

# 基于细菌觅食算法的嵌入式机械臂角度控制器设计

杜晓岚<sup>1</sup>, 朱梦楠<sup>2</sup>

(1. 陕西工业职业技术学院 电气工程学院, 陕西 咸阳 712000;  
2. 陕西工业职业技术学院 教务处, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:** 进行机械臂角度控制器设计过程中, 为提高机器人机械臂灵活性, 降低关节角度控制误差, 设计一种细菌觅食算法的嵌入式机械臂角度控制器; 首先, 构建机械臂动力学模型以获取机械臂的柔性特征及其关节位置, 根据获取的信息确定角度控制器的硬件逻辑结构和算法; 然后, 使用 ARM 微处理器嵌入式操作系统, 设计包含移动控制终端和机械臂控制端的控制器硬件结构; 最后, 采用细菌觅食算法优化控制器参数, 并实现代码完成机器人机械臂角度的精准跟踪控制; 实验结果表明: 所提方法的位姿跟踪精度高达 99%、物体偏移距离在 0~0.2 mm 之间, 控制运行时间在 0.33~0.78 s 之间, 表明所提方法的角度控制误差小、稳定性强, 能够保证机械臂关节角度无超调, 具有极高的机器工程应用价值。

**关键词:** 嵌入式系统; 微处理器; 机械臂动力学模型; 细菌觅食算法

## Design of Embedded Robotic Arm Angle Controller Based on Bacterial Foraging Algorithm

DU Xiaolan<sup>1</sup>, ZHU Mengnan<sup>2</sup>

(1. School of Electric Engineering, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China;  
2. Academic Affairs Office, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China)

**Abstract:** During designing robotic arm angle controllers, in order to improve the flexibility of robotic arms, and reduce the control errors of robotic arm joint angle, an embedded robotic arm angle controller based on bacterial foraging algorithm is designed. Firstly, this paper construct the dynamic model of the robotic arm to obtain the flexible features and joint positions of the robotic arm, and determines the hardware logic structure and algorithm of the angle controller according to the obtained information. Then, the ARM microprocessor embedded operating system is used to design the controller hardware structure that includes the mobile control terminal and manipulator control terminal. Finally, the bacterial foraging algorithm is used to optimize the controller parameters, implement the controller code, and accurately track and control the angle of the robotic arm. The experimental results show that the pose tracking accuracy of the proposed method is up to 99%, the object offset distance is within 0.2 mm, and the control running time is between 0.33 s and 0.78 s. It indicates that the proposed method has small angle control errors and strong stability, and it can ensure that the joint angle of the robotic arm is not overshoot, which has a high engineering application value.

**Keywords:** embedded system; microprocessor; dynamic model of robotic arm; bacterial foraging algorithm

## 0 引言

随着我国科技不断发展, 机械臂作为众多高新科技的结合产物, 越来越广泛地应用于人们的日常生活中, 对于机械臂的自动化控制需求也日益增加。机械臂角度控制器的设计能够实现机械臂的自主操作和精确定位, 提高生产效率和质量。许多应用领域对于机械臂的精准性要求很高, 例如医疗手术中的精细操作。机械臂角度控制器的设计需要考虑如何准确控制机械臂关节的角度, 以达到所需的精度和稳定性。同时机械臂在工作过程中需要与人类或其他物体进行交互, 因此安全性是一个重要考虑因素。机械臂角度控制器的设计需要综合考虑机械臂运动的速度、力量

和力矩等参数, 以确保机械臂在操作过程中不会对人员或环境造成伤害。但是由于传统的机械臂控制器主要是按键式, 由人主观判断进行程序控制, 导致机械臂控制器存在一定限制性, 不能精准地完成规定动作, 且角度误差较大。因此, 设计一种机械臂角度控制器是当下机器科技行业的热点研究内容之一。

现阶段, 相关学者提出了一些机械臂设计方案, 如: 张隆宇等人<sup>[1]</sup>设计了基于 PLC 的三轴机械臂控制系统, 在空间轨迹控制方面, 利用工控计算机将位置数据传送到可编程控制器中, 控制 PLC 的脉冲频率, 以达到精确位移目标并实现对三轴机械臂系统轨迹的控制。谭丹丹<sup>[2]</sup>基于自适应阻抗方法, 对双机械臂进行控制。首先建立阻抗模

收稿日期: 2023-06-25; 修回日期: 2023-07-28。

基金项目: 2021 年度陕西省高等职业教育教学改革重点研究项目(21ZZ001); 2023 年度陕西高等职业教育教学改革研究重点项目(23GZ005); 2024 年度陕西省职业技术教育学会职业教育教学改革研究课题(2024SZX014)。

作者简介: 杜晓岚(1982-), 女, 硕士, 副教授。

引用格式: 杜晓岚, 朱梦楠. 基于细菌觅食算法的嵌入式机械臂角度控制器设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 133-138.

