

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.05.015

基于动态刺激响应模型的异质农业 Agent 群任务分配策略

宫金良¹ 王伟¹ 张彦斐² 兰玉彬²

(1. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255000; 2. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000)

摘要: 针对农业 Agent 群协同控制困难、工作效率低的问题, 研究了基于改进刺激响应模型的异质农业 Agent 群任务分配策略。建立基于熟人网与云边协同计算系统的分层混合式 Agent 群体体系架构; 将蚁群算法的刺激响应模型应用于传统合同网算法中, 通过建立自适应招标策略来限制投标 Agent 数量、减少系统的通信负担; 在考虑农业 Agent 异质性的基础上建立任务分配的效能模型, 通过构建时变系数与时间矩阵, 建立基于直接信任度、基于推荐信任度的动态信任度函数与响应阈值设计方法, 以优化农业 Agent 团队的整体效能; 利用增量式 PID 算法与积分分离阈值建立刺激量动态更新函数, 减少了 Agent 团队工作量的超调量、通信量与偏差收敛时的迭代次数。仿真结果表明, 在 Agent 团队规模分别为 40 个与 100 个时, 改进的合同网算法相比传统合同网算法的整体效能分别提高了 41.1% 与 83.1%; 在 Agent 团队规模为 40 个时, 额外设置 3 组刺激量更新函数, 基于 PID 算法的刺激量动态更新函数的工作量超调量相比第 2 组函数、第 3 组函数分别降低了 24.5%、9.5%, 在迭代次数方面, 相比第 1 组函数、第 3 组函数分别降低了 84.3%、84.8%; 在 Agent 团队规模分别为 20、40、100 个时, 改进的合同网算法的通信量相比传统合同网算法减少了 49.1%、63.7%、72.4%。验证实验表明, 由改进的合同网算法进行任务分配的通信量与工作量超调量较传统合同网算法分别减少了 70.0% 与 20.2%, 整体效能比传统合同网算法增加了 14.1%, 且改进的任务分配算法能保证参加工作的 Agent 群在规定的时限要求内完成对工作区域的 100% 覆盖。

关键词: 异质农业; Agent; 任务分配; 合同网算法; 刺激响应模型; 增量式 PID 算法

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)05-0142-09

OSID:



Task Assignment Strategy of Heterogeneous Agricultural Agent Groups Based on Dynamic Stimulus Response Model

GONG Jinliang¹ WANG Wei¹ ZHANG Yanfei² LAN Yubin²

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

(2. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: Aiming at the problems of difficult cooperative control and low working efficiency of agricultural Agent groups, the task assignment of agricultural heterogeneous Agent groups was researched based on improved stimulus response model. A layered hybrid multi-Agent architecture based on acquaintance net and the cloud platform-edge server collaborative computing system was established. The stimulus response model of ant colony algorithm was applied to the traditional contract network algorithm, and the adaptive bidding strategy was established to limit the number of bidding Agents and reduce the communication burden of the system. Based on the heterogeneity of agricultural Agents, the efficiency model of task assignment was established, by constructing time-varying coefficient and time matrix, the dynamic trust function and response threshold design method based on direct trust and recommendation-based trust were established to optimize the overall efficiency of agricultural Agent groups. Through increment PID algorithm and integral separated threshold, the adaptive stimulus update function was established to reduce the number of iterations, which reduced the workload of the Agent team overshoot, traffic and the number of iterations when the deviance was converged. The simulation results showed that

收稿日期: 2020-08-16 修回日期: 2020-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(61303006)、山东省引进顶尖人才“一事一议”专项经费项目、山东省重点研发计划项目(2019GNC106127)和淄博市重点研发计划项目(2019ZBXC200)

作者简介: 宫金良(1976—),男,副教授,博士,主要从事多机器人协同作业与多智能体系统研究, E-mail: gjlwing@qq.com

通信作者: 张彦斐(1977—),女,教授,博士,主要从事天-空-地一体化机器人协同理论研究, E-mail: 84374294@qq.com

when the Agent team size was 40 and 100 respectively , the overall efficiency of the improved contract network algorithm was 41. 1% and 83. 1% higher than that of the traditional contract network algorithm. When the Agent team size was 40 , three sets of stimulus update functions were set in addition. The workload overshoot of the stimulus update function based on PID algorithm was reduced by 24. 5% and 9. 5% respectively compared with the second group and the third group. In terms of iteration times , it was reduced by 84. 2% and 84. 8% compared with the first group and the third group. When the Agent team size was 20 , 40 and 100 respectively , the traffic of the improved contract network algorithm was reduced by 49. 1% , 63. 7% and 72. 4% compared with the traditional contract network algorithm. Experimental verification showed that the traffic and workload overshoot of task allocation by the improved contract net algorithm was reduced by 70. 0% and 20. 2% compared with the traditional contract net algorithm , the overall efficiency was increased by 14. 1% compared with the traditional contract net algorithm , and improved task allocation algorithm could guarantee that the Agent groups at work could achieve full coverage of the work area within the prescribed time limits.

