

混合多策略改进蜣螂算法的空间柔性机械臂 视觉反馈稳态控制系统设计

高 强

(四川工业科技学院 智能制造与车辆工程学院, 四川 德阳 618500)

摘要: 空间柔性机械臂抓握质量扰动, 引起机械臂运行位置出现偏差, 单一控制参数求解算法易陷入局部最优, 影响控制精度; 为此, 提出基于混合多策略改进蜣螂算法的空间柔性机械臂视觉反馈稳态控制系统; 硬件部分设计系统架构、运动控制卡及伺服电机驱动器, 构建高效、稳定且易于扩展的硬件平台; 在控制算法中, 融合视觉传感技术与机械臂反馈控制算法, 通过实时捕获机械臂运动图像并精准提取特征点, 计算出视觉偏差, 以此为反馈信息完成运动状态跟踪结果; 基于跟踪结果设计稳态控制律, 实现稳态控制; 引入了混合多策略改进蜣螂算法, 整定稳态控制增益参数, 动态调整解空间边界, 输出最优全局解, 实现最优稳态控制; 测试结果表明: 运用该系统完成稳态控制处理后, 空间柔性机械臂运动姿态误差保持在 $\pm 0.2^\circ$ 以内, 证明了系统良好的控制性能。

关键词: 空间柔性机械臂; 混合多策略改进蜣螂算法; 视觉反馈; 稳态控制; 参数整定; 姿态跟踪

Design of a Visual Feedback Steady State Control System of Space Flexible Robot Arms Based on Hybrid Multi Strategy Improved Beetle Algorithm

GAO Qiang

(School of Intelligent Manufacturing and Vehicle Engineering,
Sichuan Institute of Industrial Technology, Deyang 618500, China)

Abstract: The grasping quality of the space flexible robotic arm is perturbed, causing a deviation in the operating position of the robotic arm. A algorithm with single control parameters is prone to getting stuck in local optima, which affects control accuracy. Therefore, a visual feedback steady-state control system of spatial flexible robotic arms based on hybrid multi strategy improved beetle algorithm is proposed. Design the hardware architecture, motion control card, and servo motor driver of the system to build an efficient, stable, and easily expand hardware platform. In control algorithms, a visual sensing technology is integrated with feedback control algorithms for robotic arms. By capturing real-time motion images of the robotic arm and accurately extracting feature points, visual deviations are calculated and used as the feedback information to complete the tracking results of motion status. Design a steady-state control law based on tracking results to achieve steady-state control. An improved beetle algorithm with hybrid multi strategy is introduced to set the steady-state control gain parameters, dynamically adjust solution space boundaries, and output the optimal global solution to achieve the optimal steady-state control. The test results show that the system achieves steady-state control processing, the motion attitude error of the space flexible robotic arm remains within $\pm 0.2^\circ$, proving that system has a good control performance.

Keywords: space flexible robotic arm; improved beetle algorithm with hybrid multi strategy; visual feedback; steady-state control; parameter tuning; attitude tracking

0 引言

空间柔性机械臂通常由轻质材料制成, 内部无刚性

骨架, 通过弹性变形实现各种复杂的空间姿态和运动轨迹^[1]。这种设计不仅减轻了机械臂的重量, 降低了能源消耗, 还提高了其在狭小空间中的操作能力和对复杂环

收稿日期:2025-01-06; 修回日期:2025-02-20。

作者简介:高 强(1989-),男,大学本科,讲师。

引用格式:高 强.混合多策略改进蜣螂算法的空间柔性机械臂视觉反馈稳态控制系统设计[J].计算机测量与控制,2025,33(10):127-134.

境的适应能力,这使得该设备逐渐在很多领域得到了应用^[2]。在空间微重力等特殊环境下,由于其结构的柔性和非线性^[3],柔性机械臂表现出严重的振动和变形问题,严重影响了其操作精度和稳定性。因此,开发一种精确的稳态控制系统,对于拓展空间柔性机械臂应用范围具有重要意义。

从现有的研究成果来看,董泽宇等人^[4]提出基于混合现实的控制系统,其主要包括人机交互模块、机械驱动模块和虚拟现实模块,人机交互模块主要负责借助摄像头识别控制指令,机械驱动模块在接收到控制指令后,对其进行解析并发送给运行设备,最后在虚拟现实模块内还原控制后的设备运行情况,以便监控和优化系统控制结果。但该方法对柔性机械臂运动的变形量评估不足,导致运行位置偏差,影响了控制结果精度。焦宏涛等人^[5]提出基于机器视觉的控制系统,利用摄像机在机械臂工作过程中采集大量机器视觉图像,借助 D-H 法对图像进一步分析,推导出机械臂末端运动误差。以误差补偿为目标生成控制指令,在主控制器、电源等模块的共同作用下执行命令,实现对机械臂的有效控制。但图像处理精度不足,导致对机械臂的实际位置和运动状态的判断出现偏差,使得机械臂运动姿态误差较大。徐建明等人^[6]提出基于 CODESYS 平台的控制系统,应用 PLC open 规范和 ARM+CODESYS 架构,开发出一种面向机械臂的运动控制器,考虑机械臂动力学模型以及实时工作需求,生成具体的控制方案。再引入分布式控制思想,发挥预期控制功能。但 CODESYS 平台支持多种硬件设备和控制器,但不同硬件设备之间的兼容性不足,导致位置数据分析结果出现偏差,引起严重的运动姿态误差。Prasad 等人^[7]提出基于李雅普诺夫控制方案的控制技术,以李雅普诺夫控制思想为基础,构造面向机械手的运动控制模型,明确机械手运动误差和空间内障碍物分布后,在满足避障要求的前提下,实现对机械臂运动稳定性的有效控制。但该方法构建的数学模型参数缺乏整定过程,导致模型输出结果波动,进而使控制结果出现姿态误差。