型,并对双机械臂系统进行了受力分析。通过将接触力分解为外力和内力,针对这两种力量分别设计了自适应变阻抗控制算法,以实现位置 and 力的协同控制。屈海军等人<sup>[3]</sup>设计出一种基于二型模糊遗传方法的机械控制器,利用拉格朗日函数建立了冗余度机械臂扭矩与连杆位置之间的动力学模型。接着引入二型隶属函数来定义二型模糊集和区间二型模糊集,并对区间二型模糊逻辑系统的主要模块功能进行了分析。以此为基础,制定了相应的规则库。最后采用遗传算法进行参数调整,实现对机械臂运动轨迹的精确控制。但上述方法在实际应用中并没有考虑机械臂系统控制能量过大问题,导致关节之间的协调性不佳。

细菌觅食算法通过交互和自适应机制来优化问题的解。细菌觅食算法可用于机械臂角度控制器参数的优化。通过定义适应度函数,将问题转化为寻找最优参数组合的优化问题。细菌觅食算法能够在搜索空间中进行随机搜索,并通过评估每个解的适应度来逐步优化参数,以找到最优解。同时细菌觅食算法可以很好地与并行计算结合,利用多个处理单元同时进行搜索和优化。

为此提出基于细菌觅食算法的嵌入式机械臂角度控制器设计来控制机械臂的运行轨迹,有效地提高机械臂的运行轨迹控制效果,使其更加精确、高效和适应不同工作条件的要求。

## 1 机械臂角度控制器设计

### 1.1 机械臂动力学模型

机械臂的动力学模型能够清楚反映出在机械臂运动过程中,机械臂控制输入与机械臂关节位置以及关节速度的关系。从动力学的观点来看,正、反动力学分析机械臂运动时,均是机械臂的动态模型为基础。通过设计控制器输入,获得理想的运动轨迹,以此达到控制机械臂轨迹跟踪的目的。因此,对机械臂角度控制器设计问题的深入研究,必须对其进行准确的动态建模。下面将以 Lagrange 方程为依据推导出串联机械臂的动力学方程。

根据 Lagrange 公式,可得:

$$L = V - U \tag{1}$$

其中: $L$ 代表 Lagrange 函数, $V$ 为系统动能, $U$ 为系统势能。

利用 Lagrange 方程表示机械臂数学模型:

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} \tag{2}$$

其中: $\tau_i$ 表示作用于 $i$ 关节的控制力输入, $q_i$ 为 $i$ 关节位置, $\dot{q}_i$ 为 $i$ 关节速度。

根据 Lagrange 公式,首先计算连杆的动能 $V$ ,任意一根连杆的动能 $V_i$ 为角动能和线动能之和,如下式所示:

$$V_i = \frac{1}{2}v_i^T m_i v_i + \frac{1}{2}\omega_i^T J_i \omega_i \tag{3}$$

其中: $m_i$ 和 $J_i$ 分别为 $i$ 连杆的质量以及转动惯量, $v_i$ 和 $\omega_i$ 分别为 $i$ 连杆的线速度和角速度。

即整个机械臂系统的连杆总动能 $V$ 表示为:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = \sum_{i=1}^n \pi \left( \frac{1}{2}v_i^T m_i v_i + \frac{1}{2}\omega_i^T J_i \omega_i \right) \tag{4}$$

将上式写成关于机械臂关节和关节速度的形式:

$$V(q, \dot{q}) = \frac{1}{2}\dot{q}^T M(q) \dot{q} \tag{5}$$

其中: $q, \dot{q} \in R^n$ 分别为机械臂关节和关节速度, $M(q) \in R^{n \times n}$ 为机械臂惯性力。

其次计算机机械臂系统势能 $U$ ,任意一根连杆的系统势能 $U_i$ 可表示为:

$$U_i = -\frac{1}{2}m_i g^T h_i + U_{refi} \tag{6}$$

其中: $g$ 为重力加速度矢量, $h_i$ 为第 $i$ 连杆质心的矢量, $U_{refi}$ 为使得 $U_i$ 为0的矢量。

即整个机械臂系统的连杆总势能 $U$ 表示为:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i = \sum_{i=1}^n -m_i g^T h_i + U_{refi} \tag{7}$$

