

8-19-2021

Application of Trust Driven Adaptive Cooperative Control Algorithm

Xindong Gui

1. School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; ;

Hongjiang Ji

2. China Shipbuilding IT Co., Ltd., Beijing 100861, China; ;

Lingling Fan

1. School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; ;

Shida Liu

3. School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Application of Trust Driven Adaptive Cooperative Control Algorithm

Abstract

Abstract: When a multi-manipulator performs cooperative task, it's end position is difficult to accurately track the target and ensure the consistency influenced by the nonlinear factors such as working environment, assembly condition and system disturbances, resulting in large errors during collaborative work. To solve multi-manipulators position coordinated control problem, *a multi-agent based adaptive position coordination control algorithm is proposed by researching on the novel trust mechanism, including adaptive update mechanism of trust value (self-trust and mutual-trust) and Fisher information weighted (covariance) update mechanism.* In automated collaborative assembly tasks, the precise consensus positioning of end-effector is achieved with improvements in the control accuracy and efficiency. The simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords

trust-driven, multi-agent system, adaptive cooperative control, multi-manipulator coordination

Recommended Citation

Gui Xindong, Ji Hongjiang, Fan Lingling, Liu Shida. Application of Trust Driven Adaptive Cooperative Control Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(8): 1809-1817.

信任驱动的自适应协调控制算法及应用

桂欣冬¹, 吉鸿江², 范玲玲¹, 刘世达³

(1. 北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100192; 2. 北京中船信息科技有限公司, 北京 100861;

3. 北方工业大学 电气与控制工程学院, 北京 100144)

摘要: 多机械臂执行协同任务时, 由于作业环境、装配条件、系统扰动等诸多非线性因素影响, 其末端位置难以精确跟踪目标并保证一致, 导致协同工作时产生较大误差。为解决多机械臂位置协同控制问题, 通过研究新颖的信任机制, 包括信任值(自信任值和互信任值)自适应更新机制和 Fisher 信息权重(协方差)更新机制, 提出一种基于多智能体的自适应位置协调控制算法, 当系统存在干扰时, 实现多机械臂末端位置一致跟踪到目标位置, 提升自动化协同装配任务的控制精度和执行效率。仿真结果验证了所设计方法的有效性。

关键词: 信任驱动; 多智能体系统; 自适应协调控制; 多机械臂协同

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2021) 08-1809-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0261

Application of Trust Driven Adaptive Cooperative Control Algorithm

Gui Xindong¹, Ji Hongjiang², Fan Lingling¹, Liu Shida³

(1. School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;

2. China Shipbuilding IT Co., Ltd., Beijing 100861, China;

3. School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: When a multi-manipulator performs cooperative task, it's end position is difficult to accurately track the target and ensure the consistency influenced by the nonlinear factors such as working environment, assembly condition and system disturbances, resulting in large errors during collaborative work. To solve multi-manipulators position coordinated control problem, a multi-agent based adaptive position coordination control algorithm is proposed by researching on the novel trust mechanism, including adaptive update mechanism of trust value (self-trust and mutual-trust) and Fisher information weighted (covariance) update mechanism. In automated collaborative assembly tasks, the precise consensus positioning of end-effector is achieved with improvements in the control accuracy and efficiency. The simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: trust-driven; multi-agent system; adaptive cooperative control; multi-manipulator coordination

引言

随着人工智能时代快速发展, 工业产品制造和智能机器人应用都发生了根本性的变革。机械臂系统作为智能制造的典型代表, 能够执行高难度、高

精度和高强度的作业任务, 广泛应用于工业生产、医学诊断、国防军事、影视娱乐等各个领域, 已经成为现代生产生活中不可或缺的重要设备, 近些年受到世界各国科研学者的高度重视。作为一个重要

收稿日期: 2020-05-20 修回日期: 2020-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(61803036, 61703019); 北京信息科技大学师资补充与支持计划(5111911129); 北京市教委科研计划一般项目(KM201911232015)

第一作者: 桂欣冬(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为多智能体系统, 数据驱动滤波, 故障诊断。E-mail: 37415021@qq.com

的研究方向,多机械臂协同控制,存在诸多复杂外界因素的影响,相较于单机械臂系统,对控制系统提出了更高的要求。因此,多机械臂协同控制方法的研究具有重要的理论意义和应用价值,也是工业智能机器人控制领域的关键技术。