针对当前机械臂控制系统的应用局限性,设计出基于混合多策略改进蜣螂算法的空间柔性机械臂视觉反馈稳态控制系统。利用视觉传感器获取机械臂末端执行器的位置和姿态信息,结合混合视觉伺服控制思想建立稳态控制策略。再将混合多策略改进蜣螂算法引入到控制过程中,搜索最优的控制参数,实现对机械臂的精确控制。

1 硬件设计

1.1 硬件系统架构设计

空间柔性机械臂控制系统硬件总体设计旨在构建一个高效、稳定且易于扩展的硬件平台,以支持混合多策

略改进蜣螂算法的实现,并满足视觉反馈稳态控制的需求。

上位机作为整个控制系统的核心,上位机负责运行混合多策略改进蜣螂算法,并根据算法输出向运动控制卡发送控制指令。同时,上位机还负责监控系统的运行状态,确保系统能够稳定运行。

运动控制卡作为连接上位机和伺服电机驱动器的桥梁,负责接收上位机发送的控制指令^[8],并将其转换为伺服电机可以理解的信号,从而驱动机械臂进行精确的运动。伺服电机驱动器则负责将运动控制卡的信号放大,驱动伺服电机实现机械臂的精确控制。除了核心组件外,硬件系统还整合了其他必要的辅助硬件。这些辅助硬件包括传感器、编码器、电源等。视觉传感器用于实时监测机械臂的运动状态和周围环境,为混合多策略改进蜣螂算法提供必要的数据支持^[9]。编码器则用于精确测量机械臂的关节角度和位置,确保运动控制的准确性。电源则为整个硬件系统提供稳定的电力供应,确保系统的稳定运行。

在硬件系统架构设计中,还充分考虑了系统的扩展性和可维护性。通过采用模块化设计,硬件系统的各个组件可以方便地进行更换和升级,以适应不同的应用场景和控制需求。同时,硬件系统还采用了标准化的接口和协议,便于与其他设备和系统进行集成和互联。

硬件系统架构设计如图 1 所示。

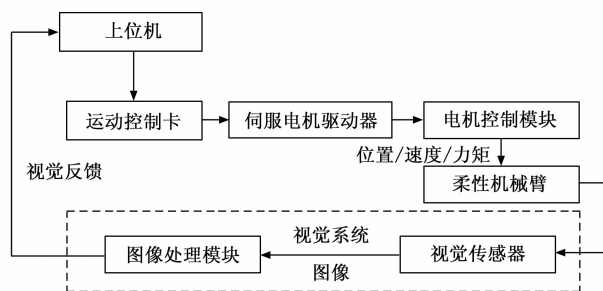


图 1 硬件系统架构设计示意图

1.2 运动控制卡

运动控制卡由 FPGA 高性能处理器、存储器、输入输出接口和传感器接口等核心组件构成。处理器负责执行实时控制算法,存储器用于存储程序代码和数据,输入输出接口用于与外部设备进行通信,传感器接口用于获取系统的反馈信息。运动控制卡通过传感器接口采集系统的反馈信息,利用编码器接口获取电机的精确位置信息,或者通过模拟输入接口读取视觉传感器反馈的测量值。运动控制卡运行预置的控制算法,利用所采集的系统反馈信息,经过计算后得出控制指令。控制指令通过输出接口被发送给驱动器,驱动器再据此对电机或其他执行器进行相应的运动控制,从而实现整个系统的精确、稳定运作。

为了确保运动控制卡的控制信息传输具有高效性，本文设计运动控制卡的接口采用基卡和接口卡相结合的方式^[10]，运动控制卡原理如图 2 所示。

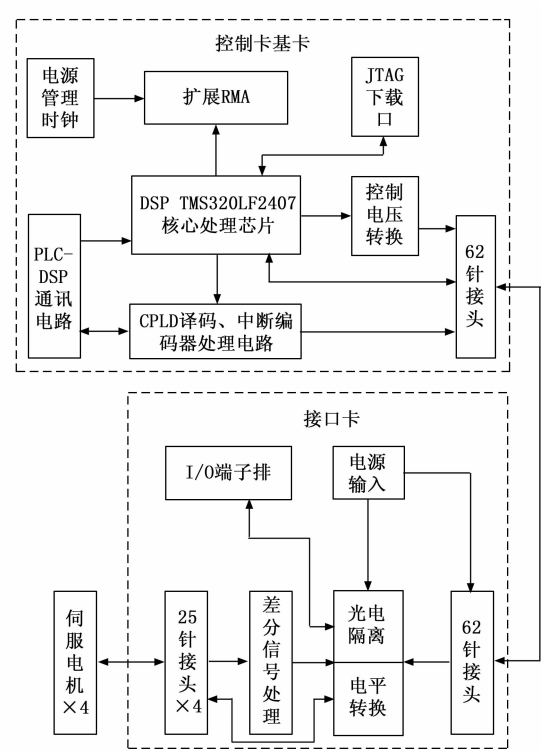


图 2 运动控制卡原理图

在运动控制卡种，设计的基卡集成 DSP 辅助电路、存储器扩展电路等多种核心组件，提升控制卡的运算速度和数据处理能力，并增强其运行稳定性和可靠性。在运动控制卡中，为了确保基卡与接口卡之间的紧密且高效的连接，特别布局 62 针接头，从而实现控制信号的稳定、无损传输^[11]。

在接口卡内部，布置了光电隔离电路和电平转换电路，对伺服使能、报警清除等关键输出信号进行精细处理。为了进一步确保控制信号的绝对准确性和稳定性，设置部分经过处理的信号通过 25 针接头直接传递给伺服电机，另一部分信号连接到 I/O 端子排进行输出，由此隔离外部干扰信号。