机械臂系统的动能和势能由式(5)和式(7)表示,由 Lagrange 公式表示机械臂动力学的方程为:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \tag{8}$$

其中: $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ 分别为机械臂关节的位置、速度和加速度矢量。 $M(q) \in R^{n \times n}$ 为对称正定惯性矩阵, $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 为哥氏力和离心力矩阵, $G(q) \in R^n$ 为重力矢量, $\tau \in R^n$ 为控制力矩。

### 1.2 机械臂角度控制器硬件逻辑结构

根据建立的机械臂动力学模型获取机械臂的柔性特征及其关节位置,在此基础上,设计合适的控制策略,这有助于确定角度控制器的硬件逻辑结构和算法实现。从移动控制终端和机械臂控制端角度出发设计机械臂角度控制器硬件结构,并优化相关参数,提升机械臂角度控制的动态性能。硬件整体设计思路如图1所示。

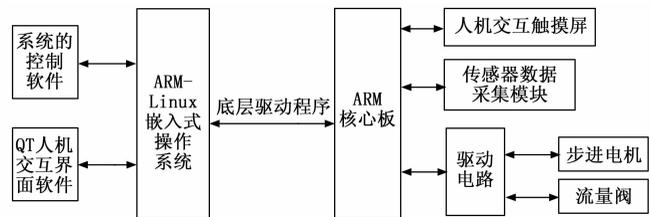


图 1 硬件整体设计思路

在硬件整体设计思路图中,系统控制软件与QT人机交互界面软件连接到ARM-Linux嵌入式操作系统。这意味着系统控制和人机交互功能都由嵌入式操作系统来管理和执行。底层驱动程序连接嵌入式操作系统与ARM核心板,实现与各个硬件模块的通信和控制。ARM核心板作为主控单元,与人机交互触摸屏、传感器数据采集模块和驱动电路相连接。人机交互触摸屏用于接收用户输入和显示系统界面,传感器数据采集模块用于实时采集机械臂关节的位置、速度和力量等信息,驱动电路用于提供动力和扭矩驱动机械臂关节的运动。

通过上述硬件设计有助于嵌入式机械臂角度控制器具有高度集成化、实时性和稳定性、灵活性和可扩展性、用

户友好的界面等优势。

1) 高度集成化: 通过将系统控制软件、人机交互界面软件和操作系统集成在一起, 可以实现整个系统的高度集成化。这减少了硬件组件之间的复杂连接和通信, 并简化了嵌入式机械臂角度控制器的管理和维护。

2) 实时性和稳定性: 嵌入式操作系统通常具有实时性和稳定性的特点, 能够快速响应和处理系统控制和人机交互的需求。这确保了系统的高效运行和可靠性。

3) 灵活性和可扩展性: 通过使用 ARM 核心板作为主控制单元, 可以灵活地连接和扩展各种硬件模块。这为系统的功能扩展和升级提供了便利。

4) 用户友好的界面: QT 人机交互界面软件提供了用户友好的界面, 使用户能够方便地与机械臂进行交互和操作。这提高了系统的易用性和用户体验。

### 1.3 嵌入式机械臂角度控制器核心硬件设计

嵌入式系统具有体积小、价格便宜和低功耗等特点, 可以将多个功能模块集成在一个小型的处理器芯片中。这种高度集成化的设计使得机械臂角度控制器的硬件结构更加紧凑和简化, 减少了系统的复杂性和成本。而且其计算能力不容小觑, 嵌入式 ARM7 处理器具有较高的计算能力, 能够满足机械臂角度控制的基本计算需求。它可以处理复杂的运动规划算法、控制算法和路径优化算法, 以实现精确的角度控制和运动轨迹规划, 同时也保证了机械臂角度控制系统的稳定性, 这是由于嵌入式系统专注于特定的任务和应用领域, 其软硬件设计经过严格的测试和验证, 具有较高的稳定性和可靠性。这对于机械臂角度控制的实时性和精确性非常重要, 确保系统能够稳定地执行所需的控制任务。因此, 以嵌入式系统为硬件基础设计机械臂角度控制器, 角度控制器以嵌入式 ARM7 作为硬件核心处理器<sup>[4]</sup>。