在 20 世纪 70 年代,智能体这一概念被提出,它可以被理解为一个计算实体,在协同系统中自主发挥其作用,本文研究的机械臂就可以被看作一个智能体。Reynolds 通过仿真实验首次模拟了生物界多智能体的行动行为,发现其具有碰撞规避,速度匹配,群体聚集的特性,也就是多智能体相互协同的一致性行为^[1]。得益于此实验,模拟生物界粒子运动的 Vicsek 模型^[2]得以建立, Jadbabaie 等^[3-4]对此模型进行了理论分析推导并建立了较为全面的理论框架,奠定了多智能体系统研究的基础。

多机械臂系统作为一类特殊的 Euler-Lagrange 系统,其系统中含有大量内在的非线性现象,近年在多机械臂协同任务的研究中, Wang^[5]提出了一种无源性自适应跟踪算法,用于补偿网络化机械臂系统的不确定扰动。孟凡丰等^[6]研究了基于反步法和自适应神经网络的控制方法,尝试逼近、补偿机械臂系统运动过程中产生的误差。同样基于自适应神经网络,张佳舒等^[7]结合滑模控制方法,设计了一种自适应控制器来实现对机械臂系统的速度、轨迹进行跟踪。针对柔性关节多机械臂系统,李树荣等^[8]研究了基于 Pade 理论的神经网络自适应位置/力协同控制方法,解决机械臂齿轮间隙扩大产生的时滞影响。Chen 等^[9]在输入饱和和受限的条件中,尝试用神经网络的方法对系统未知项进行估计,以实现机械臂的跟踪控制。Lian 等^[10]提出了一种分布式卡尔曼一致性滤波算法,实现了对一类多目标连续系统的一致性跟踪控制。然而,现有研究成果很少考虑机械臂位置、姿态等交互信息的可靠性问题,每个机械臂对其他机械臂传递的信息都是基于完全信任的假设,而不可靠的交互信息会很大程度影响该机械臂的

控制策略和效果,因此本文将研究一种考虑多智能体间存在信息交互情形下的协调控制算法。

对于网络化的多机械臂系统,如果将每一个机械臂看作是一个独立的智能体,则它们之间可以进行广泛的信息交互,共同配合完成一个装配任务,提升系统整体的控制效果和效率。在多智能体系统中,一般假设系统中每个智能体都是同样值得信任的。但是在多源信息融合、多机械臂协同等实际应用场景中,这个假设很难成立。Mikulski 等^[11]研究了一种基于社交网络的信任方法,设计了全局信任值更新算法,并应用于多智能体系统一致性协调估计中。从而形成本文第一种动态调整的信任机制:信任值(自信任值和互信任值)自适应更新机制。信息权重的一致性滤波被广泛应用于传感器网络,实现系统状态一致性估计^[12-13]。Ji 等^[14]研究了一种基于信息权重的卡尔曼一致性滤波方法,其中提出了一种基于 Fisher 信息权重矩阵更新的信任机制,利用逆协方差矩阵特性,实现网络化信息交互加权,当智能体信息不准确时,其信息权重动态调整变小,与其他智能体信息交互时会产生较小影响,形成本文第二种动态调整的信任机制: Fisher 信息权重(协方差)更新机制。但是,上述两种基于信任机制的一致性算法只限于多智能体系统的状态估计问题,并不能解决协调控制问题,Zhang 等^[15]研究了一类基于多智能体的一致性协调控制方法,解决城市道路交通信号配时,可以用于解决多机械臂系统的协同控制问题。

综上,本文通过借助多智能体系统理论,建立基于图论的机械臂信息交互网络拓扑,描述信息交互关系,设计信任值(自信任值和互信任值)自适应更新算法和 Fisher 信息权重(协方差)更新算法两种动态调整信任机制,建立多机械臂信任模型,提出一种新颖的自适应协调控制算法,提高了多机械臂系统位置协同控制精度,控制速度,实现精确跟踪目标位置的功能。

1 背景机制描述

1.1 多机械臂系统的信息交互机制

图论作为研究多智能体网络模型结构、性质和方法的理论, 广泛应用于计算机、信息论、控制论以及经济管理等各方面, 本文利用图论相关知识^[16], 进行机械臂多智能体系统的信息交互和网络拓扑描述。