1.3 伺服电机驱动器

空间柔性机械臂视觉反馈稳态控制系统中，在无刷直流电机驱动器不仅仅是简单的电动驱动装置，还需要具有接收计算机指令、反馈多种运行数据等功能，并能与其他系统组件协同工作的智能节点^[12]。因此，在伺服电机驱动器硬件设计过程中，采用了 Freescale 的 16 位 MC56F83xx 系列数字信号控制器芯片作为控制核心，开发出图 2 所示的伺服电机驱动器结构。这款芯片具备高达 60 MHz 的总线时钟频率，内置丰富的存储资源（包括 32 KB 的编程 Flash、4 kB 的编程 RAM 等）^[13]，同

时集成了正交解码模块、CAN 控制器、四通道定时器等。

如图 3 所示，在设计的伺服电机驱动器中，考虑机械臂的控制需要远距离通信以及多主工作方式，采用 CAN 总线作为整个系统的核心通信手段^[14]。为了进一步提升系统的通用性和兼容性，选用开源的 CANOpen 协议作为 CAN 总线上的应用层通信协议，可以通过 CAN 总线同时高效、精准地控制多个无刷直流电机^[15]。由此，柔性机械臂的控制精度、响应速度和灵活性均得到了显著提升，为执行复杂任务时的精准操作提供了坚实而有力的保障。

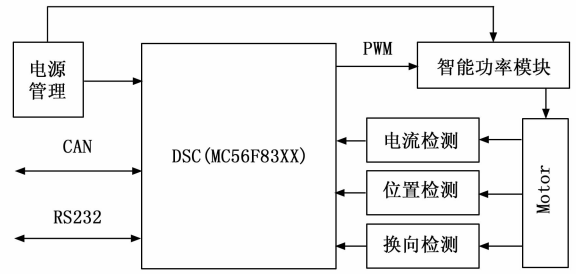


图 3 伺服电机驱动器结构

2 机械臂视觉反馈稳态控制算法

在空间柔性机械臂的运动视觉反馈跟踪控制中，本节融合了视觉传感技术与机械臂反馈控制算法，实现了精确控制。通过视觉传感器实时捕获机械臂运动图像，并运用光流算法及 Shi-Tomasi 角点检测算法精准提取特征点，进而通过对比实际与期望像素坐标，计算出图像视觉特征误差^[16]。此外，利用 4 个邻近平面特征点的透视投影分析，能够精确求解出世界坐标系下的参考点坐标，从而得出位置视觉误差，实现了从图像空间到物理空间的精确映射。

在稳态控制算法上，依据视觉反馈误差跟踪结果，分别针对特征误差和位置误差设计了相应的稳态控制律，确保了机械臂在复杂动态环境中的精确轨迹跟踪。并且，为进一步优化控制性能，引入了混合多策略改进蛭螂算法进行控制参数的整定。通过混沌映射策略增加种群多样性，结合人工水母搜索算法制定主动运动策略，不仅显著提升了全局搜索与局部开发能力，还能根据个体表现动态调整解空间，有效避免了算法陷入局部最优的困境。最终，经过不断迭代优化得出的控制参数，被精准地应用于视觉反馈稳态控制结构中，实现了对空间柔性机械臂运动的高精度、高效率控制。

由此，实现机械臂视觉反馈稳态控制的整体结构如图 4 所示。

2.1 机械臂运动视觉反馈跟踪

借助于系统硬件中的视觉传感器设备，建立一个空

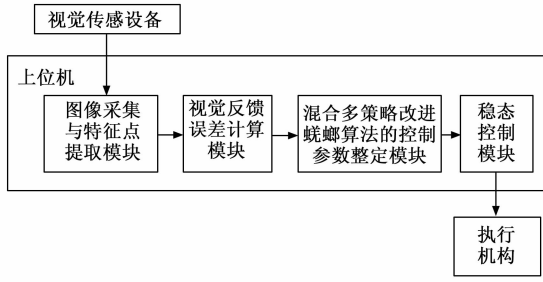


图 4 机械臂视觉反馈稳态控制结构示意图

间柔性机械臂运动反馈跟踪模块^[17]，通过不断采集图像，观察特征点位置和机械臂末端位置变化，获取基于图像视觉和位置视觉的运动误差^[18]，以此来指导稳态控制工作的开展。

针对视觉传感器拍摄的现场图像进行分析，假设其连续时刻采集的图像像素点亮度不发生改变^[19]，如公式 (1) 所示：

$$\tau(a+c, b+d, t+h) = \tau(a, b, t) \quad (1)$$

式中， τ 为像素点灰度值， t 为视觉传感器采集图像时刻， (a, b) 为像素点坐标， h 为图像采样间隔时间， (c, d) 为像素点的光流。

以公式 (5) 给出的条件为基础，引入光流算法对图像中的角点进行检测，从而提取出图像内特征点。给定一个固定尺寸的移动窗口，将该窗口作用在图像上，其灰度值变化可以表示为：

$$\tau(\Delta a, \Delta b) = \sum_{a, b \in N} \exp\left(-\frac{a^2 + b^2}{2\kappa^2}\right) \cdot [\tau(a + \Delta a, b + \Delta b) - \tau(a, b)]^2 \quad (2)$$

式中， $(\Delta a, \Delta b)$ 为移动窗口中心点坐标， N 为视觉图像中像素点总数量， κ 为移动窗口尺寸参数， $\exp$ 为数论函数。

