${}^3_4\mathbf{T} = \text{Trans}\left(\frac{L\sin(\beta_i)}{\beta_i}, \frac{L\sin(\alpha_i)[1 - \cos(\beta_i)]}{\beta_i}, \frac{L\cos(\alpha_i)[1 - \cos(\beta_i)]}{\beta_i}\right) \cdot \text{Rot}(x, \alpha_i) \cdot \text{Rot}(y, \beta_i) \cdot \text{Rot}(x, -\alpha_i) \quad (3)$$

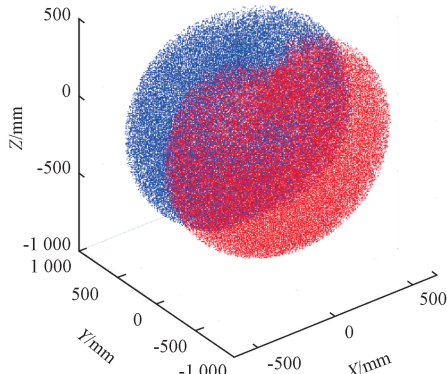
其中, L 为柔性机械臂长度。

根据求解的外肢体刚性机械臂和柔性机械臂的齐次变换矩阵,通过齐次变换原理可推导出外肢体机器人机械臂末端坐标系 O_5 相对于局部坐标系 O_0 的位姿关系,其齐次变换矩阵表示为:

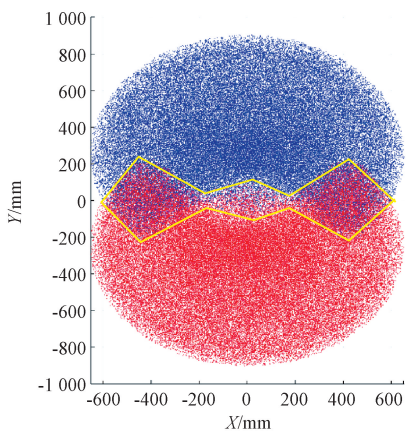
$${}^0_5\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T} \times {}^1_2\mathbf{T} \times {}^2_3\mathbf{T} \times {}^3_4\mathbf{T} \times {}^4_5\mathbf{T} \quad (4)$$

其中, ${}^4_5\mathbf{T}$ 为末端执行器坐标系。

下面基于蒙特卡洛法并结合外肢体机器人运动学模型(式(4))对其工作空间进行仿真分析,其仿真结果,如图3所示。



(a) 外肢体机器人工作空间
(a) Shoulder-flexible robotic arm workspace



(b) 外肢体机器人交集空间示意图
(b) Shoulder-flexible robotic arm intersection workspace diagram

图3 外肢体机器人双臂运动空间仿真

Fig. 3 Supernumerary robotic limbs dual-arm motion space simulation

图3中分别展示了外肢体机器人双臂工作空间内可能存在的交集空间,其中 y 轴正方向区域主要表示外肢

体左机械臂, y 轴负方向区域主要表示外肢体右机械臂。由图中结果可知,外肢体机器人工作空间近似为两个椭圆球体,且在外肢体刚性机械臂至柔性机械臂的工作空间内,外肢体双臂在操作员前后侧的活动区域重叠较为明显。这表明在这些重叠区域内进行辅助作业时外肢体双机械臂可能存在相互碰撞的风险。

3 基于包围盒的外肢体机器人碰撞建模及仿真

3.1 外肢体机器人碰撞检测模型简化

为保证外肢体机械臂双臂协作过程中的安全性,对外肢体机械臂进行模型简化分析,如图4所示。首先采用胶囊体包围盒对机械臂肩部连杆、大臂连杆和小臂连杆进行包裹。其中,肩部胶囊体包围盒端点 C 和 D 位于肩部旋转关节中心与大臂旋转关节中心,大臂胶囊体包围盒端点 D 和 E 位于大臂旋转关节中心与小臂旋转关节中心,小臂胶囊体包围盒端点 E 和 F 位于大臂旋转关节中心与刚性机械臂末端,胶囊体包围盒的半径由机械臂各连杆的机构宽度决定,长度由机械臂连杆长度决定。

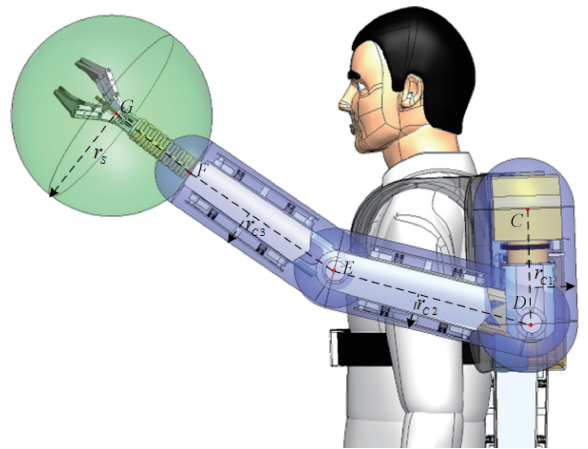


图4 机械臂简化模型

Fig. 4 Simplified model of the robotic arm

由于柔性机械臂在运行过程中主要依靠弯曲变形进行运动,胶囊体包围盒无法适应柔性机械臂。为此,本文采用球体包围盒对整个柔性机械臂及末端执行器进行简化,如图4所示。图4中柔性机械臂末端位置为球体包围盒的中心点 G ,半径则由柔性机械臂末端执行器工作空间的 Y 轴范围所确定。

3.2 外肢体机器人碰撞检测算法

根据上述外肢体机械臂的简化模型,可将外肢体机器人的碰撞检测问题等效为求解球体包围盒和胶囊体包围盒之间的位置关系问题^[17-19]。

1) 胶囊体包围盒—胶囊体包围盒

如图 5 所示,在笛卡尔积三维坐标系中,建立胶囊体包围盒两个中心线段上的点 M 和点 N 向量,即:

$$\begin{cases} \mathbf{M} = \mathbf{C} + \lambda(\mathbf{D} - \mathbf{C}) \\ \mathbf{N} = \mathbf{E} + \mu(\mathbf{F} - \mathbf{E}) \end{cases} \quad (5)$$

其中, λ 和 μ 是参数,取值范围为 $(0,1)$ 。

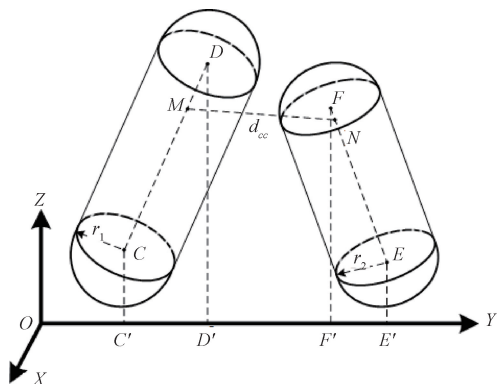


图 5 胶囊体包围盒与胶囊体包围盒

Fig. 5 Capsule bounding boxes

通过两条线段的方向向量之间的差,令矩阵 $\mathbf{Q} = (\mathbf{F} - \mathbf{E}) - (\mathbf{D} - \mathbf{C})$, $\mathbf{x} = [\lambda \ \mu]^T$, $\mathbf{y} = \mathbf{E} - \mathbf{C}$ 。

用最短距离函数 f 描述了两个点之间的距离平方:

$$f = (\mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{y})^T(\mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{y}) \quad (6)$$

通过矩阵 $\mathbf{Q}$ 的因式分解,可以进一步将该函数简化为:

$$f = (\mathbf{J}\mathbf{x} + \mathbf{I}^T\mathbf{y})^T(\mathbf{J}\mathbf{x} + \mathbf{I}^T\mathbf{y}) \quad (7)$$