将每一个机械臂看作是一个独立的智能体, 每个智能体看作一个网络节点, 可以进行信息交互。对于一个由 N 个机械臂组成的多智能体系统, $A=[a_{ij}] \in R^{N \times N}$ 表示邻接权重矩阵, $D = \text{diag}\{d_i\} \in R^{N \times N}$ 表示入度矩阵, 其中 $d_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}$, $L = D - A$ 表示拉普拉斯矩阵。如果智能体 j 可以传递信息给智能体 i , 则 $a_{ij}=1$, 否则 $a_{ij}=0$ 。定义目标节点为 0, 其他智能体节点为 $i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, N$ 。

多机械臂系统网络拓扑如图 1 所示。该系统由 3 个机械臂组成, 共同执行协同装配任务, 其可表示为如上邻接权重矩阵形式。通过考虑机械臂网络相互作用的拓扑结构, 重构测量模型, 设计基于多智能体的自适应协调控制方法, 进行末端位置信息交互, 实现多机械臂末端位置协同, 并精确跟踪目标节点 0 的位置。

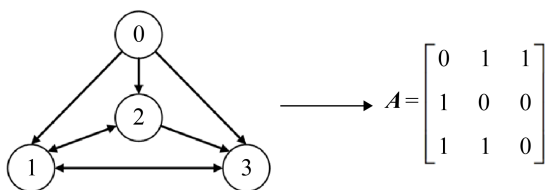


图 1 多机械臂系统网络拓扑结构
Fig. 1 Network topology structure of multi manipulators

1.2 多机械臂系统的信任机制

本文主要提出两种多智能体的信任机制, 并构建多机械臂系统的信任模型。

第一种是信任值(自信任值和互信任值)自适应更新机制, 该方法首先根据智能体对目标节点的跟踪效果, 进行自信任值计算, 然后根据智能体与其

相邻智能体间的相互影响来计算所有智能体的互信任值, 将每个智能体的自信任值与互信任值进行量化, 以确定每个智能体影响整个系统协同的效果, 具体表述如下。

多机械臂系统全局跟踪误差 $\tilde{x}_i(k)$ 计算式为:

$$\tilde{x}_i(k) = x_i(k) - x(k) \tag{1}$$

式中: i 为第 i 个机械臂; k 为第 k 个离散时刻(本文其余各式 k 均表此意); $x_i(k) \in R^n$ 为机械臂末端位置; $x(k) \in R^n$ 为机械臂目标位置。这里, 系统全局跟踪误差可能源于机械臂本身就有的系统噪声以及作业环境、装配条件带来的外界扰动造成的静态或动态跟踪误差。

定义多机械臂系统自信任值 $T_i(k)$, 其计算式为:

$$T_i(k) = \exp\left(-\frac{\|\tilde{x}_i(k)\|}{\|x(k)\| + \zeta}\right) \tag{2}$$

式中: $0 < T_i(k) \leq 1, \zeta \geq 0$ 由设计者自由选取, 以获取一个理想的自信任值。根据多机械臂系统一致性协调误差, 可以计算当前机械臂的自信任值。

定义多机械臂系统互信任值 $T_{ij}(k+1)$, 其计算式为:

$$T_{ij}(k+1) = T_{ij}(k) + \frac{1}{d_i + 1} \sum_{m \in N_i} a_{ij} T_i(k) (a_{im} T_{im}(k) a_{mj} T_{mj}(k) - T_{ij}(k)) \tag{3}$$

式中: $0 < T_{ij}(k) \leq 1, N_i$ 为示第 i 个机械臂的相邻机械臂集合; a_{ij} 为邻接权重矩阵 A 的元素。该互信任值更新公式是根据当前时刻智能体自信任值和互信任值, 以及相邻智能体集合的互信任值进行自适应更新。

为了选择值得信任且数量合适的相邻节点, 计算更新式为:

$$\sum_{m \in N_i} |T_{mj}(k) - T_{im}(k)| < \alpha \sigma_{ij}(k) \tag{4}$$

式中: σ_{ij} 为信任因子。不等式(4)决定邻居智能体能否进入用于计算自信任值更新全局信任值的智能体范围, 如图 2 所示。使用本算法时, 可以预先通过正态分布下的均值和方差进行计算, 定义一个信任值的范围。然后通过改变信任值变量 α 来改变