通过公式 (3) 对公式 (2) 进行泰勒展开运算，去除高阶项的同时，求出极大值，即可找到图像中角点位置：

$$\tau(\Delta a, \Delta b) \cong [\Delta a, \Delta b] \exp\left(-\frac{a^2 + b^2}{2\kappa^2}\right) \otimes \begin{bmatrix} I_1^2 & I_1 I_2 \\ I_1 I_2 & I_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta a \\ \Delta b \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中， I_1, I_2 为两个方向上的梯度值， $\otimes$ 为张量积运算。

根据 Shi-Tomasi 角点检测算法给出的角点跟踪要求^[20]，根据设置的判断阈值 λ ，对比极大值求解结果和给定阈值，即可判断当前角点是否属于特征点。判定公式如下：

$$\begin{cases} \tau(\Delta a, \Delta b) \geq \lambda, & 1 \\ \tau(\Delta a, \Delta b) < \lambda, & 0 \end{cases} \quad (4)$$

阈值 λ 在 Shi-Tomasi 角点检测算法中起到关键作用，它决定了哪些角点被认定为特征点。阈值的设定需

基于图像的具体内容和特征点的需求。较高的阈值会导致较少的特征点被检测出来，这些特征点具有较强的稳定性和抗干扰能力；而较低的阈值则会增加特征点的数量，但可能包含一些稳定性较差的点。因此，应根据机械臂运动跟踪的精度要求和图像质量，通过多次调试，设定一个合理的阈值，以确保特征点的有效性和准确性。

如果公式 (4) 输出结果为 1，代表该点属于特征点，反之则代表当前点不属于特征点。通过上述操作找到所有特征点后，获取当前图像特征点像素坐标和期望像素坐标，可以推算出空间柔性机械臂运动时产生的图像视觉特征误差为：

$$\mathbf{E}_j = [a_1 - a'_1, b_1 - b'_1, a_2 - a'_2, b_2 - b'_2, \dots, a_v - a'_v, b_v - b'_v] \quad (5)$$

式中， j 为图像编号， $\mathbf{E}$ 为特征误差， (a', b') 为特征点期望像素坐标， v 为特征点数量。

在图像内选择 4 个邻近的平面特征点，获取其在图像坐标系中的位置，再针对其中任意一个特征点展开透视投影分析^[21]，找到该点对应的空间参考点，通过参数加权方式求出世界坐标系下参考点坐标：

$$\zeta_q = \sum_{r=1}^4 w_{qr}(a_r, b_r), \sum_{r=1}^4 w_{qr} = 1 \quad (6)$$

式中， ζ 为世界坐标系下参考点坐标， q 为空间柔性机械臂运动参考点编号， r 为特征点编号， w 为权值参数。

基于参考点当前坐标和期望坐标，可以求出机械臂运动位置视觉误差：

$$\hat{\mathbf{E}} = (\zeta_1 - \zeta'_2, \dots, \zeta_q - \zeta'_q, \dots, \zeta_M - \zeta'_M) \quad (7)$$

式中， $\hat{\mathbf{E}}$ 为机械臂运动位置视觉误差， ζ' 为期望位置， M 为空间参考点数量。

2.2 机械臂视觉反馈稳态控制

以机械臂运动视觉反馈误差跟踪结果为依据，建立图 5 所示的稳态控制结构，生成稳态控制律。

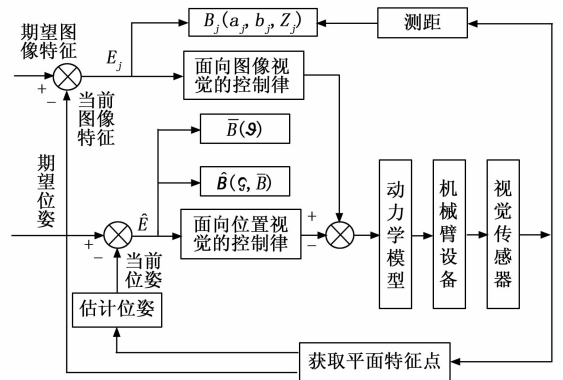


图 5 视觉反馈稳态控制结构框图

图 5 中， (a_j, b_j, Z_j) 分别为相机坐标系内特征点坐标， $B, \bar{B}, \hat{B}$ 分别为基于图像误差、基于旋转角、基

于位置误差的图像雅可比矩阵, ϑ 为旋转角。

如图 4 所示, 面向特征误差和位置误差两项参数, 需要分别生成一个稳态控制律^[22], 如公式 (8)(9) 所示:

$$V^j = -\alpha_0 T B_j \quad (8)$$

$$\hat{V} = -\alpha_1 \hat{B} \hat{E} \quad (9)$$

式中, α_0, α_1 为大于 0 的增益参数, V 为面向特征误差的稳态控制律, T 为坐标变换矩阵, $\hat{V}$ 为面向位置误差的稳态控制律。

通过运动控制卡和伺服电机驱动器, 实施视觉反馈稳态控制策略, 即可保证系统顺利运行, 发挥稳态控制功能。

2.3 基于混合多策略改进蜣螂算法控制参数整定

依托于视觉反馈稳态控制结构, 对空间柔性机械臂工作的稳态性能进行控制调整时, α_0, α_1 这两项增益参数取值是可以发生变化的, 为了提升系统稳态控制效果, 在软件设计的最后阶段, 引入混合多策略改进蜣螂算法, 以空间柔性机械臂运动稳定性最大、姿态误差最小为目标, 对 α_0, α_1 进行整定。引入混沌映射策略用于初始化蜣螂的初始种群, 使得初始种群的总体分布更加均匀, 增加了种群的多样性, 有助于算法在解空间内更广泛地探索, 降低了算法落入局部最优解的风险。为了进一步提升算法的全局搜索与局部开发能力, 将人工水母搜索算法与蜣螂算法相结合, 为蜣螂觅食过程制定主动运动策略, 在复杂的搜索空间中快速收敛到最优位置, 解决了蜣螂算法在处理复杂、非凸优化问题时可能陷入循环搜索, 导致输出结果耗时大幅增加的问题^[23]。在算法迭代过程中, 根据种群个体的表现动态调整解空间的上下边界。这种机制使得算法能够更有效地利用有限的搜索空间, 提高搜索效率, 避免了算法在固定边界内搜索时可能错过最优解的问题。为了彻底防止算法陷入局部最优, 在觅食阶段, 根据个体的适应度值采用不同的更新策略, 对蜣螂位置调整行为进行了革新, 使得算法能够更灵活地调整搜索方向, 动态地调整解空间的边界, 并改变最优全局解, 确保算法在迭代过程中始终保持全局搜索的优势, 从而找到更优的控制参数。由此, 构建了一个混合多策略的改进蜣螂算法框架, 将混沌映射、人工水母搜索算法等策略有机结合起来, 形成一个高效、鲁棒的优化算法。

以空间柔性机械臂运动稳定性最大、姿态误差最小为目标的物理表达式, 即目标函数表达式如下:

$$\begin{cases} F_1 = \int_{t=0}^T \{ \tau^2[p(t)] + \tau^2[\dot{p}'(t)] + \tau^2[p''(t)] \} dt \\ F_2 = \int_{t=0}^T \| \theta(t) - \theta_m \| dt \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\tau^2(\cdot)$ 为方差运算, $p(t), \dot{p}'(t), p''(t)$ 分别为机械臂末端的位置向量、速度向量和加速度向量, $\|\cdot\|$ 为向量范数, $\theta(t), \theta_m$ 分别为机械臂末端的姿态角向量和目标姿态角向量, $t = 0, 1, \dots, T$ 表示时刻。

将每种可行的稳态控制增益参数取值结果, 看作一个蜣螂个体, 统计所有稳态控制增益参数可行解, 即可得到初始种群, 采用公式 (10) 给出的混沌映射策略对初始种群进行优化, 确保种群分布均匀^[24]:

$$\begin{cases} X_{\omega+1} = \Gamma \left[X_{\omega} + g - \frac{g'}{2} \sin(2X_{\omega}), 1 \right] \\ X_{\omega+1} = L + (U - L) X_{\omega+1} \end{cases} \quad (11)$$

式中, ω 为蜣螂数量, X 为解空间内稳态控制增益参数解对应的蜣螂个体所处位置, Γ 为求余函数, g, g' 为常数, $\sin$ 为正弦函数, U, L 为解空间的上限和下限。

混沌映射结束后, 面向分布更加均匀的种群个体, 模拟蜣螂滚球和繁殖过程, 更新个体位置和解空间上下边界:

$$X_{\omega}^{\sigma+1} = X_{\omega}^{\sigma} + \beta \times \varphi \times X_{\omega}^{\sigma-1} + g'' | X_{\omega}^{\sigma} - \hat{X} | \quad (12)$$

$$\begin{cases} U' = \max \{ \bar{X} [1 - (1 - \frac{\sigma'}{\sigma})], U \} \\ L' = \max \{ \bar{X} [1 + (1 - \frac{\sigma'}{\sigma})], L \} \end{cases} \quad (13)$$

式中, σ 为代表稳态控制增益参数的蜣螂个体位置更新次数, β 为判断蜣螂前进方向是否存在偏差的决策函数, φ 为偏转系数, g'' 为常数, $\hat{X}$ 为解空间内最差个体位置, U', L' 为优化后解空间上限和下限, $\max$ 为最大值取值函数, $\bar{X}$ 为最优个体位置, σ' 为最大迭代次数。

进入蜣螂觅食阶段后, 考虑机械臂的空间复杂性, 在个体位置求解时, 易产生非凸优化问题, 导致结果搜索陷入循环, 输出结果的耗时大幅增加。人工水母搜索算法中引入了时间控制机制和群体内部的交互作用, 通过模拟水母的觅食行为, 能够在复杂的搜索空间中, 快速收敛到最优位置, 从而在有限的迭代次数内找到最优解或近似最优解。为此, 提出基于人工水母搜索算法的个体位置更新模式, 如图 6 所示。

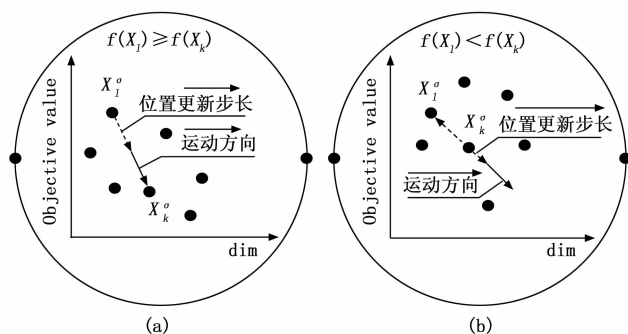


图 6 主动策略引导下的觅食蜣螂位置更新示意图

图 6 中, f 为适应度, l, k 为两个觅食蜣螂。每一个

觅食蜣螂都具有适应度,代表其所处位置食物数量,当随机选定的蜣螂适应度大于等于当前蜣螂,采用图 6 (a) 所示的更新策略,反之则采用图 6 (b) 给出的更新策略:

$$X_{\omega}^{\sigma+1} = \begin{cases} S[X_{\omega}^{\sigma} + v_1(X_{\omega}^{\sigma} - L') + v_2(X_{\omega}^{\sigma} - U')] & f(X_l) > f(X_k) \\ X_{\omega}^{\sigma} + v_1(X_{\omega}^{\sigma} - L') + v_2(X_{\omega}^{\sigma} - U') & f(X_l) \leq f(X_k) \end{cases}$$