其中, $\mathbf{I}$ 是单位正交矩阵, $\mathbf{J}$ 是上三角矩阵。

因此,两胶囊体包围盒间的最短距离 d_{cc} 可以通过优化函数 f 的值来得到:

$$d_{cc} = \sqrt{\min(f) + \mathbf{y}^T\mathbf{y} - \mathbf{y}^T\mathbf{I}\mathbf{I}^T\mathbf{y}} - (r_1 + r_2) \quad (8)$$

其中, $r_1 + r_2$ 是两个胶囊体包围盒的半径之和,如果 $d_{cc} \leq 0$ 则表示发生碰撞, $d_{cc} > 0$ 则表示未发生碰撞。

2) 胶囊体包围盒—球体包围盒

如图 6 所示,设球体包围盒的球心为 $P(x_0, y_0, z_0)$, 胶囊体包围盒中心线段的两个端点分别为 $C(x_1, y_1, z_1)$ 和 $D(x_2, y_2, z_2)$, 则点 M 可以表示为:

$$\begin{cases} u = x_1 + s(x_2 - x_1) \\ v = y_1 + s(y_2 - y_1) \\ w = z_1 + s(z_2 - z_1) \end{cases} \quad (9)$$

其中, s 表示点 M 在中心线段 l_{CD} 上的相对位置:

$$s = \frac{(x_1 - x_0)(x_2 - x_1) + (y_1 - y_0)(y_2 - y_1) + (z_1 - z_0)(z_2 - z_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (10)$$

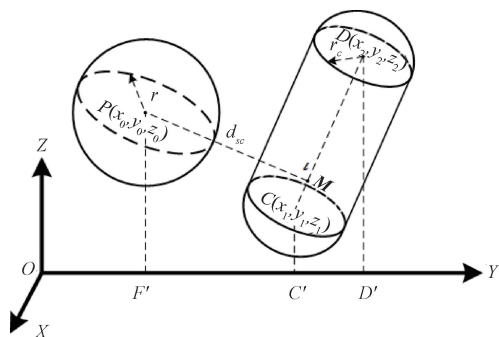


图 6 胶囊体包围盒与球体包围盒

Fig. 6 Capsule bounding box and spherical bounding box

根据投影参数 s 的取值范围,球体包围盒球心到胶囊体包围盒中心线段 l_{CD} 的最短距离有如式 (11) 所示 3 种情况。

$$d_{pl} = \begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2, & s \leq 0 \\ (u - x_0)^2 + (v - y_0)^2 + (w - z_0)^2, & 0 < s < 1 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2, & s \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

因此球体包围盒到胶囊体包围盒的最短距离可以表示为:

$$d_{sc} = d_{pl} - (r + r_c) \quad (12)$$

其中, r 为球体包围盒半径, r_c 为胶囊体包围盒半径。如果 $d_{sc} \leq 0$,则表示发生碰撞, $d_{sc} > 0$ 则表示未发生碰撞。

3) 球体包围盒—球体包围盒

当球体包围盒与球体包围盒满足 $|\mathbf{C}'\mathbf{D}'| > r_1 + r_2$ 时,包围盒不相交,如图 7 所示。

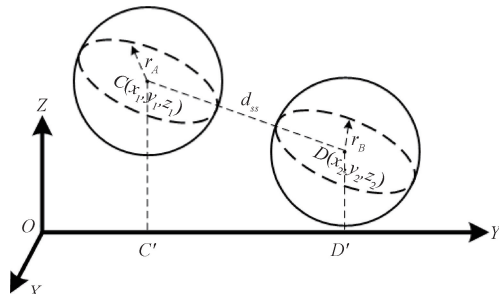


图 7 球体包围盒与球体包围盒

Fig. 7 Between spherical bounding boxes

图 7 中,两球体包围盒的最短距离可以表示为:

$$d_{ss} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} - (r_c + r_d) \quad (13)$$

其中, $r_c + r_d$ 是两个球体包围盒的半径之和, $d_{ss} \leq 0$ 判定为碰撞, $d_{ss} > 0$ 则表示未发生碰撞。

在机器人操作运动过程中,碰撞检测是确保安全性的重要环节。首先,可采用简化的胶囊体包围盒和球体包围盒分别对机械臂及人体头部进行建模,并在机器人运动过程中不断更新包围盒的位姿,以确保碰撞检测的实时性。通过遍历外肢体机械臂工作环境中的障碍物,采用最小距离法进行精确判定,确认碰撞情况。外肢体机器人碰撞检测算法流程图如图8所示。

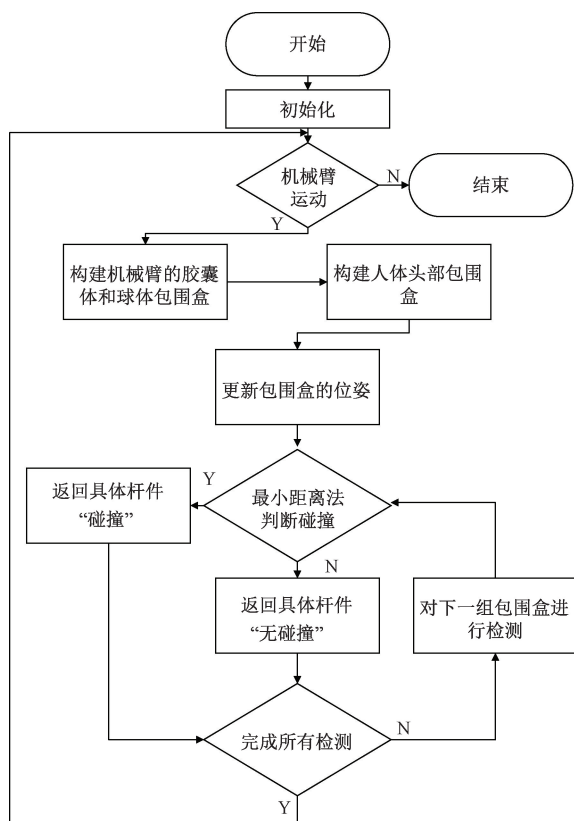


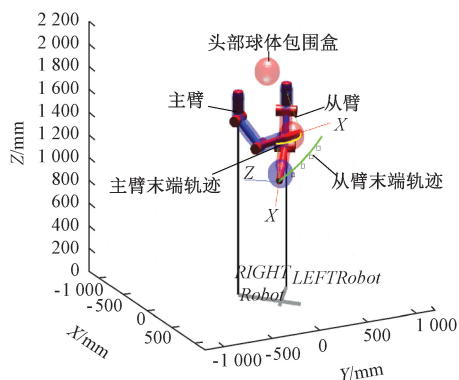
图8 外肢体机器人碰撞检测算法流程

Fig. 8 Collision detection algorithm flowchart for exoskeleton robots

3.3 外肢体机器人的碰撞检测仿真分析

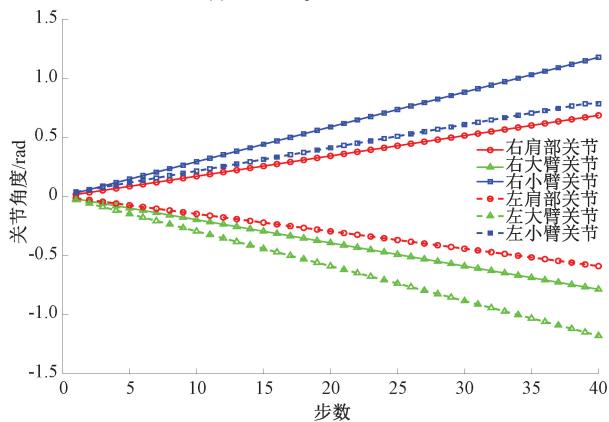
本节通过外肢体双臂运动过程中的碰撞检测仿真以验证所提的碰撞检测算法的正确性和有效性。实验过程中设置外肢体右臂为主臂,左臂为从臂。在外肢体双臂无自避碰路径规划仿真实验中,设外肢体左臂从起始位姿 $p_0 = [0, 0, 0]$ 向右下方运动,末端位姿设置为 $p_1 = [\pi/4, -\pi/4, \pi/8]$ 。外肢体右臂从起始位姿 $p_0 = [0, 0, 0]$ 向左上方运动,末端位姿设置为 $p_3 = [3\pi/16, -3\pi/8, \pi/4]$,设定绝对安全距离为 30 mm,并利用 MATLAB 软件对其运动过程进行仿真实验,仿真结果如图9所示。