信任值的范围,从而决定可信任的多智能体范围。这样就可以淘汰一些信任值未进入理想范围内的智能体,会大大减少互信任值更新公式(3)的计算量,提高计算效率,增加信任值计算的准确度。

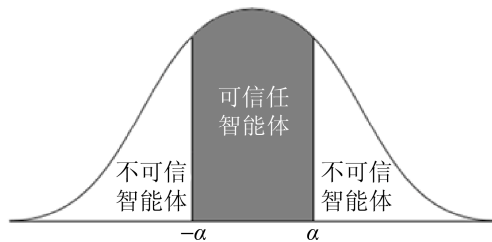


图2 值得信任的智能体范围
Fig. 2 Range of trusted agents

第二种信任机制是 Fisher 信息权重(协方差)更新机制,该方法主要通过计算每个智能体交互信息的协方差矩阵,判断信息的可靠性,采用逆协方差矩阵作为信息权重,动态调整该智能体信息交互的信任值,具体表述如下。

定义计算多机械臂系统全局跟踪误差协方差矩阵式为:

$$\mathbf{P}_i(k) = E\{(\mathbf{x}_i(k) - \mathbf{x}(k))(\mathbf{x}_i(k) - \mathbf{x}(k))^T\} = E\{\tilde{\mathbf{x}}_i(k)\tilde{\mathbf{x}}_i^T(k)\} \quad (5)$$

式中: $E\{\}$ 为求信号的期望。

定义 Fisher 信息矩阵为一致性协调误差的逆协方差矩阵为:

$$\mathbf{F}_i(k) = \mathbf{P}_i^{-1}(k) \quad (6)$$

观察式(6)不难发现,当机械臂末端位置接近目标位置,即 $\mathbf{x}_i(k) \rightarrow \mathbf{x}(k)$ 和 $\tilde{\mathbf{x}}_i(k) \rightarrow 0$ 时,一致性协调误差的协方差矩阵 $\mathbf{P}_i(k) \rightarrow 0$, Fisher 信息矩阵 $\mathbf{F}_i(k)$ 增大,说明该机械臂的末端位置信息更加准确,可以被更多的使用,其信任值也更大。

2 多机械臂系统的自适应协调控制方法

2.1 多机械臂系统协同控制建模

图3展示了一个执行协同装配任务的3机械臂系统,每个机械臂都有三自由度(3-DoF),即 X, Y

和 Z 轴。一般来说,衡量一个机械臂系统精度主要包括:姿态精度和轨迹精度。本文主要研究多机械臂系统的位置轨迹精确跟踪问题,控制目标是控制机械臂之间协调运动,精确控制其位置轨迹,以达到部件精准装配,并实现末端位置一致性跟踪目标位置。

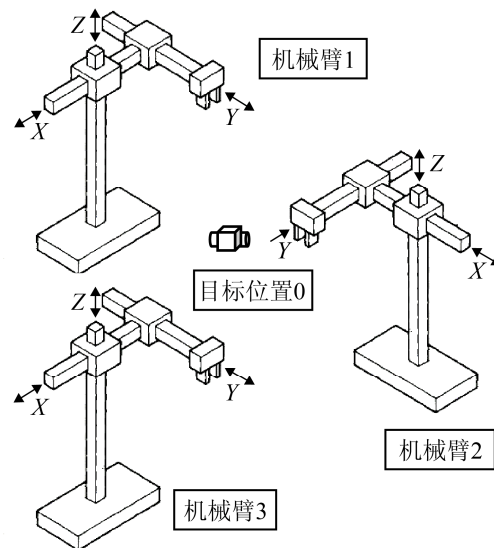


图3 3-DoF 的3机械臂系统执行协同装配
Fig. 3 3-DOF 3-Manipulators for coordinated assemble

在实际应用中,机械臂的关节类型,执行器负载和其他几何参数等带来的不确定性,对机械臂末端位置轨迹都有较为明显的影响。本文针对多机械臂系统,考虑由于作业环境、装配条件、系统扰动等诸多非线性因素影响,研究其末端位置轨迹控制问题。机械臂末端姿态位置^[17]可以表示为:

$$\mathbf{T}_i(\theta) \cong \left[\prod_{l=1}^L [(e^{\xi_{i,l}\theta_{i,l}} + \delta\xi_{i,l}\theta_{i,l})e^{\delta\xi_{i,l}\theta_{i,l}}] \right] \mathbf{T}_i(\theta) \quad (7)$$