将云端微处理器作为机器人机械臂嵌入式智能控制系统的一部分, 可以实现远程控制和监测。通过与云端的连接, 可以进行远程数据传输、访问和存储, 实现更复杂的控制和决策功能, 提高机械臂的智能化水平<sup>[5]</sup>。因此, 使用云端微处理器作为机器人机械臂嵌入式智能控制系统, 将该角度控制分为移动控制终端和机械臂控制端两部分, 两个控制端之间要满足传感器和信号控制器的高速传递。传感器模块负责实时采集机械臂关节的位置、速度和力量等信息, 而信号控制器则负责将采集到的数据传递给机械臂控制端进行处理。通过高速传递的设计, 可以保证传感器数据的准确性和及时性, 以实现机械臂运动轨迹的精确控制<sup>[6]</sup>。

核心控制器采用 S3C2410, 其采用了先进的 FBGA 封装方式, 针脚有 272 个之多, 布线工艺必须采用多层板设计方案才能完成设计。设计中采用了核心板和外围控制电路分离的设计方案, 核心板的构成如图 2 所示。

其中, 机械臂控制端凭借 ARM7 芯片进行操作控制, 工作频率为 70 Hz/s, 程序控制生成脉冲宽度调制的波形, 这种脉冲宽度调制的波形用于调节机械臂的任意关节, 对

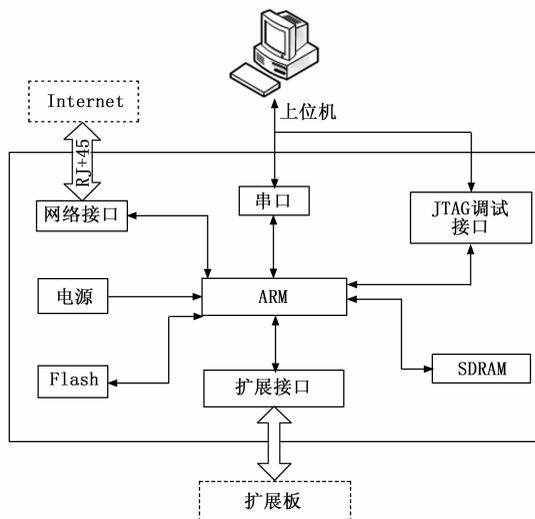


图 2 核心控制模块的硬件设计

各种形态机械臂的关节角度都能精准跟踪<sup>[7]</sup>。移动控制终端的主要目的是人机交互, 使用 nRF24L01 射频技术对用户数据进行传输, nRF24L01 射频技术的通信频率为 3.6 GHz, 数据传输速率 2 bit/s, 大大节约了数据传输的时间, 执行效率较高<sup>[8]</sup>。

## 2 基于细菌觅食算法的控制流程

细菌觅食算法是全局搜索寻优算法, 具有非常优秀的搜寻能力, 可以实现对机械臂角度的高精度跟踪控制, 因此在机械臂角度控制器硬件设计的基础上, 使用细菌觅食算法进行控制最优参数确定, 本文重点对机械臂的力控制参数进行优化, 力控制参数是指机械臂末端施加的力或力矩, 包括机械臂的力控制和扭矩控制, 用于处理机械臂的接触力或者力传递等情况<sup>[9-10]</sup>。具体控制算法如下所示:

建立细菌趋化位置更新公式, 根据细菌觅食算法的原理, 采用下式来模拟细菌在搜索空间中移动的过程, 以使细菌能够朝着最优解的方向移动, 通过位置更新获取机械臂末端力的传递路径<sup>[11]</sup>, 表达式为:

$$\partial^i(j+1, k, r) = \partial^i(j, k, r) + C(i) \frac{\Delta(i)(x_1, x_2, x_3, x_4)}{\sqrt{\Delta^i(i)\Delta(i)}} \quad (9)$$

式中,  $i$  为某一细菌点,  $j$  为趋向性操作次数,  $k$  为复制操作系数,  $\partial^i(j+1, k, r)$  为趋向操作后与复制操作后的位置,  $r$  为细菌的长度,  $\Delta(i)$  为细菌随机变量。

考虑到机器人机械臂的实际操作情况, 在趋向性反应与复制反应中分别引入聚集模式, 机器人机械臂在实际操作中可能受到一些约束, 如工作空间限制、物体碰撞避免等<sup>[12]</sup>。通过引入聚集模式, 可以使细菌更倾向于聚集在符合机械臂操作约束的区域内, 从而更好地适应机械臂的操作要求, 此时细菌  $i$  的适应值表达式为:

$$W(i, j+1, k, r) = \partial^i(j+1, k, r) + W_c(\partial^i(j+1, k, r)) \quad (10)$$