图9(a)展示了外肢体机械臂的各个连杆和操作者头部的三维空间仿真,并通过包围盒进行了简化处理,实



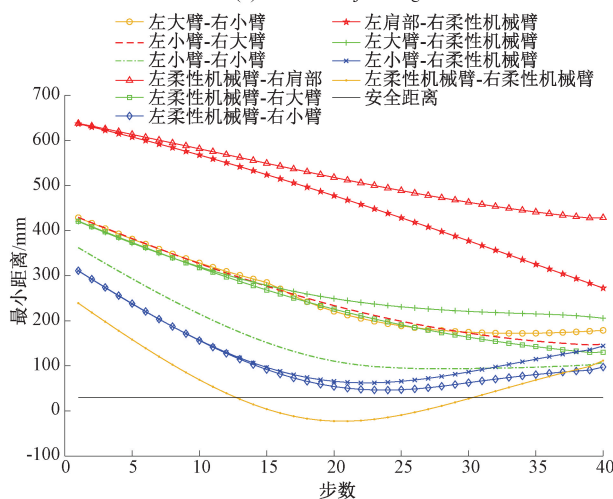
(a) 三维工作空间仿真

(a) 3D workspace simulation



(b) 各关节角度变化

(b) Variation of joint angles



(c) 双臂各连杆之间最小距离

(c) Minimum distance between each link of the double-arm

图9 外肢体碰撞检测方法仿真

Fig. 9 Simulation of supernumerary robotic limbs with self-avoidance algorithm

线表示主臂末端轨迹,带方形标记的实线表示外肢体从臂末端轨迹。图9(b)展示了外肢体双臂在运动过程中各关节角度的变化。图9(c)则显示了外肢体双臂在运动过程中各连杆之间的最小距离曲线。由图中结果可

知,外肢体机器人双臂在运动至步数 12~30 时,左柔性机械臂与右柔性机械臂之间的最小距离小于设定的绝对安全距离 30 mm,且最小距离为-22.59 mm,这表明外肢体双臂在该阶段存在碰撞风险,由此验证了基于包围盒的碰撞检测方法的准确性和有效性。

4 外肢体机器人碰撞检测系统及静力学建模

4.1 外肢体机器人碰撞检测系统

为实现外肢体机械臂的主动安全控制,提出了一种外肢体机器人碰撞检测与振动反馈控制系统,如图 10 所示,该系统主要包括大臂碰撞检测装置、小臂碰撞检测装置、上下侧碰撞检测装置和振动反馈手套。其中碰撞检测装置由外壳、底壳和 2 个压力传感器装置等部件组装而成。当外壳接受到碰撞外力时,外壳上的压力杆在定位杆和定位槽的限制下垂直地按压在底壳中的压力传感器组上,实现对外部力的检测。振动反馈手套上布置了 2 组振动电机,每组包含 4 个电机,其均匀分布于手腕的上下左右 4 个方向,用于反馈外肢体大臂和小臂的接触力信息。

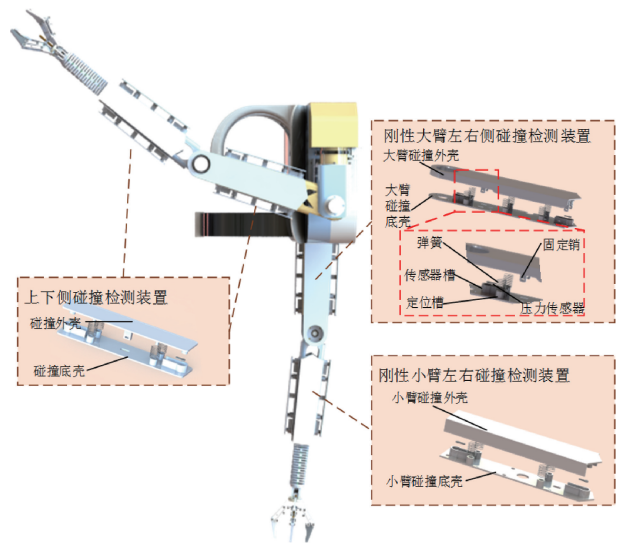


图 10 碰撞检测与振动反馈控制系统结构示意图
Fig. 10 Diagram of collision detection and vibration feedback control system structure

4.2 外肢体机器人接触静力学建模

为便于建模分析,将机器人接触力信息转化为外部力和支反力,如图 11 所示,通过 2 个力的力矩平衡关系来构建外肢体机器人的静力学模型^[20-21]。

1) 外肢体机器人碰撞检测静力学建模

当外肢体机器人在操作过程中与障碍物发生碰撞时,外部接触力作用于机械臂外部的碰撞检测装置,其内

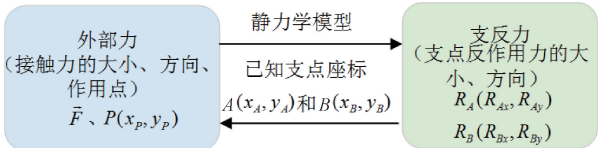


图 11 外肢体机器人接触力平衡关系
Fig. 11 Contact force balance relationship of supernumerary robotic limbs

部压力传感器组的受力情况如图 12 所示。通过在碰撞检测装置的表面建立笛卡尔直角坐标系,设支点 A 到 B 的连线方向为坐标系的 x 轴,以支点 A 为圆心将 x 轴逆时针旋转 $\pi/2$ 得到 y 轴,然后根据所建的直角坐标系,得到如表 2 所示的外肢体机器人碰撞装置碰撞参数。

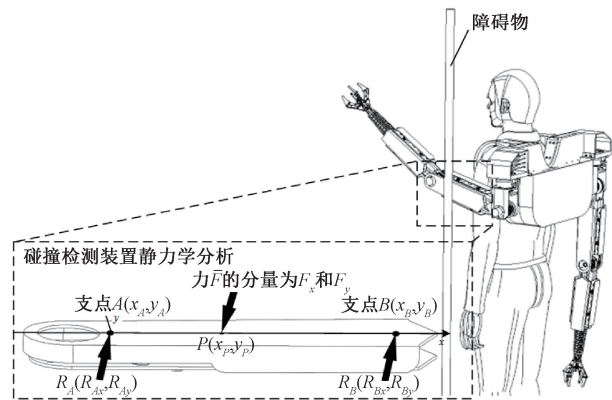


图 12 机器人碰撞后碰撞检测装置受力分析
Fig. 12 Force analysis of the collision detection device after the robot collision

表 2 外肢体机器人碰撞参数
Table 2 Collision parameters for supernumerary robotic limbs

名称	力/N	位置/cm
接触力 $\vec{F}$ 作用于点 P	F_x 和 F_y	(x_p, y_p)
支点 A	$R_A(R_{Ax}, R_{Ay})$	(x_A, y_A)
支点 B	$R_B(R_{Bx}, R_{By})$	(x_B, y_B)

(1) 外部力静力—支反力静力学建模

根据所建立的平面坐标系和碰撞参数,对外肢体机器人碰撞装置的受力情况进行静力学分析,即已知碰撞力的大小、方向作用点和支点 A 和 B 的坐标位置求解支点 A 和 B 反作用力的大小和方向。

在平衡状态下,碰撞检测装置外壳在水平方向和垂直方向上分别建立力平衡方程,其中根据垂直力平衡方程得出:

$$R_{Ay} + R_{By} = F_y \tag{14}$$

根据水平力平衡方程得出:

$$R_{Ax} + R_{Bx} = F_x \quad (15)$$

力矩平衡方程为了保证碰撞检测装置外壳不发生旋转,需要考虑力矩平衡。选择支点 A 作为转动中心来计算力矩。根据力矩平衡方程有:

$$R_{By} \cdot (x_B - x_A) - R_{Bx} \cdot (y_B - y_A) = F_y \cdot (x_P - x_A) - F_x \cdot (y_P - y_A) \quad (16)$$