式中: $\theta_{i,l}$ 为第 i 个机械臂第 l 个关节的转动关节角度; $\xi_{i,l}$ 为第 i 个机械臂第 l 个关节的瞬时连杆运动的扭转矢量, $\delta > 0$ 是一个常数。在式(7)中,加法项 $e^{\xi_{i,l}\theta_{i,l}} + \delta\xi_{i,l}\theta_{i,l}$ 表示由关节失位导致的静态误差;乘法项 $e^{\delta\xi_{i,l}\theta_{i,l}}$ 表示由关节运动导致的动态误差。

综上,多机械臂系统的末端位置可用式(8)进行计算:

自适应协调控制增益为

$$\begin{aligned} K_i(k) &= P_i(k) H_i^T R_i^{-1}(k) = \\ & (P_i(k) \Omega_{i0}^{-1}(k) \quad P_i(k) (P_{j_1}(k) + \Omega_{ij_1}(k))^{-1} \\ & \cdots \quad P_i(k) (P_{j_b}(k) + \Omega_{ij_b}(k))^{-1}) = \\ & (K_{i0}(k) \quad K_{ij_1}(k) \quad \cdots \quad K_{ij_b}(k)) \end{aligned} \quad (20)$$

代入式(17)中的先验位置更新结果,第*i*个机械臂后验的末端位置更新公式为:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= x_i^-(k+1) + P_i(k+1) H_i^T R_i^{-1}(k+1) \\ & (z_i(k+1) - H_i x_i^-(k+1)) = A(k) x_i(k) + \\ & B(k) u(k) + P_i(k+1) \Omega_{i0}^{-1}(k+1) g_{i0}(k+1) (x(k+1) + \\ & v_{i0}(k+1) - A(k) x_i(k) + B(k) u(k)) + \\ & P_i(k+1) \sum_{j=1}^N a_{ij} (P_j(k+1) + \Omega_{ij}(k+1))^{-1} \\ & (x_j(k+1) + v_{ij}(k+1) - A(k) x_j(k) + B(k) u(k)) \end{aligned} \quad (21)$$

式中:当 $\Omega_{ij}(k+1) = 0$ 时, $F_j(k+1) = P_j^{-1}(k+1)$ 表示 Fisher 信息矩阵。

结合多机械臂系统的自信任值更新式(2)和互信任值更新式(3),信任驱动的自适应协调控制算法设计为:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= x_i^-(k+1) + P_i(k+1) H_i^T R_i^{-1}(k+1) \\ & (z_i(k+1) - H_i x_i^-(k+1)) = \\ & A(k) x_i(k) + B(k) u(k) + \\ & P_i(k+1) \Omega_{i0}^{-1}(k+1) g_{i0}(k+1) \cdot T_i(x(k+1) + \\ & v_{i0}(k+1) - A(k) x_i(k) + B(k) u(k)) + \\ & P_i(k+1) \sum_{j=1}^N a_{ij} (P_j(k+1) + \Omega_{ij}(k+1))^{-1} \\ & T_{ij} \begin{pmatrix} x_j(k+1) + v_{ij}(k+1) \\ -A(k) x_j(k) + B(k) u(k) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

3 仿真验证

3.1 三自由度单机械臂移动装配的不确定性仿真

根据公式(1)和(7),单机械臂在执行移动装配任务时,源于机械臂系统噪声、外界扰动、关节类型、执行器负载等带来的不确定性,从图4可以看出,这些非线性因素对机械臂末端位置轨迹影响较为明显,在多机械臂系统协同控制中表现得更为明

显,需要设计信任驱动的协调控制方法来抑制这些不确定性。

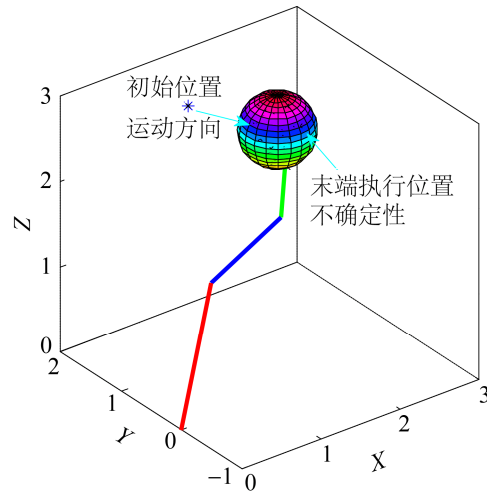


图4 三自由度单机械臂移动装配的不确定性
Fig. 4 Uncertainties in 3-DOF manipulator assemble

3.2 三自由度2机械臂系统仿真

由图5可以看出,本系统是由2个三自由度的机械臂构成,且考虑2个机械臂都可以与目标节点进行直接的信息交互,其末端位置存在一定误差导致其不能完成较为精确的装配任务。

为了检测方法有效性,假设机械臂存在以下误差情形:

- (1) 每个自由度的连接角误差为 $\pm 5^\circ$ 之间;
- (2) 考虑沿每个轴的连杆长度存在 ± 2 mm之间的误差;
- (3) 对于每一个独立的自由度,最大的运动误差在 $\pm 1\%$ 以内,即对每一个1 mm的运动范围,此阶段的误差范围在 ± 0.01 mm之间。

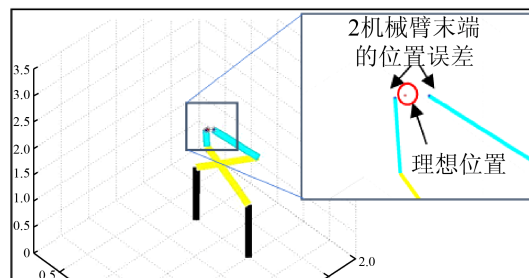


图5 三自由度2机械臂执行协同装配仿真
Fig. 5 Simulation of 3-DOF 2-Manipulators for coordinated assemble

定义机械臂系统的各个机械臂之间的网络拓

扑结构邻接矩阵为 $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, 自信任初值取 I_N ,

N 为机械臂的个数, 互信任初值取 $\begin{bmatrix} 0 & 0.85 & 0.9 \\ 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0.95 & 0 \end{bmatrix}$ 。

基于上面给出的误差情形, 并应用公式(7), 2 个机械臂将从各自独立的初始位置到达一个预定的目标位置。应用信任驱动的自适应协调控制算法(公式(22))实现多机械臂系统末端位置一致性协调控制。

图 6 为使用和未使用信任驱动自适应协调控制算法, 在多机械臂末端位置跟踪误差曲线的仿真结果对比, 可以看出, 后者相比于前者的稳态性能表现得更好且精度更高, 精度提高了 14.35%。

3.3 三自由度 3 机械臂系统仿真

本例模拟了由 3 个三自由度机械臂组成的系统在进行装配任务, 考虑 3 个机械臂都可以直接获取目标点位置信息, 其系统仿真如图 7 所示, 可见其稳态时 3 机械臂末端有一定的位置误差。

应用信任驱动的自适应协调控制算法(公式(22))后, 对比 3 个机械臂稳态时末端状态误差曲线, 如图 8 所示, 分别为每一机械臂末端位置的 X, Y 和 Z 轴的位置误差。通过表 1 数据更可以直观

看出, 在使用本控制算法后, 3 机械臂系统末端位置跟踪误差很小, 稳态时机械臂末端最终一致收敛于目标节点位置, 位置跟踪误差有了较大改善, 因此可以良好完成实际所需的装配任务等。

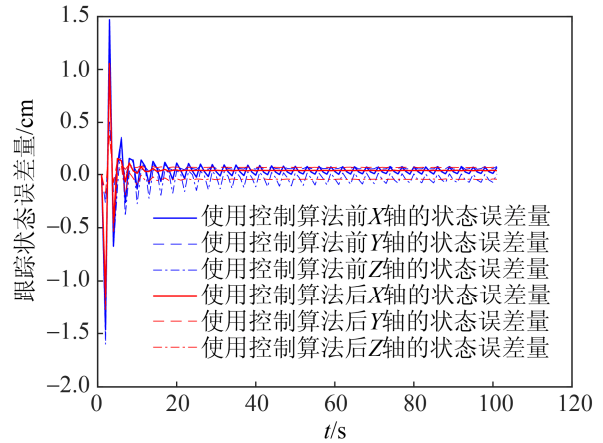


图 6 信任驱动自适应协调控制算法跟踪误差对比验证
Fig. 6 Tracking errors of the proposed trust-driven adaptive cooperative control method