式中,  $W_c(\partial^i(j+1, k, r))$  代表各个细菌之间的影响因子。根

据细菌适应值计算结果,进行机械臂扭矩控制,机械臂扭矩控制通过施加适当的扭矩或力矩来控制机械臂的运动,使其达到预定的目标位置或轨迹<sup>[13-14]</sup>。通过优化控制参数,可以改善机械臂的运动控制效果,提高其稳定性、精确性和响应速度。得到的控制参数优化结果表达式为:

$$W^i = \sum_{j=1}^{i+1} W(i, j + 1, k, r) \quad (11)$$

式中,  $W^i$  代表目标扭矩。

在机械臂角度控制中,控制量(如扭矩或力矩)的大小需要在一定范围内控制,避免过大的控制量可能导致机械臂的不稳定或损坏。适度函数可以对控制器的输出进行限制,确保控制量在安全范围内,从而防止控制量过大的情况发生<sup>[15-16]</sup>。为了缩短控制时间,阻止控制量过大,降低超调,基于参数优化结果通过适度函数提高机械臂角度控制的动态性能,表达式如下所示:

$$W(k_p, k_i, k_d) = \bar{\omega}_1 \int_0^{\infty} t |e(t)| dt + \bar{\omega}_2 \cdot W^i + \bar{\omega}_3 + \bar{\omega}_4 + t \quad (12)$$

式中,  $\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \bar{\omega}_3, \bar{\omega}_4$  分别代表与空间状态变量  $x_1, x_2, x_3, x_4$  相对应的关节权重系数,  $\bar{\omega}_1 \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$  代表绝对误差与时间乘积积分<sup>[17-18]</sup>, 权重系数可以增强角度控制器的性能指标,利用该指标可以缩短运行过渡时间。

通过上述分析可知,在设计嵌入式机械臂角度控制器硬件的基础上,采用细菌觅食算法优化控制参数,以提升机械臂角度控制的动态性能,缩短机械臂角度运行过渡时间,由此实现机械臂角度控制器性能的提升<sup>[19-20]</sup>。

实现代码指的是将控制算法转化为计算机程序的过程,即将控制算法的逻辑和步骤以编程语言的形式表达出来,并通过编译或解释器等工具将其转化为可执行的机器代码。上述基于细菌觅食算法的控制流程控制算法需要通过编程语言实现,并与硬件进行交互,才能真正实现机械臂角度控制。控制算法被转化为 C++ 的类和函数。

则实现代码如下所示:

```
// 定义细菌类 class Bacteria { public: int tendency; // 趋向性
操作次数 float replication; // 复制操作系数 float position[3]; //
位置坐标 float length; // 细菌长度 float random; // 细菌随机变量
float fitness; // 细菌适应值
/* 更新位置 */
void updatePosition() {
float newPosition[3];
for (int i = 0; i < 3; i++) {
newPosition[i] = position[i] + tendency * (replication *
(position[i] - newPosition[i])) + random;
}
for (int i = 0; i < 3; i++) {
position[i] = newPosition[i];
// 定义机械臂模型 class Robot { public: float jointAngle[3];
// 关节角度 float jointPosition[3]; // 关节位置 float motorParameters[6]; // 运动学参数和动力学参数
```

```
/* 得到末端力的传递路径 */
float getEndEffectorForcePath(Bacteria * bacteria) {
// 实现代码
}
/* 计算目标扭矩和优化角度控制参数 */
float calculateTargetTorque(Bacteria * bacteria) {
// 实现代码
}
/* 基于适度函数优化角度控制器的性能 */
float optimizeController(Bacteria * bacteria) {
// 实现代码
};
// 主程序 int main() { // 创建细菌群体 Bacteria bacteria
[NUM]; for (int i = 0; i < NUM; i++) { // 初始化细菌属性
// 创建机械臂模型
Robot robot;
// 迭代更新
for (int i = 0; i < ITERATION_TIME; i++) {
// 更新细菌位置
for (int j = 0; j < NUM; j++) {
bacteria[j].updatePosition();
}
// 计算细菌适应值
for (int j = 0; j < NUM; j++) {
// 实现公式(5)计算细菌适应值
}
// 进行机械臂扭矩控制
for (int j = 0; j < NUM; j++) {
robot.calculateTargetTorque(&bacteria[j]);
}
// 优化角度控制器的性能
for (int j = 0; j < NUM; j++) {
robot.optimizeController(&bacteria[j]);
}
}
return 0;
}
```