(14)

式中, S 为更新方向, v_1 、 v_2 为时间控制参数。

通过上述操作,不断更新蜣螂种群个体,也就是不断改进稳态控制增益参数可行解,在每次种群迭代结束后,都会根据适应度值从种群内筛选出一个最优个体^[25],代表本次搜索出的最优稳态控制增益参数,当混合多策略改进蜣螂算法迭代次数达到最大迭代次数要求,停止继续迭代计算,得到控制参数最终整定结果,将其代入到视觉反馈稳态控制结构中,确保系统发挥优越的控制效果。

由此,混合多策略改进蜣螂算法控制参数整定的流程如图 7 所示。

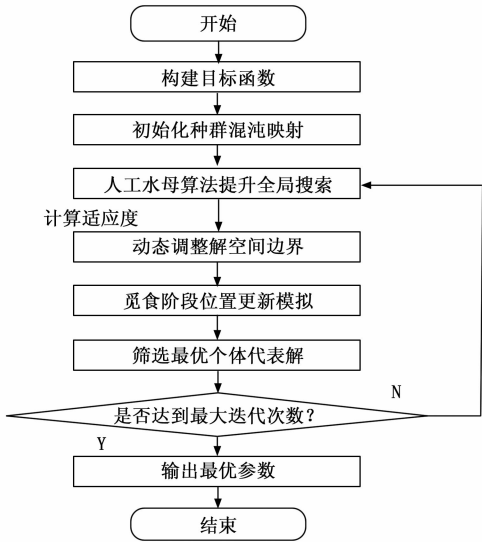


图 7 混合多策略改进蜣螂算法控制参数整定流程图

3 实验结果与分析

3.1 搭建测试环境

应用混合多策略改进蜣螂算法,完成面向空间柔性机械臂的视觉反馈问题控制系统设计后,为了观察该系统的有效性,针对其展开测试分析。在室内环境中,连接空间柔性机械臂、视觉传感器、控制器和伺服驱动电机,搭建出测试平台。该平台中,机械臂是系统测试所针对的主要对象,为了加强实验结果的说服力,参考常规空间柔性机械臂工作要求,设置测试平台上机械臂关节动力学参数如表 1 所示。

表 1 机械臂关节动力学参数

参数名称	数值
电机力矩常数	0.196
电机等效转动惯量	$7 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2$
减速比	1 817
关节间隙	0.05 deg
最大静摩擦力	0.05 Nm
库伦摩擦系数	0.000 2
关节半径	0.1 m
Stribeck 摩擦指数	2
关节及负载等效转动惯量	100 kg/m^2

将一台计算机接入到系统测试平台中,结合软件设计内容和模块化、层次化思想,完成系统软件结构开发,最终在交互界面呈现出状态监视、图像监视、处理后图像窗口、阈值门限、特征点轨迹、机械臂姿态等多个可视化窗口。

3.2 算法运行参数设置

混合多策略改进蜣螂算法中,蜣螂算法的蜣螂数量为 500,最大迭代次数为 200,解空间上下限范围为 $[0, 10]$ 。混沌映射控制常数为 4,映射序列长度等同蜣螂数量,即设为 500,缩放因子为 10,平移因子为 0。人工水母搜索算法的水母种群数量为 50,最大迭代次数为 200,吸引力控制因子为 0.01,分布系数为 3,运动系数为 0.1,时间控制常数为 0.02。

在上述参数条件下,运行基于混合多策略改进蜣螂算法的控制系统,对运动过程中的空间柔性机械臂不断进行视觉反馈稳态控制,以此来反映系统应用效果。

3.3 系统稳态控制输出结果

系统稳态控制测试过程中,利用改进蜣螂算法实现稳态控制增益参数优化,是一项重要内容。迭代求解过程中,混沌映射思想的加入,使得蜣螂种群分布更加均匀,如图 8 所示。

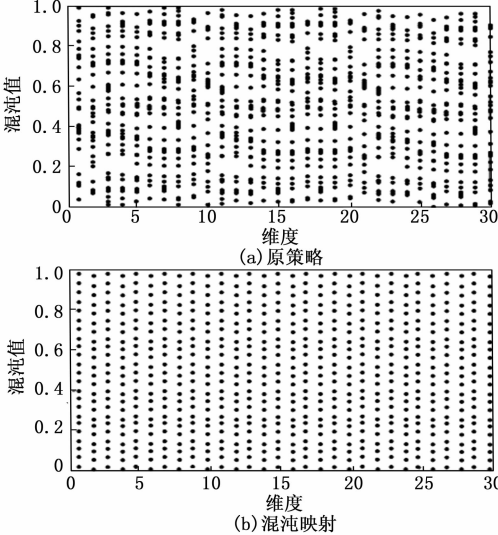


图 8 原始种群分布与混沌映射分布

如图 8 所示，原始蜚螂种群内个体分布呈现出均匀的特点，部分区域个体数量过多，另一部分区域个体数量稀少。而混沌映射后，各区域种群数量极为接近，这极大丰富了种群多样性。

本文提出的混合多策略改进蜚螂算法中进行了多步改进，为了体现每步改进的性能，进行消融实验。以传统蜚螂算法（无改进）、单策略改进蜚螂算法（基于混沌映射改进的蜚螂算法）以及混合多策略改进蜚螂算法（基于混沌映射和人工水母搜索算法改进的蜚螂算法）为不同测试组别，进行迭代寻优计算，收敛曲线如图 9 所示。