Key words: heterogeneous agricultural; Agent; task assignment; contract network algorithm; stimulus response model; increment PID algorithm

0 引言

数字生态循环农业农场以其生态化保护、无人化作业、精准化种养、智能化决策的特点将成为未来农业发展的主流方向^[1]。一个数字生态循环农业农场将涉及耕、种、管、运等方面至少 30 类以上由农场云平台提供智能算法服务的农业机器人,即农业 Agent。由于缺乏统一的协同管理调度^[2-4],农业 Agent 使用效率和生产效能将受到极大限制,数字生态循环农业农场中多 Agent 的任务分配问题^[5-7]亟待解决。

合同网算法是任务分配方式中最重要的一种^[8-11]。针对传统合同网模型招标阶段通信量大的问题^[12-15],文献[16]采用基于任务熟人集和信任度的方式对候选 Agent 进行筛选,该方案受首次任务分配结果影响较大,可提高任务分配效率,但难以得到任务分配的最优解;文献[17]在传统合同网协议的基础上通过引入信任度与惩罚机制来减少通信量。以上通过信任度限制投标 Agent 的数量容易引起 Agent 的过度损耗。针对复杂多变环境中 Agent 任务分配效率低的问题,文献[18]将代价最小、效能最大作为任务分配的目标,并限制了允许分配的最大任务数,以减小计算的复杂度,该方案可优化任务分配的效能与系统计算复杂度,但并未优化任务分配粒度的选择依据;文献[19]通过将承诺期限加入合同网来适应任务环境的动态变化;文献[20]从协商目标、协商协议、协商策略和协商处理 4 个方面建立扩展的合同网模型理论。以上方案增加了 Agent 群任务分配的灵活性与鲁棒性,但并未考虑采用合同网算法进行任务分配时通信量对系统负载的影响。

本文建立分层混合式 Agent 群体系架构,将蚁

群算法的刺激响应模型与传统合同网算法相结合,建立自适应招标策略,并改进刺激响应模型中的响应阈值设计方法与刺激量动态更新函数,以减少合同网算法任务分配时对系统的通信负载,提高 Agent 群任务分配的整体效益。

1 分层混合式 Agent 群体系架构

数字生态循环农业农场中农业 Agent 的多元异构传感信息融合、避障导航、路径规划等复杂功能均被转移到云平台与边缘服务器,农业 Agent 只需配备简单的网络设备和基本的传感器就可以完成复杂的服务任务。数字生态循环农业即以云边协同计算系统驱动农业 Agent 工作以实现自动化运转和智能化调节。

本文将集中式任务分配算法与分布式任务分配算法优势互补,在传统合同网算法的基础上建立基于云边协同计算系统的分层混合式 Agent 群体系架构,如图 1 所示。

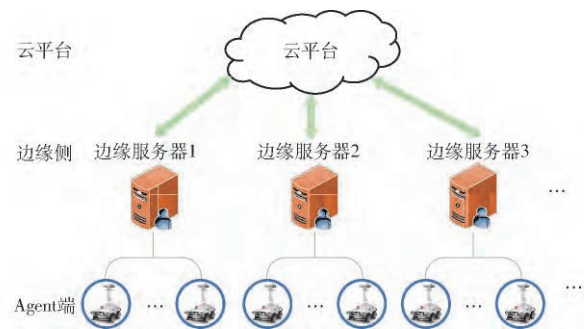


图 1 分层混合式 Agent 群系统体系架构图

Fig. 1 Architecture diagram of layered hybrid Agent groups system

在本架构中,农场工作人员通过云平台人机交互界面下达耕、种、管、收、贮、运等工作任务的的工作量与任务农田工作区域等信息,云平台继而将

某一工作属性的系统级工作量均分至各边缘服务器。

边缘服务器在数字生态循环农业农场中的部署位置相比云平台更靠近 Agent 端,故边缘服务器控制 Agent 群开展农情信息监测、农田全区域覆盖等工作时具有更实时的信息传输速度。在异质农业 Agent 群任务分配的过程中各边缘服务器作为管理者负责向 Agent 端中的 Agent 发布招标信息以集中式架构形成工作小组以及根据收到的招标信息做出中标决策,并与云平台同步记录及更新 Agent 熟人网,包括 Agent 的工作效率、能耗、故障率、服务质量、历史任务量等数据。Agent 端中各 Agent 作为合同者向上发送投标信息。