通过求解得出支点 B 垂直支反力,即:

$$R_{By} = \frac{F_y \cdot (x_P - x_A) - F_x \cdot (y_P - y_A)}{(x_B - x_A) - (y_B - y_A)} \quad (17)$$

将式(17)代入式(14)中求解得出支点 A 垂直支反力,即:

$$R_{Ay} = F_y - R_{By} = F_y - \frac{F_y \cdot (x_P - x_A) - F_x \cdot (y_P - y_A)}{(x_B - x_A) - (y_B - y_A)} = F_y \left(1 - \frac{(x_P - x_A)}{(x_B - x_A) - (y_B - y_A)}\right) + \frac{F_x \cdot (y_P - y_A)}{(x_B - x_A) - (y_B - y_A)} \quad (18)$$

由于在水平力平衡方程中没有其他变量,可直接将 R_{Ax} 和 R_{Bx} 代入式(15)中支点 A 水平支反力和支点 B 水平支反力,如式(19)~(20)所示。

$$R_{Ax} = F_x - R_{Bx} \quad (19)$$

$$R_{Bx} = F_x - R_{Ax} \quad (20)$$

结合式(18)和(19)得出支点 A 支反力,即:

$$R_A(R_{Ax}, R_{Ay}) = R_A \left(F_x - R_{Bx}, F_y \left(1 - \frac{(x_P - x_A)}{(x_B - x_A) - (y_B - y_A)}\right) + \frac{F_x \cdot (y_P - y_A)}{(x_B - x_A) - (y_B - y_A)} \right) \quad (21)$$

结合式(17)和(20)得出支点 B 支反力,即:

$$R_B(R_{Bx}, R_{By}) = R_B \left(F_x - R_{Ax}, \frac{F_y \cdot (x_P - x_A) - F_x \cdot (y_P - y_A)}{(x_B - x_A) - (y_B - y_A)} \right) \quad (22)$$

(2) 支反力—外部力静力学建模

由于传感器组只能直接对接触力进行检测,不能检测碰撞位置,为此,本文根据力矩平衡方程对传感器组检测的接触力进行分析,从而间接估算出碰撞的位置^[22-23]。根据图12建立的平面坐标系和表2的碰撞参数,对外肢体机器人碰撞装置支点受力情况进行静力学分析,即已知支反力和支点 A 和支点 B 的坐标位置求解外部力的大小和位置。

假设碰撞检测装置外壳上施加的接触力为 $\vec{F} = (F_x, F_y)$,作用在点 $P(x_p, y_p)$,根据垂直力平衡方程

$\sum F_y = 0$ 和水平力平衡方程 $\sum F_x = 0$ 得出外部力的接触力 $\vec{F}$ 。

$$\vec{F} = (F_x, F_y) = (R_{Ax} + R_{Bx}, R_{Ay} + R_{By}) \quad (23)$$

结合力矩平衡方程求解出外部力的接触力位置 $P(x_p, y_p)$ 。

$$P(x_p, y_p) = P \left(\frac{R_{By} \cdot (x_B - x_A)}{R_{Ay} + R_{By}}, \frac{R_{Bx} \cdot (y_B - y_A)}{R_{Ax} + R_{Bx}} \right) \quad (24)$$

2) 外肢体机器人碰撞检测静力学仿真与分析

下面在上述静力学分析的基础上,利用 MATLAB 软件对外肢体机械臂的碰撞检测装置进行静力学仿真分析。首先对碰撞检测装置的支点 A 和支点 B 的支反力与压力 $\vec{F} = (F_x, F_y)$ 的静力学特征进行分析,其中支点 A 和 B 的支反力在水平分量和垂直分量上的 R_{Ax} 、 R_{Bx} 、 R_{Ay} 和 R_{By} 的取值范围为 0~15 N,外肢体机械臂碰撞检测装置压力 $\vec{F} = (F_x, F_y)$ 的大小如图13所示,由图13可知,外肢体碰撞检测装置的压力 $\vec{F} = (F_x, F_y)$ 与 R_{Ax} 、 R_{Bx} 、 R_{Ay} 和 R_{By} 呈现线性正相关,其在垂直分量和水平分量碰撞力检测的范围为 0~30 N。

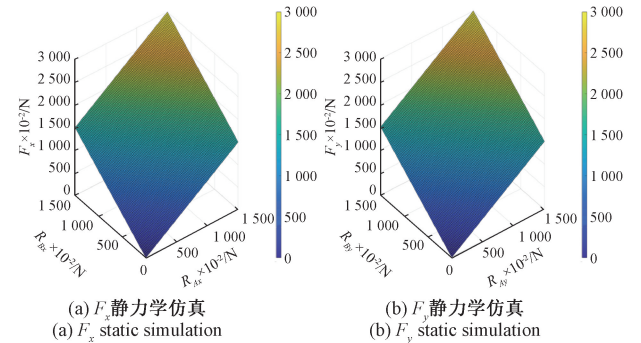


图13 碰撞力 $\vec{F} = (F_x, F_y)$ 静力学仿真

Fig. 13 Static simulation of collision force $\vec{F} = (F_x, F_y)$

接着对碰撞检测装置的支点 A 和 B 的支反力与碰撞力位置 $P(x_p, y_p)$ 的静力学关系进行分析,其中本文所设计的碰撞检测装置表面近似为长方形,长度为 20 cm,宽度为 6 cm,取支点 A 的坐标 (x_A, y_A) 为 (0 cm, 0 cm),支点 B 的坐标 (x_B, y_B) 为 (20 cm, 0 cm),其中支点 A 和 B 的支反力在水平分量和垂直分量上的取值范围为 0~15 N。其碰撞位置 $P(x_p, y_p)$ 仿真结果如图14(a)所示,图14(a)中显示 x_p 的取值范围为 0~20 cm,其中 x_p 与 R_{By} 成正比例关系, x_p 与 R_{Ay} 成反比例关系,并且这种比例关系使得 x_p 不会随着 R_{Ay} 或 R_{By} 的变化而线性变化,而受两者的相互影响。图14(b)中 y_p 不受 R_{Ay} 和 R_{By} 的影响,取值为 0 cm,由于机械臂只需要检测轴向的碰撞位置,用于计算安全反向逃逸距离,即 y 轴坐标信息无影响。

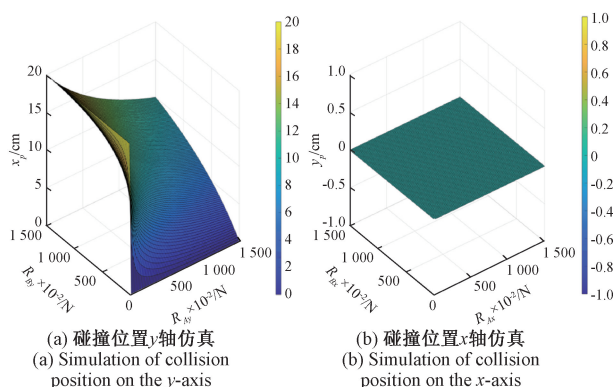


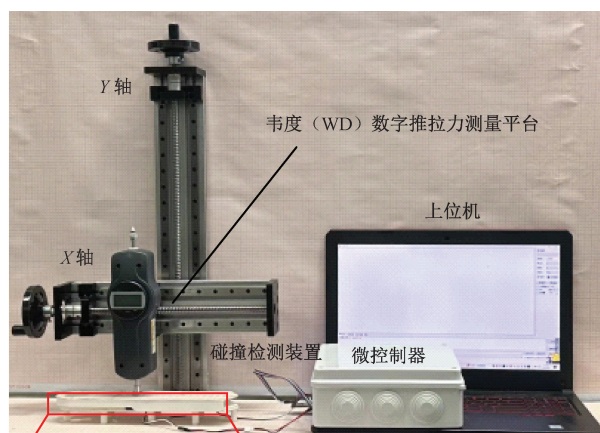
图14 碰撞位置静力学仿真

Fig. 14 Static simulation of collision position

3) 碰撞检测装置的设计与标定

考虑到设备制造误差、环境变化及长期使用带来的性能波动,静力学理论模型难以准确反映实际检测情况。因此,需结合实测数据对检测装置进行标定,以提升其在实际环境中的测量精度和可靠性,确保系统满足高精度应用的需求。