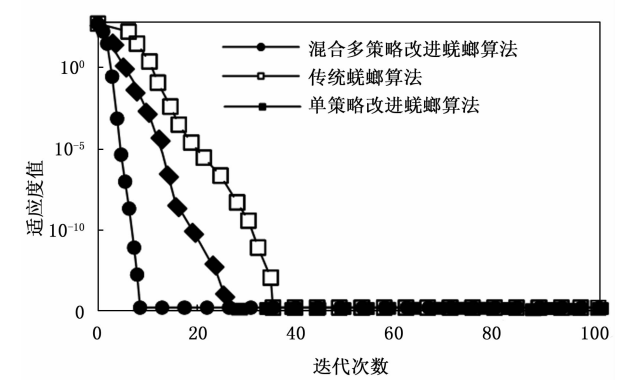


图 9 算法收敛结果

如图 9 所示，混合多策略改进蜚螂算法经过 10 次迭代就满足了收敛要求，单策略改进蜚螂算法相比传统蜚螂算法有所改进，但收敛速度仍不足，而通过人工水母搜索算法进一步改进，实现了较快的收敛速度。由此，通过混合多策略改进蜚螂算法对机械臂视觉反馈稳态控制参数进行调整，最终确定两项控制增益参数取值均为 0.5。

将整定后的参数重新输入控制系统中，以从机械臂末端的 3 个关节为例，其稳态控制后输出力矩如图 10 所示。

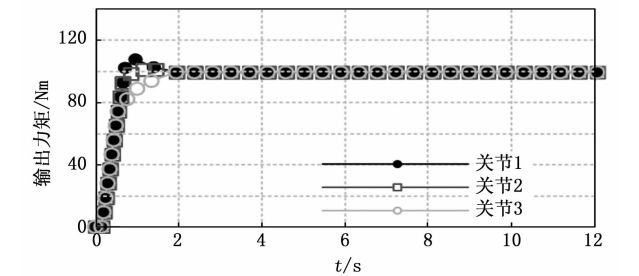


图 10 系统控制输出结果

如图 10 所示，在系统控制时间达到 2 s 后，各关节输出力矩开始达到稳定状态，均处于 100 Nm，后续随着机械臂运动时间的增长，输出力矩未发生较大变化，这一输出结果证明了系统稳态控制功能满足了预期要求。

采用文献 [4] 方法、文献 [5] 方法、传统蜚螂算法和本文设计的混合多策略改进蜚螂算法进行对比，对稳态控制过程中的空间柔性机械臂运动状态进行观察，以任意 4 个图像特征点为例，其表现出的移动轨迹如图 11 所示。

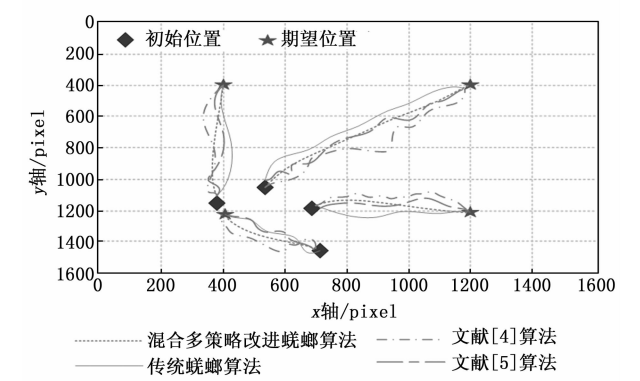


图 11 系统稳态控制后图像特征点移动轨迹

从图 11 可以看出，机械臂运动过程中展开系统稳态控制处理，视觉反馈图像特征点实现了从初始位置向期望位置的有效移动，并能够以较快速度收敛到期望位置，且控制的机械臂的路径平滑，几乎没有抖振。而其他方法的机械臂控制轨迹不仅路径较长，且行进过程中存在一定的抖振，难以稳态作业。这表明当前控制系统的应用能够满足机械臂工作要求。

3.4 系统控制性能分析

稳态控制系统的提出，主要是为了保障空间柔性机械臂运动的稳定性，提升机械臂工作质量。因此，在系统测试过程中，针对稳态控制中的机械臂运动姿态进行观察，从抓取俯仰角、抓取偏转角、侧向偏转角三方面入手，获取运动姿态误差数据，并绘制出图 12。通过机械臂运动姿态误差，反映稳态控制系统应用性能。

如图 12 所示，应用新设计系统对空间柔性机械臂进行稳态控制后，机械臂所表现出的运动姿态误差在 $\pm 0.2^\circ$ 之间，这主要是因为改进蜚螂算法的应用优化了稳态控制参数，使得系统最终控制结果兼顾了全局性要求。视觉反馈稳态控制系统的应用，有利于提升空间柔性机械臂的工作稳定性，使得设备应用范围进一步推广。

4 结束语

通过设计面向空间柔性机械臂的视觉反馈稳态控制系统，深度整合硬件与软件，有效提升了机械臂在复杂环境下的控制精度与响应速度。硬件设计上，挑选运动控制卡及伺服电机驱动器，确保系统数据采集的准确性与控制的实时性。软件层面，引入视觉反馈跟踪模块，实现对机械臂运动状态的精准捕捉与误差分析。在控制策略上，提出基于混合多策略改进蜚螂算法的稳态控制参数整定方法，提升稳态控制的性能。通过混沌映射与