Agent 群在农场工作过程中若出现 Agent 机械故障,或农场工作人员临时增加/取消农田工作区域与临时增加/缩短工作时限要求等问题时,可基于本文局部集中、全局分布的分层混合式 Agent 群体体系架构采用工作小组内部调整、管理者间发布求助信息、云平台重新规划任务量等方式灵活地完成任务重分配过程。

2 自适应招标策略与中标决策

2.1 基于蚁群算法的自适应招标策略

基于蚁群算法的刺激响应模型^[21-23]设置自适应招标策略以限制投标 Agent 的数量、减少系统的通信压力。

设管理者 a 发出强度为 S 的刺激量,合同者 i 对该刺激响应阈值为 θ_i^a ,则合同者 i 对该刺激做出反应的概率为

$$P(\theta_i^a, S) = \frac{S^2}{S^2 + (\theta_i^a)^2} \quad (1)$$

管理者通过熟人网计算各合同者的响应阈值,要求工作量 W_d 未被满足之前不断迭代增加刺激量强度,向响应阈值小于刺激量的合同者发布招标信息。

2.2 中标决策

出于对农场中可能出现恶劣天气以及防止延误农作物农时的考虑,数字生态循环农业农场中发布的工作任务通常具有任务时限要求 H ,而农业 Agent 在农场中时剩余电量使用时间 t_e 也动态变化,故合同者 i 在收到招标信息之后,向管理者发送即时投标信息,即 t_e ,管理者接收到投标信息之后根据 H 以及熟人网记录的合同者 i 的工作效率 E_i ,计算合同者 i 的理论工作量 W_i 为

$$W_i = \begin{cases} E_i t_e & (t_e \leq H) \\ E_i H & (t_e > H) \end{cases} \quad (2)$$

刺激量前 k 次迭代中已投标合同者组成的联盟 N 理论工作量总和 W_N^k 计算式为

$$W_N^k = W_N^{k-1} + \sum_{o=b}^r W_o \quad (3)$$

式中 o ——第 k 次刺激量迭代中响应阈值小于当前刺激量的合同者

b ——第 k 次刺激量迭代中响应阈值小于当前刺激量的第 1 个合同者

r ——第 k 次刺激量迭代中响应阈值小于当前刺激量的最后 1 个合同者

W_o ——合同者 o 的工作量

则当前工作量偏差 $e(k)$ 为

$$e(k) = W_d - W_N^k \quad (4)$$

在偏差 $e(k) \leq 0$ 时,刺激量停止增加,否则继续迭代。已投标各合同者的实际工作量 W^1 由其理论工作量与任务分配结束后 Agent 联盟总理论工作量 W_N 决定,合同者 i 的实际工作量 W_i^1 为

$$W_i^1 = W_d \frac{W_i}{W_N} \quad (5)$$

3 动态响应阈值设计方法与刺激量更新函数

3.1 基于 Agent 异质性的响应阈值设计

数字生态循环农业不仅可以实现多个同类型农业 Agent 之间协同作业以完成复杂且繁重的工作任务,而且其农场中包含由云边协同计算系统为其提供智能算法服务的耕地机器人、高地隙喷药机器人、植保无人机、自动导航收获机等种类繁多的大型高端农业 Agent。为减少各 Agent 的工作耗损累积与 Agent 团队总能量消耗,保证 Agent 团队工作的可靠性与工作质量,本文将 Agent i 参加管理者 a 工作的历史任务量 h_i^a 、能耗 c_i^a 、故障率 f_i^a 、服务质量指标 p_i^a 4 个方面作为 Agent i 异质性^[24]的评价依据,并在考虑农业 Agent 异质性的基础上从团队整体效能最优的角度出发建立 Agent 的动态信任度与响应阈值数学模型。

通过完成任务的收益(reward)减去相应的代价(cost)定义 Agent 完成任务的效能,合同者 i 参加管理者 a 的任务效能 U_i^a 计算式为

$$U_i^a = \text{reward}(p_i^a) - \text{cost}(h_i^a) - \text{cost}(c_i^a) - \text{cost}(f_i^a) \quad (6)$$