结合薄膜压力传感器的工作原理,本文设计的碰撞检测装置采用3D打印技术加工而成。以大臂左右侧碰撞检测装置为例,其内部结构如图15所示。通过微控制器输出压力传感器装置A和B的数值(简称DOA值和DOB值),并对其进行处理,实现接触力信息的检测。



(a) Physical image of the collision detection device

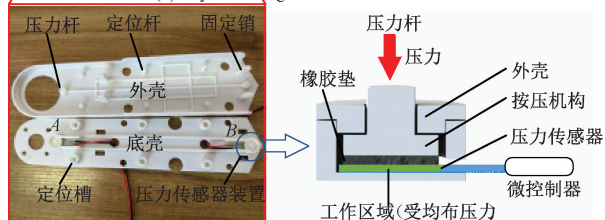


图15 碰撞检测装置实物和内部结构

Fig. 15 Physical and internal structure diagram of the collision detection device

4) 机械臂碰撞检测装置标定方法

通过标定试验以确定压力传感器组的数字信号输出值(DOA值和DOB值)与所受压力值(F)和位置 $P(x_p, y_p)$ 之间的函数关系,为此,采用如图15(a)所示的韦度(WD)数字推拉力量测量平台为碰撞检测装置施加稳定但不同的压力。

以型号为RP-C7.6-ST-*LF的薄膜压力传感器为例,对其标定过程及标定函数进行说明。标定过程如下:首先通过移动测量平台的X和Y轴,将推拉计调至与碰撞检测装置在同一垂直位置。然后,在如图15(a)所示的碰撞检测装置表面选取25个预定位置,选择在0~15 N范围内的105个压力点,依次进行标定试验。在每个位置,按照压力值从小到大的顺序,通过精确下移测量平台的Y轴,逐步增大施加在碰撞检测装置上的压力。标定过程中,通过读取推拉计的数字值及上位机软件显示界面的DOA值和DOB值,对压力值 F 和压力 P 坐标进行标定。

标定结果如图16所示,图16中 R^2 值表示拟合优度,是衡量拟合模型解释数据方差能力的指标。其中,碰撞位置标定的拟合模型的 R^2 值约为0.889,碰撞力标定的拟合模型的 R^2 值约为0.973。这表明该次标定试验的结果可以通过DOA值和DOB值准确地反映压力值(F)和压力 P 坐标。

4.3 基于振动触觉反馈的外肢体机器人安全控制策略

为清晰地传递机械臂各部位的碰撞信息,振动电机与外肢体机械臂各碰撞面一一对应,实现精准的接触力反馈。振动电机的振动模式设计为100~350 Hz的振动频率振动,用于反馈外肢体机械臂与外界物体之间2~12 N的接触力大小,振动反馈手套(左手)振动模式设计如图17(a)和(b)所示。

针对上述外肢体机械臂碰撞检测装置所检测的轴向碰撞位置建立数学模型,并在固定逃逸距离的条件下,提出相应的关节角度调整策略,以优化碰撞应对机制。由于接触力的位置在碰撞检测装置的表面是已知的,依据碰撞表面来调整逃逸方向,即逃逸方向沿着该表面的法向量反向。

为此,定义逃逸位移为:

$$\Delta p = d_{\text{escape}} \cdot n_{\text{surface}} \quad (25)$$

其中, d_{escape} 为固定逃逸距离,设为常数; n_{surface} 为碰撞表面的单位法向量,用于决定逃逸方向。

当碰撞发生在碰撞检测装置P1、P3、P5和P7所对应的碰撞面时,为确保机械臂能够顺利摆脱碰撞,需要调整外肢体肩部关节的旋转角度;当碰撞发生在P2和P4所对应的碰撞面时,则需调整外肢体大臂关节的旋转角度以实现有效避让;而当碰撞发生在P6和P8所对应的碰撞面时,则需要通过调整外肢体小臂关节的旋转角度,

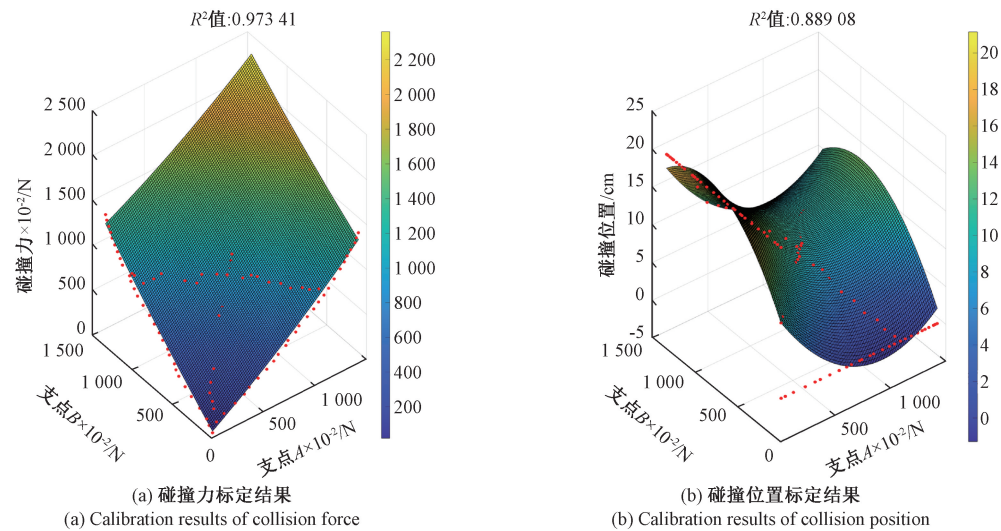


图 16 标定结果
Fig. 16 Calibration results

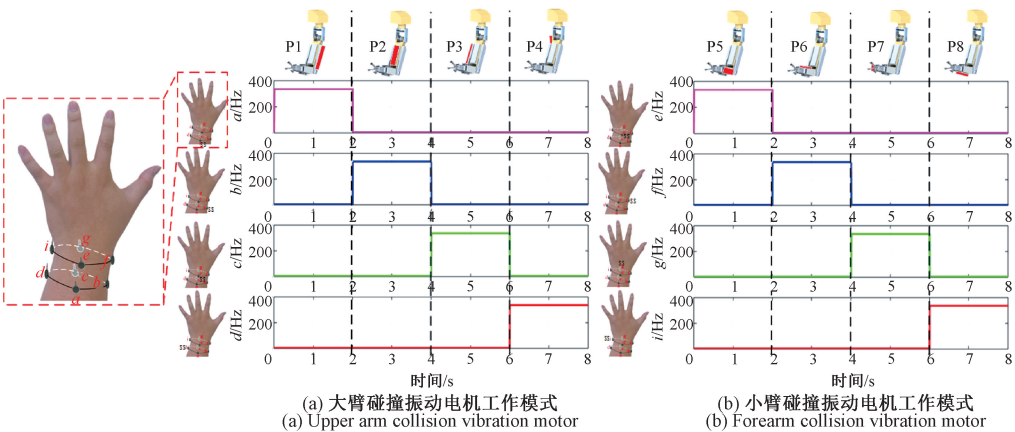


图 17 振动反馈手套(左手)振动模式设计

Fig. 17 Vibration mode design of the vibration feedback glove (left hand)