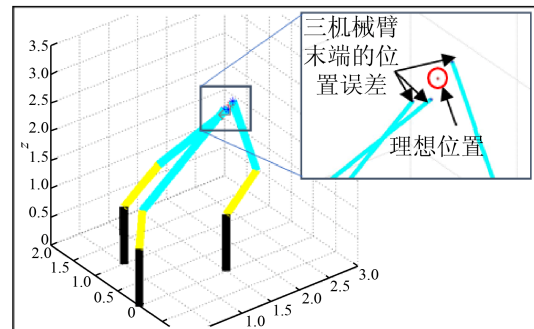
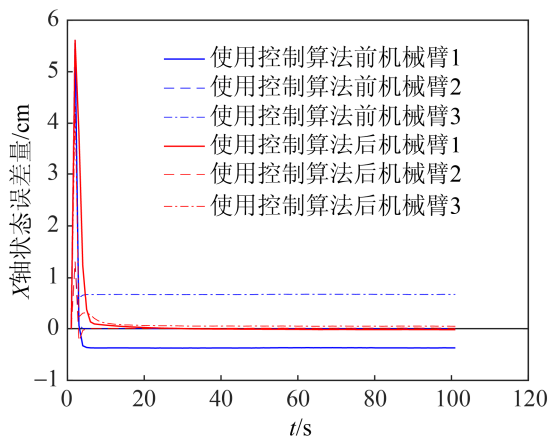
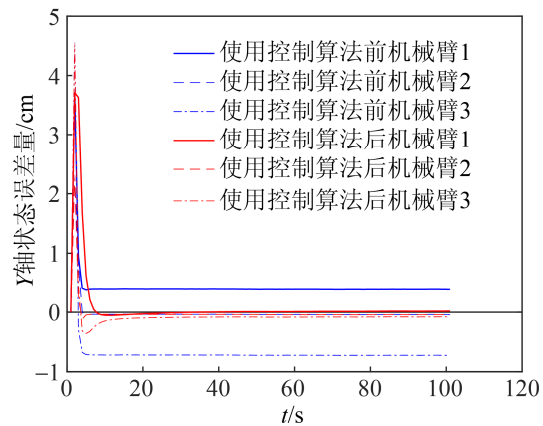


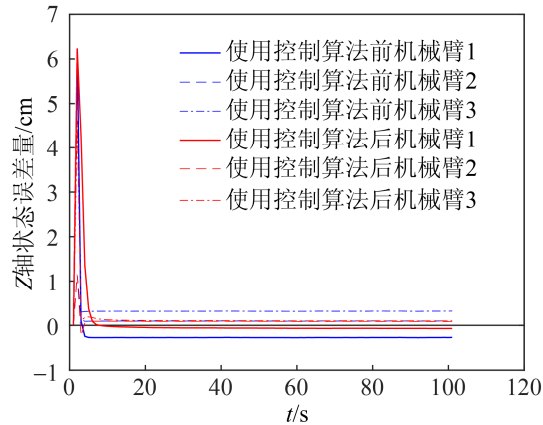
图 7 三自由度 3 机械臂执行协同装配仿真
Fig. 7 Simulation of 3-DOF 3-Manipulators for coordinated assemble



(a) X 轴跟踪误差对比验证



(b) Y 轴跟踪误差对比验证



(c) Z 轴跟踪误差对比验证

图 8 使用信任驱动自适应协调控制算法前后 3 机械臂末端 X, Y, Z 轴位置误差对比

Fig. 8 Comparison of X-axis, Y-axis, Z-axis position errors of three manipulators before and after using trust-driven adaptive cooperative control method

表 1 稳态时 3 机械臂末端 X, Y, Z 轴位置跟踪误差

Tab. 1 X-axis, Y-axis, Z-axis position error of three manipulator in steady state /cm

位置	是否用算法	机械臂 1	机械臂 2	机械臂 3
X 轴	未使用控制算法	0.370 0	0.001 6	0.681 5
	使用控制算法	0.027 2	0.001 6	0.039 6
Y 轴	未使用控制算法	0.385 1	0.037 8	0.721 9
	使用控制算法	0.029 1	0.028 1	0.066 1
Z 轴	未使用控制算法	0.275 7	0.092 7	0.314 3
	使用控制算法	0.061 1	0.094 5	0.106 8