式中 $\text{reward}(p_i^a)$ ——以 Agent 服务质量代表任务分配的收益

$\text{cost}(h_i^a)$ ——以 Agent 历史工作量代表任务分配的代价

$\text{cost}(c_i^a)$ ——以 Agent 能耗代表任务分配的代价

$\text{cost}(f_i^a)$ ——以 Agent 故障率代表任务分配的代价

农业 Agent 在农场中的长期工作将导致 Agent 某些机械结构耗损累积,随之带来其能耗的增加与服务质量的下降,故合同者在早期工作中的能耗与服务数据会很快过时。为保证管理者进行中标决策时合理评估以上 2 种数据的可靠性,在边缘服务器与云平台的熟人网中建立合同者 i 工作次数为 n ($n \in [q, z]$) 的时间矩阵

$$V^i = [V_{11}^i \quad V_{12}^i \quad \dots \quad V_{1n}^i] \quad (7)$$

式中 V_{1n}^i ——合同者 i 第 n 次工作时间

V^i ——时间矩阵

用以记录合同者 i 历次为管理者 a 工作的时间节点,在此基础上引入时变系数 $\omega(n)$ 的概念

$$\omega(n) = \omega^{-V_{1n}^i} \quad (8)$$

4 组参数取值范围差异较大,为方便调节 4 个参数的权重,引入参加过管理者 a 的任务的全部合同者 ρ ($\rho \in [l, m]$) 的工作数据,将除故障率之外的 3 组参数的值控制在 0 ~ 1,则更新后的合同者 i 参加管理者 a 的任务的收益与代价为

$$\text{reward}(p_i^a) = \frac{\sum_{n=q}^z p_i^{a,n} \omega^{-V_{1n}^i}}{\sum_{\rho=l}^m \sum_{n=q}^z p_\rho^{a,n} \omega^{-V_{1n}^\rho}} \quad (9)$$

$$\text{cost}(h_i^a) = \frac{\sum_{n=q}^z h_i^{a,n}}{\sum_{\rho=l}^m \sum_{n=q}^z h_\rho^{a,n}} \quad (10)$$

$$\text{cost}(c_i^a) = \frac{\sum_{n=q}^z c_i^{a,n} \omega^{-V_{1n}^i}}{\sum_{\rho=l}^m \sum_{n=q}^z c_\rho^{a,n} \omega^{-V_{1n}^\rho}} \quad (11)$$

$$\text{cost}(f_i^a) = f_i^a \quad (12)$$

由于效能可能出现负值,为方便后期刺激量的调整,建立合同者 i 参加管理者 a 组织的历次任务的直接信任度 $L_i^{1,a}$ 模型,以比值的形式代替效能计算公式中的差值,即

$$L_i^{1,a} = \frac{\varphi_1 \text{reward}(p_i^a)}{\varphi_2 \text{cost}(h_i^a) + \varphi_3 \text{cost}(c_i^a) + \varphi_4 \text{cost}(f_i^a)} \quad (13)$$

其中 $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 = 1$

式中 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ ——权重因子

通过合同者 i 参加其他管理者 v ($v \in [w, x]$) 的任务而产生的直接信任度之和建立基于推荐的信任度模型 L_i^2 ,即

$$L_i^2 = \sum_{v=w}^x L_i^{1,v} \quad (14)$$

综上,合同者 i 对于管理者 a 的信任度 $L_i^{1,a}$ 与基于推荐的信任度 L_i^2 根据合同者 i 的最新工作参数与历次工作参数动态确定,综合考虑 $L_i^{1,a}$ 与 L_i^2 来定义合同者 i 对于管理者 a 的动态信任度 L_i^a 为

$$L_i^a = \lambda_1 L_i^{1,a} + \lambda_2 L_i^2 \quad (15)$$

其中 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$

式中 λ_1, λ_2 ——权重因子

合同者的动态信任度越大其响应阈值越低,越有机会收到招标信息。则合同者 i 相对于管理者 a 的响应阈值 θ_i^a 为

$$\theta_i^a = (L_i^a)^{-1} \quad (16)$$

3.2 基于 PID 控制的刺激量动态更新函数

刺激量的增加会引起 W_N 的增加,但二者之间并无准确的函数映射关系。刺激量增长速度过快则容易引起 W_N 的严重超调,意味着更多农业 Agent 参加工作,导致 Agent 资源的浪费并增加了后期 Agent 群协同作业时多 Agent 全区域覆盖、协同避碰的复杂度;刺激量增长速度过慢则降低算法的工作效率。本文通过引入 PID 算法自动控制的思想^[25-27] 设置刺激量的动态变化模型。