### 3 实验测试

#### 3.1 测试环境与参数

为验证本文设计的基于细菌觅食算法的嵌入式机械臂角度控制器性能,选取 UR3 型号的机器人作为实验对象。机械臂是型号为 UR3 系列的三关节机械臂装置,参数如表 1 所示。

表 1 UR3 机器人机械臂参数

型号	参数
有效负载	3 kg
腕关节速度	360°/s
肩、肘、基座关节速度	180°/s
工具端速度	1 m/s

三关节机械臂结构如图 3 所示。

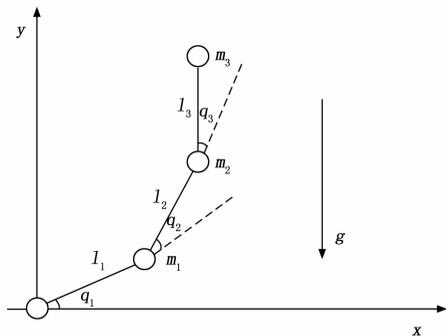


图 3 三关节机械臂角度控制结构图

图 3 中,  $m_1$  代表机械臂连杆 1 的关节,  $m_2$  代表机械臂连杆 2 的关节,  $m_3$  代表机械臂连杆 3 的关节,  $q_1$  代表机械臂连杆 1 的关节角度,  $q_2$  代表机械臂连杆 2 的关节角度,  $q_3$  代表机械臂连杆 3 的关节角度,  $g$  代表重力加速度,  $l_1$  代表机械臂连杆 1 的长度,  $l_2$  代表机械臂连杆 2 的长度,  $l_3$  代表机械臂连杆 3 的长度。

图 4 为  $m_1$  关节 MCP 的运动控制轨迹。

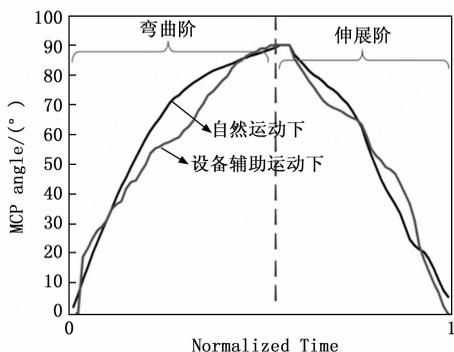


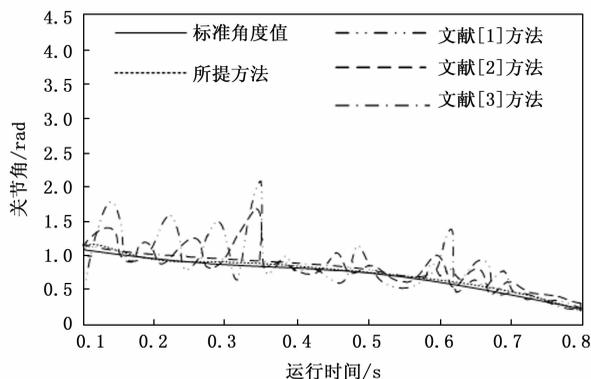
图 4 运动轨迹对比

### 3.2 测试结果

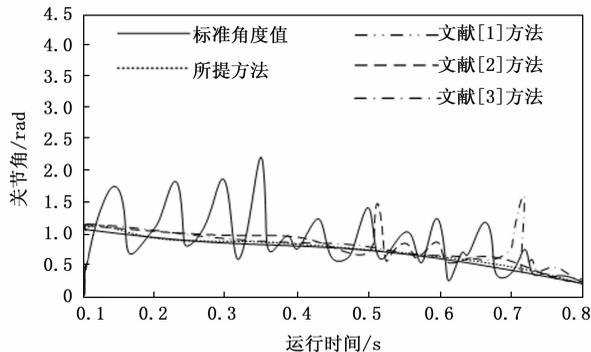
为了证明所设计机械臂角度控制器的实际操作性能, 采用所提方法、文献 [1] 方法、文献 [2] 方法与文献 [3] 方法进行机械臂关节角度跟踪控制效果对比, 根据图 5 的运动轨迹, 对三关节机械臂的各个关节角的输出响应曲线对比图。

通过图 5 (a) 可得知, 文献 [1] 方法与文献 [2] 方法都发生了超调问题, 文献 [3] 方法前期与标准角度有很好的拟合性, 但在 0.6 s 后, 发生了超调, 反观所提控制方法可以保证机械臂关节角度无超调, 与标准角度拟合效果较好, 跟踪精度高达 99%。