使机械臂成功脱离碰撞区域,具体各碰撞表面的单位法向量 $\boldsymbol{n}_{\text{surface}}$ 如表 3 所示。

表 3 碰撞表面的单位法向量

Table 3 Unit normal vectors of contact surfaces

对应碰撞面	单位法向量 $\boldsymbol{n}_{\text{surface}}$
P1,P5	[1, 0, 0]
P3,P7	[-1, 0, 0]
P2	[0, -1, 0]
P4	[0, 1, 0]
P8	[0, 0, 1]
P6	[0, 0, -1]

各个连杆逃逸位移 Δp 需通过映射至关节角度调整量。对于外肢体机器人刚性机械臂,其固定逃逸位移 d_{escape} ,刚性机械臂碰撞位置相对于旋转关节的距离 $L_j(j=1,2,3)$ 和关节角度 $\Delta\theta_j$ 变化的关系为:

$$d_{\text{escape}} = L_j \cdot \sin(\Delta\theta_j) \tag{26}$$

在小角度近似条件下 $\sin\theta \approx \theta$,即:

$$\Delta\theta_j = \frac{d_{\text{escape}}}{L_j} \tag{27}$$

其中, L_j 是机械臂上不同面碰撞位置 $x_i(i=1,2,3,\dots,8)$ 与其对应连杆长度的关系,其表达式为:

$$L_j = \begin{cases} \sqrt{link_1^2 + (link_2 - x_i)^2 + 2link_1(link_2 - x_i)\cos\theta_1}, & j=1, i=1,3 \\ \sqrt{(link_1 + link_2\cos(\theta_1) + (link_3 - x_i)\cos^2(\theta_2)) + (link_2\sin(\theta_1) + (link_3 - x_i)\sin(\theta_2))^2}, & j=1, i=5,7 \\ link_2 - x_i, & j=2, i=2,4 \\ link_3 - x_i, & j=3, i=6,8 \end{cases}, \quad (28)$$

其中, $link_1$ 、 $link_2$ 和 $link_3$ 分别为外肢体肩部、大臂和小臂连杆长度。为此,碰撞点 x_i 越靠近逃逸关节中心,所需调整的关节角度越大。

4.4 外肢体机器人碰撞检测及振动反馈控制系统设计

为实现对外肢体机器人碰撞检测及振动反馈控制,本文在静力学分析和碰撞检测装置标定的基础上,提出了一种基于接触力信息反馈的触觉感知和反向逃逸安全控制策略,如图 18 所示。当外肢体机械臂发生碰撞时,首先通过压力传感器采集并估算外部的接触力,碰撞检测微控制器将处理后的碰撞信息通过串口蓝牙通讯发送至上位机软件,上位机软件利用所建立的碰撞检测标定模型,将这些信息转换为碰撞位置和接触力的估计值,并最终生成相应的振动反馈信号。然后振动反馈信号通过串口蓝牙通讯发送至智能手套,智能手套中的微控制器将该信号处理后使振动电机按照设定模式产生振动,将触觉反馈传递至人体手腕处,从而使操作者能够感知机械臂的接触力。此外,当接触力超过设定阈值时,上位机将碰撞信息同步发送至外肢体运动控制单元,然后通过驱动器控制电机调整绳索长度,从而带动对应关节进行反向运动,使外肢体机械臂快速脱离碰撞区域,完成相应的固定距离反向逃逸策略,实现主动避障保护。

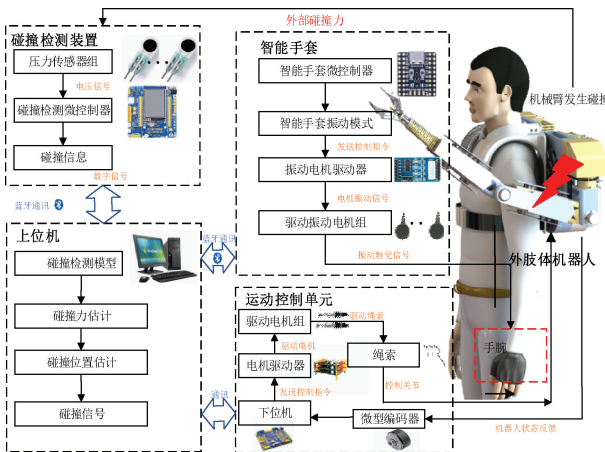


图 18 外肢体机器人碰撞检测及振动反馈控制系统
Fig. 18 Collision detection and vibration feedback control system for supernumerary robotic limbs

5 实验与分析

5.1 外肢体机器人碰撞检测及振动反馈控制系统样机搭建

根据外肢体机器人系统及上文所设计的控制系统搭建了外肢体机器人碰撞检测及振动反馈控制系统样机,如图 19 所示。该系统由外肢体机械臂、大臂 P1~P4 面碰撞检测装置、小臂 P5~P8 面碰撞检测装置、碰撞检测微控制器、上位机及反馈手套等组成。该系统将绳驱动外肢体机器人的机械臂倒置在光学平板上,模拟人体穿戴场景,同时整个系统采用串口蓝牙通讯,能够有效增强手套的可穿戴性,提高系统的便携性和穿戴舒适性。

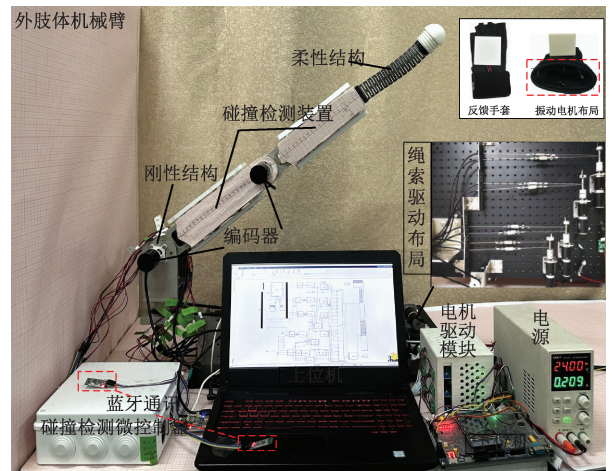


图 19 外肢体机器人碰撞检测及振动反馈控制系统样机
Fig. 19 Prototype of collision detection and vibration feedback control system for supernumerary robotic limbs

5.2 外肢体机器人运动控制实验

为确保数据的准确性并避免其他关节运动对测量结果的干扰,需保持非运动关节静止,如图 20 所示。控制肩部关节在 $0^\circ \sim -180^\circ$ 绕 Z 轴顺时针运动控制。外肢体大臂关节在 $0^\circ \sim -180^\circ$ 绕 Z 轴逆时针进行运动控制,小臂关节在 $90^\circ \sim -90^\circ$ 绕 Z 轴逆时针进行运动控制。同时通过编码器测量机器人各关节的实际运动角度。

实验结果如图 20 所示,肩部关节、大臂关节与小臂关节具有较好的运动性能。其在运动过程中肩部关节、大臂关节与小臂关节的平均误差分别为 1.1° 、 0.85° 和 0.7° ,如图 21 所示。其中肩部关节的误差高于大臂关节,大臂关节的误差高于小臂关节。通过对实验过程进行分析,误差增大的主要原因在于外部碰撞检测装置的安装导致机械臂自重增加,从而使其受到较大的重力影响。为了维持预设的角度位置,驱动绳索需施加更大的张力,进而造成绳索应变增大,导致角度控制精度下降。