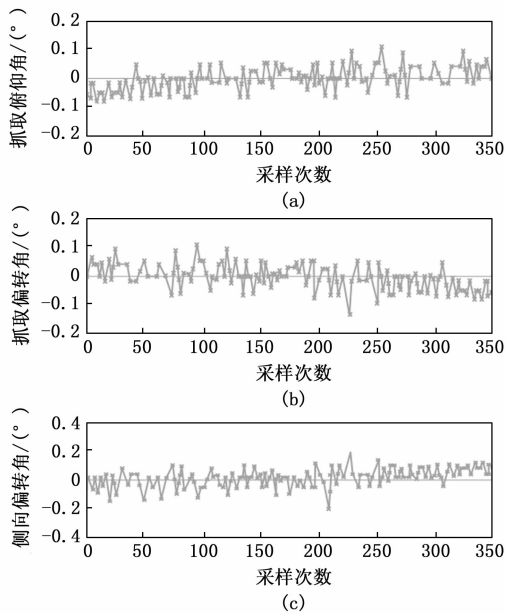


图 12 系统稳态控制后机械臂运动姿态误差统计

人工水母搜索算法的融合，避免局部最优解的问题，实现对稳态控制增益参数的快速且准确的优化。测试结果表明，该系统在控制时间达到 2 s 后，各关节输出力矩即趋于稳定，且机械臂的运动姿态误差被严格控制在 $\pm 0.2^\circ$ 之间，充分证明了系统的稳态控制性能与实用性。由此，本次研究为空间柔性机械臂的精确控制与广泛应用奠定坚实的基础，同时也为相关领域的研究与发展提供了新的思路与参考。

参考文献:

- [1] 程佳, 张国玲, 徐鹏跃, 等. 基于输入受限的不确定机械臂的自适应模糊动态面控制 [J]. 机械设计, 2024, 41 (11): 130-135.
- [2] 潘志文, 郭昌鸿, 贾睿亨, 等. 水下液压机械臂主被动柔顺控制系统设计与验证 [J]. 液压与气动, 2024, 48 (10): 65-74.
- [3] 董元宝, 刘加朋, 于金鹏, 等. 考虑输入死区的柔性机械臂随机系统指令滤波模糊控制 [J]. 系统科学与数学, 2024, 44 (10): 2881-2894.
- [4] 董泽宇, 刘政, 李勇, 等. 基于混合现实的可移动机械臂操作控制系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61 (4): 281-289.
- [5] 焦宏涛, 赵嵩. 机器视觉的伺服机械臂运动平稳性控制系统 [J]. 机械设计与研究, 2022, 38 (2): 71-74.
- [6] 徐建明, 陈显汉. 基于 CODESYS 平台的移动机械臂运动控制系统设计 [J]. 浙江工业大学学报, 2024, 52 (3): 237-247.
- [7] PRASAD A, SHARMA B, VANUALAILAI J, et al. Motion control of an articulated mobile manipulator in 3D using the Lyapunov-based control scheme [J]. International Journal of Control, 2022, 95 (9): 2581-2595.
- [8] 常太群, 赵林. 时变输出约束机械臂系统渐近跟踪控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024 (1): 72-76.
- [9] 韩团军, 张晶, 黄朝军, 等. 基于 sEMG 信号和 BPNN 算法的机械臂控制系统设计 [J]. 机床与液压, 2023, 51 (19): 106-111.
- [10] 李小彭, 周赛男, 尹猛, 等. 双柔性机械臂伺服系统 PI 控制策略 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2023, 44 (5): 642-650.
- [11] 杨金玉. 基于 PLC 技术的采摘机械臂气动控制与应用 [J]. 农机化研究, 2023, 45 (12): 230-234.
- [12] 马琰. 基于计算机视觉的采摘机械臂控制系统设计 [J]. 农机化研究, 2024, 46 (12): 208-212.
- [13] 王军晓, 闫小东, 徐建明. 基于扰动和摩擦补偿的柔性机械臂系统非奇异快速终端滑模控制 [J]. 控制理论与应用, 2023, 40 (7): 1199-1207.
- [14] 杨鹏民. 基于嵌入式 Linux 与深度视觉的井下多轴机械臂系统设计 [J]. 煤炭工程, 2022, 54 (12): 90-96.
- [15] 顾振宇, 李斌. 柔性机械臂系统双时标模型的 H_∞ 鲁棒控制 [J]. 机械设计与制造, 2023 (3): 58-62.
- [16] 唐晓刚, 杨广雨, 邹浩, 等. 面向机械臂的永磁同步电机 RBF 网络磁场矢量控制系统 [J]. 北京理工大学学报, 2022, 42 (10): 1089-1096.
- [17] 翟文正. 基于 Speedgoat 的 dVRK 机械臂控制系统开发 [J]. 机床与液压, 2022, 50 (14): 91-95.
- [18] 尚东阳, 李小彭, 尹猛, 等. 采用干扰补偿模糊整定的双柔性机械臂抑振策略 [J]. 振动工程学报, 2024, 37 (1): 1-10.
- [19] 陈晓彤, 祁文哲, 孟建军, 等. 一种改进差分进化算法的单关节机械臂控制方法 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022 (7): 38-41.
- [20] 邓欣, 肖立峰, 杨鹏飞, 等. 融合运动想象脑电与眼电信号的机械臂控制系统开发 [J]. 智能系统学报, 2022, 17 (6): 1163-1172.
- [21] 赵林, 徐志国. 不确定机械臂系统的自适应命令滤波反步渐近跟踪控制 [J]. 控制与决策, 2023, 38 (9): 2701-2706.
- [22] 史国庆, 程嘉毅, 张建东, 等. 基于反馈线性化的广义预测控制机械臂轨迹跟踪算法 [J]. 西北工业大学学报, 2024, 42 (2): 368-376.
- [23] 李星星. 基于隶属函数的多机械臂系统协调控制方法 [J]. 制造业自动化, 2022, 44 (2): 179-182.
- [24] 陈玲玲, 陈鹏飞, 谢良, 等. 增强现实场景下基于稳态视觉诱发电位的机械臂控制系统 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44 (2): 496-506.
- [25] 丁亚琼, 贾寒光, 万凯. 基于自适应机器学习的视觉机械臂控制方法 [J]. 华南师范大学学报 (自然科学版), 2024, 56 (3): 50-57.