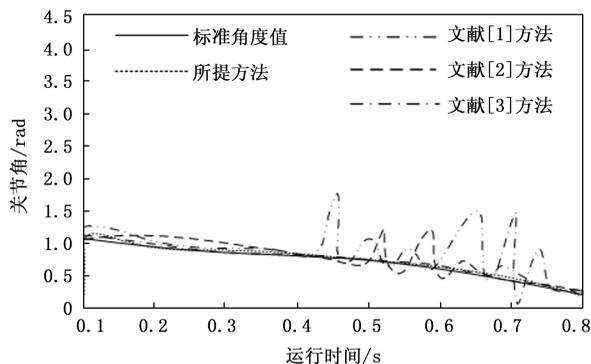
通过图 5 (b) 可得知, 文献 [1] 方法发生过高的超调, 拟合效果不理想, 文献 [2] 方法在 0.5 s 发生了严重的超调, 文献 [3] 方法前期与标准角度有很好的拟合性, 但在 0.7 s 后期, 也发生了超调, 而所提方法可以保证机械臂关节角度无超调, 与标准角度拟合效果优秀, 跟踪精度高达 99%。



(a) 关节 1 角度输出对比响应曲线



(b) 关节 2 角度输出对比响应曲线



(c) 关节 3 角度输出对比响应曲线

图 5 三关节机械臂各关节角的输出响应曲线对比图

通过图 5 (c) 可得知, 文献 [1] 方法在 0.45 s 发生了严重的超调, 文献 [2] 方法在 0.5 s 发生了严重的超调, 文献 [3] 方法前期与标准角度有很好的拟合性, 但在 0.7 秒后期, 也发生了超调, 而所提方法可以保证机械臂关节角度无超调, 与标准角度拟合效果优秀, 且具有更快的响应时间, 可以精准地控制机械臂完成规定的角度动作, 跟踪精度高达 99%。

角度控制的目的是令机械臂更好地执行下达的任务, 使用机械抓取物体并移动到相应位置, 记录规定位置 and 实际物体间误差, 误差越小, 能证明所提角度控制方法越好。4 种方法的物体偏移距离如 6 所示。

通过图 6 可得知, 文献 [1] 方法的物体偏移距离最高, 在 0.28~0.59 mm 之间, 文献 [2] 方法的物体偏移距离在

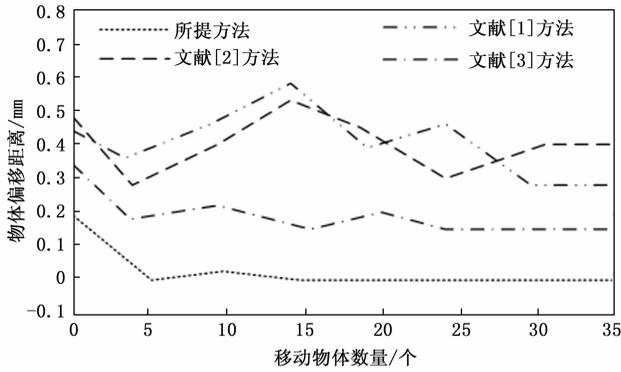


图 6 机械臂物体偏移距离对比结果

0.29~0.53 mm 之间, 文献 [3] 方法的物体偏移距离虽然低于上述两种方法, 但是仍高于所提方法, 所提方法的物体偏移距离最小, 在 0~0.2 mm 之间, 能够符合机械臂角度控制器的实际操作需求。

为了进一步证明所提控制方法的机械臂角度控制器的有效性, 进行控制运行时间对比。4 种控制方法进行机械臂角度控制运行时间对比, 时间对比结果如图 7 所示。

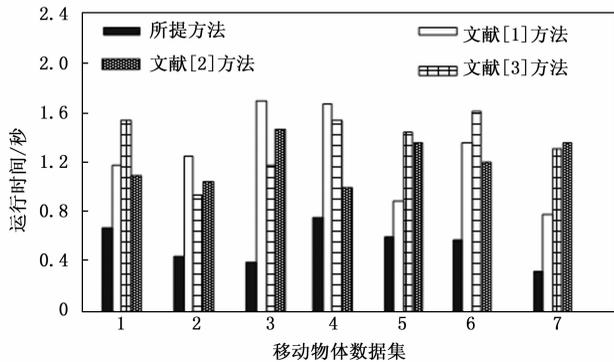


图 7 机械臂角度控制运行时间对比结果

通过图 7 的机械臂角度控制运行时间对比结果可得知, 所提方法的控制运行时间在 0.33~0.78 s 之间; 文献 [1] 方法的控制运行时间在 0.78~1.72 s 之间; 文献 [2] 方法的控制运行时间在 1.02~1.49 s 之间; 文献 [3] 方法的控制运行时间在 0.95~1.69 s 之间, 所提角度控制方法的运行时间明显低于其他 3 种方法, 说明所提方法的机械臂角度控制效率极高, 实现了机械臂角度的快速控制, 具有实用性。