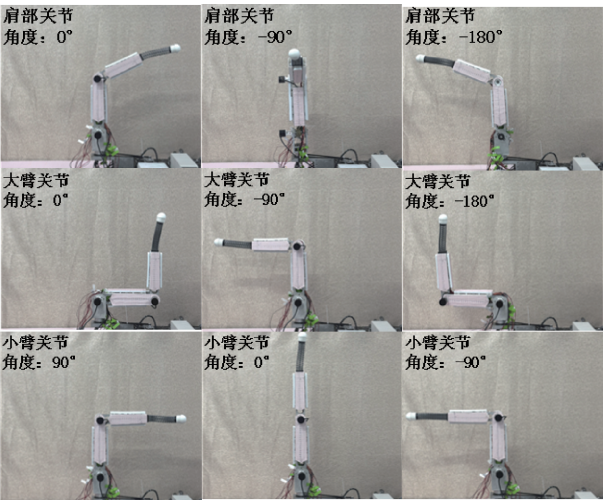


图 20 机械臂关节运动示意图
Fig. 20 Diagram of robotic arm joint movements

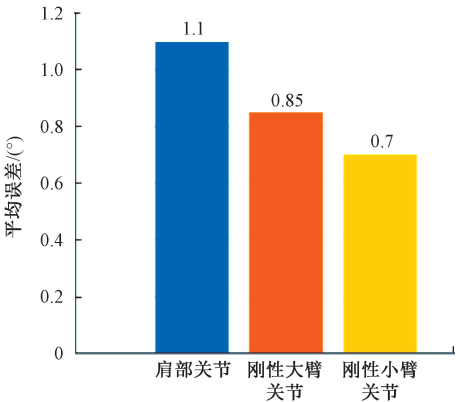


图 21 刚性机械臂三关节平均误差
Fig. 21 Average error of three joints in rigid manipulator

柔性机械臂作为刚性机械臂运动功能的补充,其弯曲变形特性使其在复杂工况下能够更灵活、高效地完成作业。为此,下面通过柔性机械臂关节运动实验,以验证其运动特性,其动作控制如图 22 所示。实验结果表明:经过多次重复实验,柔性机械臂在其工作空间内依然保持良好的运动性能,各关节的角度变化均符合预期范围。

5.3 外肢体碰撞检测及振动反馈实验研究

为了验证外肢体碰撞后振动反馈控制方法的可行性和准确性,对外肢体机械臂进行碰撞检测模拟实验。本实验采用障碍物移动,机械臂静止的实验方案进行实验。具体实验步骤如下:通过直径 12 mm,长度 80 cm,304 不锈钢材质的金属棒作为障碍物,对外肢体机械臂的 P5 面施加压力,同时记录上位机输出的接触力及碰撞位置,并将其发送至振动反馈手套进行振动反馈。然后将这些数据导入 MATLAB 进行分析,实验结果如图 23 所示。

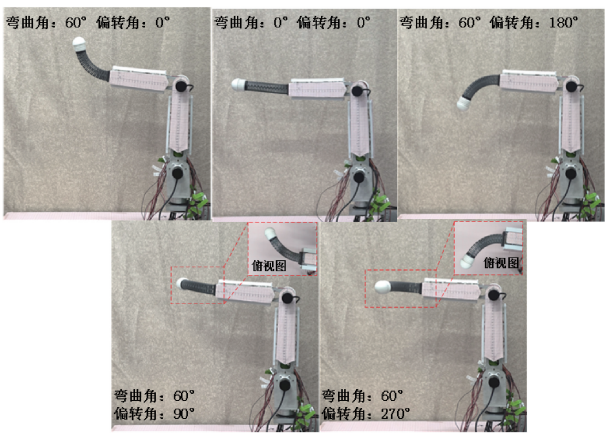


图 22 柔性机械臂的运动示意图
Fig. 22 Diagram of flexible robotic arm motion

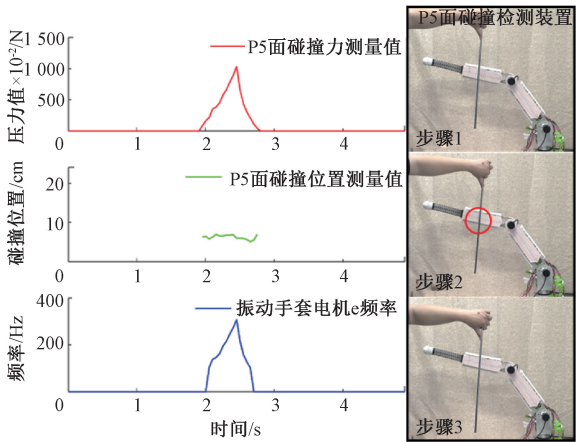


图 23 碰撞检测及振动反馈控制策略实验
Fig. 23 Experiment on collision detection and vibration feedback control strategy

由图 23 中实验结果可知,碰撞检测装置能够在 0.12 s 内准确检测出碰撞力的大小,并能快速定位到对应碰撞检测装置的轴向碰撞位置。同时,当碰撞力超过设定阈值 2 N 时系统能够将当前的振动电机振动信息发送至智能手套。而振动手套的振动反馈控制策略能够有效反映机械臂的碰撞情况,并通过更新振动电机的振动频率将碰撞力的大小有效映射到操作人员的手腕,实现对碰撞信息的及时感知。由此验证了所设计的基于碰撞检测装置及振动反馈控制策略的正确性和有效性。

5.4 外肢体机器人安全反应实验

为验证外肢体机器人在碰撞发生后安全反应控制策略的有效性,本实验以凳子作为障碍物来模拟辅助作业环境中机械臂在多种碰撞情况下的主动避让过程,如图 24 所示。实验设置反向逃逸距离为 2 cm,实际逃逸位移则通过坐标纸进行测量。

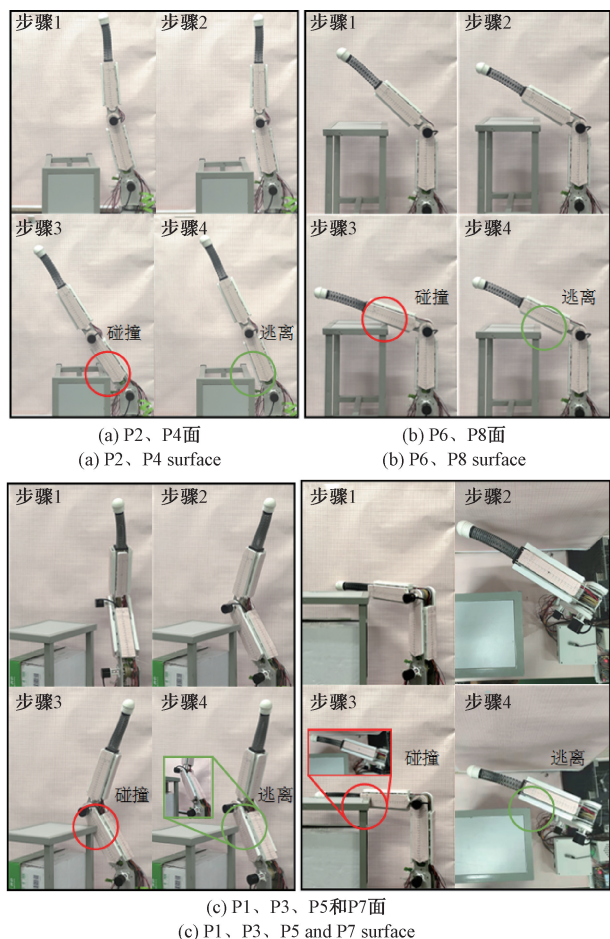


图24 外肢体机器人安全反应实验

Fig. 24 Safety response experiment of the supernumerary robotic limbs

具体实验流程为:对于 P2 和 P4 面的安全反应策略实验,通过控制机械臂的大臂关节使 P4 面与凳子侧边发生接触。当检测到碰撞后,依据碰撞位置的法向量方向,大臂关节执行小幅度反向旋转,使 P4 面脱离碰撞区域,如图 24(a) 所示。对于 P6 和 P8 面的实验,通过调整小臂关节角度,使 P8 面与凳子发生碰撞,当碰撞发生后,小臂关节根据轴向位置反馈进行反向调整,实现 P8 面的有效避让,结果如图 24(b) 所示。针对 P1、P3、P5 与 P7 面的安全策略实验,则通过肩部关节的控制使对应面与障碍物发生碰撞,当检测到碰撞信号后,肩部关节则依据轴向距离信息进行小范围反向转动,使机械臂对应部位脱离接触区域,如图 24(c) 所示。

实验结果表明:各类碰撞平均可在 0.7 s 内解除,所提出的基于轴向碰撞距离的反向逃逸安全控制策略能够在不同碰撞表面下有效驱动对应关节实现主动的避障控制,有效验证了该策略的有效性和正确性。