4 结论

本文针对多机械臂系统协同控制问题,提出了一种新颖的信任驱动的自适应协调控制方法,对机械臂运动过程产生的未知不确定进行补偿,提升了系统控制精度和效率。本方法从机械臂运动学及系统的精确性要求出发,研究了信任值(自信任值和互信任值)自适应更新机制和 Fisher 信息权重(协方差)更新机制两种信任机制,设计基于多智能体的自适应协调控制算法,最终实现了多机械臂末端位置的协同控制,使其可以一致收敛于目标节点位置,为系统提供快速、稳定且精确的控制性能。多机械臂系统的仿真结果验证了信任驱动的工业智能自动化协调方法的有效性和可扩展性。

参考文献:

[1] Vicsek T, Czirok A, Ben-Jacob E, et al. Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles[J]. Physical Review Letters (S0031-9007), 2006, 75(6):

1226-1226.

- [2] Reynolds C W. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics (S0097-8930), 1987, 21(4): 25-34.
- [3] Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of Groups of Mobile Autonomous Agents Using Nearest Neighbor Rules[J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 2003, 48(6): 988-1001.
- [4] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus Problems in Networks of Agents With Switching Topology and Time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 2004, 49(9): 1520-1533.
- [5] Wang H L. Passivity Based Synchronization for Networked Robotic Systems with Uncertain Kinematics and Dynamics[J]. Automatica (S0005-1098), 2013, 49(3): 755-761.
- [6] 孟凡丰, 赵林, 于金鹏. 多机械臂系统的自适应神经网络同步控制[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2019, 34(3): 64-69.
- Meng Fanfeng, Zhao Lin, Yu Jinpeng. Adaptive Neural Network Synchronization Control of Multiple Manipulator Systems[J]. Journal of Qingdao University (E&T), 2019, 34(3): 64-69.

- [7] 张佳舒, 张焯, 赵东亚. 多机械臂系统无模型自适应神经网络同步控制[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(1): 110-119.
Zhang Jiashu, Zhang Ye, Zhao Dongya. Model-free Adaptive Neural Network Synchronization Control for Multiple Robotic Manipulator Systems[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science ed, 2020, 39(1): 110-119.
- [8] 李树荣, 尹怀强. 具有时滞的柔性关节多机械臂协同自适应位置/力控制[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(9): 83-89.
Li Shurong, Yin Huaiqiang. Adaptive Position/Force Control for Coordinated Multiple Flexible-joint Manipulators with Time Delay[J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(9): 83-89.
- [9] Chen L, Li C, Sun Y, et al. Distributed Finite-time Tracking Control for Multiple Uncertain Euler-Lagrange Systems with Input Saturations and Error Constraints[J]. IET Control Theory & Applications (S1751-8644), 2019, 13(1): 123-133.
- [10] Lian B, Wan Y, Zhang Y, et al. Distributed Consensus-based Kalman Filtering for Estimation with Multiple Moving Targets[C]// 2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC). Nice: IEEE, 2019: 3910-3915.
- [11] Mikulski D G, Lewis F L, Gu E Y, et al. Trust Method for Multi-agent Consensus[C]// Unmanned Systems Technology Xiv. Maryland: International Society for Optics and Photonics, 2012, 8387.
- [12] Zhang Y, Tian Y P. A Fully Distributed Weight Design Approach to Consensus Kalman Filtering for Sensor Networks[J]. Automatica (S0005-1098), 2019, 104: 34-40.
- [13] Kamal A T, Farrell J A, Roy-Chowdhury A K. Information Weighted Consensus Filters and Their Application in Distributed Camera Networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 2013, 58(12): 3112-3125.
- [14] Ji H, Lewis F L, Hou Z, et al. Distributed Information-weighted Kalman Consensus Filter for Sensor Networks[J]. Automatica (S0005-1098), 2017, 77: 18-30.
- [15] Zhang H, Liu X, Ji H, et al. Multi-Agent-Based Data-Driven Distributed Adaptive Cooperative Control in Urban Traffic Signal Timing[J]. Energies (S1996-1073), 2019, 12(7): 1402.
- [16] Lewis F L, Zhang H, Hengster-Movric K, et al. Cooperative Control of Multi-agent Systems: Optimal and Adaptive Design Approaches[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.
- [17] Das A N, Popa D O. Precision-based Robot Kinematics Design for Microassembly Applications[C]// ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Quebec: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2010: 857-862.