#### 4 结束语

为了提高机械臂自动化程度, 提高工作效率, 提出一种基于嵌入式的机械臂角度控制器来控制机械臂的运行。建立机械臂动力学模型, 设计机械臂角度控制器的硬件结构, 在此基础上, 运用细菌觅食算法计算最优控制参数, 使用优化后的输出参数实现对机器人机械臂的角度精准跟踪控制。实验证明所提方法能够精准地控制机械臂达到规定角度, 与其他控制方法相比机械臂关节角度超调更低,

且有更快的响应时间, 能够实现机械臂角度的实时控制, 具有极高的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 张隆宇, 郑钰奇, 付 锐. 基于 PLC 的三轴机械臂控制系统设计 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13 (17): 54-57.
- [2] 谭丹丹. 基于自适应变阻抗的工业机器人双机械臂控制 [J]. 现代制造工程, 2022 (8): 39-45.
- [3] 屈海军, 杨 森. 基于二型模糊遗传控制器的冗余自由度机械臂运动控制的研究 [J]. 中国工程机械学报, 2021, 19 (2): 117-122.
- [4] 陈卫彬, 王丽丽, 孙宏伟, 等. 锻造机器人金属橡胶关节阻尼设计及振动抑制 [J]. 机床与液压, 2022, 50 (11): 46-52.
- [5] 夏 田, 张大为, 代斌斌. 全向移动的送餐机器人控制系统研究与仿真 [J]. 制造业自动化, 2022, 44 (5): 17-20.
- [6] 申永鹏, 刘 迪, 王延峰, 等. 误差自校正随机脉冲宽度调制相电流重构研究 [J]. 电机与控制学报, 2022, 26 (9): 108-118.
- [7] 牛世权. 轻量级安全内存: RISC-V 嵌入式微处理器安全增强 [J]. 计算机工程与科学, 2021, 43 (8): 1360-1365.
- [8] 马建民, 段俊法. 基于激光测距的微型机械臂关节控制模型 [J]. 激光与红外, 2022, 52 (9): 1354-1359.
- [9] 朴哲银, 刘 灏, 许苏迪, 等. 基于正交多项式拟合的 PMU 现场测试参考值计算方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50 (20): 88-96.
- [10] 周剑青, 屈福政. 一种机器人关节用伺服电机行星减速器的刚柔耦合动力学仿真 [J]. 机械传动, 2021, 45 (10): 91-95.
- [11] 张 铁, 许锦盛, 邹焱飏. 基于扰动卡尔曼滤波的机器人免力矩传感器拖动示教方法 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2022, 50 (9): 116-125.
- [12] 边 琦, 张梦寒, 王建平, 等. 基于改进细菌觅食算法的飞控系统多模态参数优化 [J]. 控制与决策, 2022, 37 (8): 1981-1988.
- [13] 张 品, 李长勇. 基于改进模糊 PID 的全向搬运机器人路径跟踪控制研究 [J]. 食品与机械, 2021, 37 (6): 114-119.
- [14] 李德伦, 朱 超, 张 运, 等. 空间站机械臂一体化关节设计与试验验证 [J]. 载人航天, 2022, 28 (5): 666-674.
- [15] 解加全, 刘霄琪, 张佳乐. 二维 Volterra-Fredholm 积分方程数值算法研究及收敛性分析 [J]. 工程数学学报, 2022, 39 (6): 1012-1020.
- [16] 孔陶茹, 齐 峰, 李晚春. 基于 RBF-BP 算法的机械臂多自由度分拣控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (11): 98-103.
- [17] 刘淑香. 基于最小二乘法的桥式起重机械臂关节控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (5): 97-101.
- [18] 金翰扬, 陈富林. 基于 ROS 和 EtherCAT 的机械臂控制系统 [J]. 机械制造与自动化, 2023, 52 (1): 177-180.
- [19] 史洪松, 敖 昕. 一种液压驱动机械臂多关节力矩控制方法 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (7): 391-395.
- [20] 张德慷, 马桂金, 李 坤, 等. 面向 ESM 任务的机械臂控制策略与优化算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36 (5): 30-38.