6 结 论

本文围绕外肢体机器人在协作过程中的安全性与可靠性问题,提出了一种外肢体机器人碰撞检测与振动反馈控制系统。首先,基于 D-H 法与常曲率法建立外肢体双臂运动学模型,并结合蒙特卡洛法对其工作空间进行仿真分析,验证了双臂间重叠区域的存在。在此基础上,构建了基于包围盒的碰撞检测算法,通过 MATLAB 仿真验证了其准确性与有效性。

针对绳驱动外肢体机器人在复杂协作环境中存在的安全性低、可靠性差等问题,构建了碰撞检测装置静力学模型,提出一种基于接触力信息反馈的振动触觉感知与固定距离反向逃逸控制策略,实现对不同碰撞方向的碰撞感知和主动避障。通过实验样机平台进行外肢体运动控制、振动反馈及安全控制实验,结果表明:绳驱动外肢体机器人在工作空间中具有较好的运动控制性能,该控制系统能够在 0.12 s 内完成碰撞检测,且可在 0.7 s 内实现有效的主动避障控制,有效验证了所建模型与控制策略的正确性和有效性。但由于条件限制,相关研究仍有不足之处,后续将进一步围绕绳驱动外肢体机器人的动力学建模、多模态感知融合机制等方面开展研究。

参考文献

- [1] PARIETTI F. Design and control of supernumerary robotic limbs[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2016.
- [2] 石大为. 面向机器人装配的人机协作安全防护关键技术研究[D]. 沈阳:东北大学,2020.
- SHI D W. Research on the key technologies of human-machine cooperative safety protection for robot assembly[D]. Shenyang: Northeastern University, 2020.
- [3] SAFEER M, NETO P. Minimum distance calculation using laser scanner and IMUs for safe human-robot interaction[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 58: 33-42.
- [4] 董元发, 黄继涛, 黎海凡, 等. 面向紧耦合协作空间的人-机点云快速重建与碰撞检测方法研究[J/OL]. 机械工程学报, 1-13[2025-05-03].
- DONG Y F, HUANG J T, LI H F, et al. Research on rapid reconstruction and collision detection of human machine point clouds for tightly coupled collaborative spaces[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 1-13[2025-05-03].
- [5] 席明磊. 基于深度学习的人机协作安全方法研

- 究[D]. 天津:天津理工大学, 2022.
- XI M L. Research on human-computer collaboration security based on deep learning [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2022.
- [6] FABRIZIO F, DE LUCA A. Real-time computation of distance to dynamic obstacles with multiple depth sensors[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2016, 2(1):56-63.
- [7] FANG CH, ROCCHI A, HOFFMAN E M, et al. Efficient self-collision avoidance based on focus of interest for humanoid robots[C]. 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots, 2015: 1060-1066.
- [8] LU SH J, CHUNG J H, VELINSKY S A. Human-robot collision detection and identification based on wrist and base force/torque sensors[C]. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005: 3796-3801.
- [9] 吴海彬, 李实懿, 吴国魁. 基于动量偏差观测器的机器人碰撞检测算法[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(5): 97-104.
- WU H B, LI SH Y, WU G K. Collision detection algorithm for robot manipulator based on momentum deviation observer[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(5): 97-104.
- [10] SOMEYA T, KATO Y, SEKITANI T, et al. Conformable, flexible, large-area networks of pressure and thermal sensors with organic transistor active matrixes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2005, 102(35): 12321-12325.
- [11] LENG Y Q, CHEN ZH C, HE X, et al. Collision sensing using force/torque sensor [J]. Journal of Sensors, 2016, 2016(1): 6291216.
- [12] 山东大学. 一种可穿戴外肢体机器人碰撞响应控制方法及系统:202110739718. 2[P]. 2022-12-09. Shandong University. A collision response control method and system for wearable supernumerary robotic limbs: CN202110739718. 2[P]. 2022-12-09.
- [13] 张铁, 陈亿杰, 邹焱飏. 基于外力矩观测器的机器人碰撞检测[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 84-92.
- ZHANG T, CHEN Y J, ZOU Y B. Robot collision detection based on external torque observer[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(3): 84-92.
- [14] 刘德斌, 王旦, 陈柏, 等. 外肢体机器人研究综述[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(2): 251-258.
- LIU D B, WANG D, CHEN B, et al. A survey of supernumerary robotic limbs [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(2): 251-258.
- [15] 齐飞, 张恒, 孙杰, 等. 考虑驱动耦合的绳驱动外肢体机器人运动建模及控制研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 21-34.
- QI F, ZHANG H, SUN J, et al. Modeling and control of cable-driven supernumerary robotic limbs motion considering drive coupling [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 21-34.
- [16] 陈善言, 关永, 施智平, 等. 机器人碰撞检测方法形式化[J]. 软件学报, 2022, 33(6): 2246-2263.
- CHEN SH Y, GUAN Y, SHI ZH P, et al. Formalization of collision detection method for robots [J]. Journal of Software, 2022, 33(6): 2246-2263.
- [17] 雷飞, 刘思宇, 廖峻北, 等. 大负载作用下绳驱连续型机器人静力学建模分析[J]. 机械工程学报, 2024, 60(15): 28-37.
- LEI F, LIU S Y, LIAO J B, et al. Static modeling and analysis of cable-driven continuum robots under large load[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(15): 28-37.
- [18] 戴欢, 曾洪, 张建喜, 等. 基于人体运动干扰建模预测的外肢体机器人补偿控制研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 326-334.
- DAI H, ZENG H, ZHANG J X, et al. Research on compensation control of supernumerary robotic arms based on modeling and prediction of human motion disturbances[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4): 326-334.
- [19] 徐嘉骏, 张添一, 黄恺真, 等. 仿生柔性外肢体机器人的优化设计与实现[J]. 机器人, 2024, 46(2): 147-157.
- XU J J, ZHANG T Y, HUANG K ZH, et al. Optimized design and implementation of a bioinspired soft supernumerary robotic limb[J]. Robot, 2024, 46(2): 147-157.

- [20] 吴灏, 王淇锋, 王其, 等. 基于摩擦扰动补偿的机械臂碰撞检测方法[J]. 机械设计, 2024, 41(9): 101-110.
- WU H, WANG Q F, WANG Q, et al. Method for collision detection of manipulator based on friction disturbance compensation[J]. Journal of Machine Design, 2024, 41(9): 101-110.
- [21] 李瑞涛, 孔全存, 杜中伟, 等. 基于气压感知的柔性碰撞检测皮肤设计[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(9): 76-78, 82.
- LI R T, KONG Q C, DU ZH W, et al. Skin design for flexible collision detection based on air pressure sensing[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(9): 76-78, 82.
- [22] 宁云博, 关明杰, 柳治强, 等. 面向航空发动机的自供电无线振动传感系统研究[J]. 电子测量技术, 2025, 48(2): 115-121.
- NING Y B, GUAN M J, LIU ZH Q, et al. Study of a self-powered wireless vibration sensing system for aeroengines[J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(2): 115-121.
- [23] 李昊业, 张雯, 宋言明, 等. 面向航天器微小碰撞的飞秒光纤光栅冲击检测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 153-159.
- LI H Y, ZHANG W, SONG Y M, et al. Impact detection system of femtosecond fiber bragg grating for spacecraft micro-collisions[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 153-159.

作者简介



齐飞

E-mail: qifei224@cczu.edu.cn

齐飞(通信作者), 2013 年于新乡学院获得学士学位, 2016 年于江南大学获得硕士学位, 2019 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为常州大学副教授, 主要研究方向为绳驱动连续体机器人及柔性外肢体机器人。

Qi Fei received his B.Sc. degree from Xinxiang College in 2013, M.Sc. degree from Jiangnan University in 2016, and Ph.D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2019. He is currently an associate professor at Changzhou University. His main research interests include rope-driven continuum robots and flexible external limb robots.