PID 算法的工作流程图如图 2 所示。

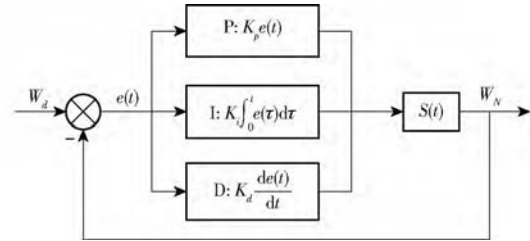


图 2 PID 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of PID algorithm

其中以迭代次数 k 与迭代周期 T 的乘积代表连续时间 t , $S(t)$ 表示经过 PID 控制算法调整之后的刺激量输出值, W_d 与 W_N 分别表示 PID 算法的给定值与测量值,刺激量更新公式为

$$S(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_1} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (17)$$

式中 T_1 ——积分时间常数

T_D ——微分时间常数

K_p ——比例增益

将式(17)离散化,其中积分作用通过偏差累积求和的形式代替,微分作用通过差分的形式代替,比例作用不变,即

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \approx T \sum_{j=0}^k e(j) \quad (18)$$

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (19)$$

离散化的刺激量更新公式为

$$S(k) = K_p \left[e(k) + \frac{T}{T_1} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} (e(k) - e(k-1)) \right] = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d (e(k) - e(k-1)) \quad (20)$$

其中 $K_i = K_p T / T_1$ $K_d = K_p T_D / T$

式中 K_i ——积分增益 K_d ——微分增益

位置式 PID 算法的积分作用可以实现偏差累积用以消除稳态误差,而本系统中不会存在稳态误差,且积分作用太强会使系统超调加大。所以本文采用增量式 PID 算法,增量式 PID 算法的刺激量增量 $\Delta S(k)$ 只与前 2 次迭代的偏差有关,故不存在偏差累积。

$$\Delta S(k) = S(k) - S(k-1) \quad (21)$$

$$\Delta S(k) = K_p (e(k) - e(k-1)) + K_i e(k) + K_d (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (22)$$

为避免超调量过大,设置积分项开关系数 β ,使得

$$\Delta S(k) = K_p (e(k) - e(k-1)) + \beta e(k) + K_d (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (23)$$

$$\text{其中 } \beta = \begin{cases} K_i & (e(k) > \varepsilon) \\ 0 & (e(k) \leq \varepsilon) \end{cases} \quad (24)$$

式中 ε ——积分分离阈值

为方便调节 PID 算法的 3 个参数,在式(23)的基础上增加变量 $R = 0.1 / W_d$,令 $K_p = K_p R$ 、 $K_i = K_i R$ 、 $K_d = K_d R$ 。则更新后的刺激量增量为

$$\Delta S(k) = K_p (e(k) - e(k-1)) + \beta e(k) + K_d (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (25)$$

$$\text{其中 } \beta = \begin{cases} K_i & (e(k) > \varepsilon) \\ 0 & (e(k) \leq \varepsilon) \end{cases} \quad (26)$$

4 算法仿真与实验验证

本文设置分别包含 20、40、100 个 Agent 的 3 组 Agent 团队,给定不同团队规模下要求工作量 (hm^2)、任务时限要求 (min)、各 Agent 参加任务的故障率 (取值范围: $[0, 1]$)、工作效率 (hm^2/h)、能耗 (W)、服务质量指标 (取值范围 $[0, 100]$)、历史任务量 (hm^2) 等历史数据以及剩余电量使用时间 (min)。

算法仿真运行操作系统为 Win10 1903,处理器为 Intel(R) Pentium(R) CPU G2030 @ 3.00 GHz,采用 Matlab 软件进行仿真实验。

4.1 改进的合同网算法的效能仿真

针对 3.1 节中定义的效能公式,选择 Agent 群团队为 40 个与 100 个时比较改进的合同网算法与

传统合同网算法的效能差异。

4 种性能参数权重因子均取 0.25,直接信任度与基于推荐的信任度权重因子均取 0.5。每种团队规模下要求工作量分别取该 Agent 团队总理论工作量的 75%、50%,即 40 个 Agent 时,要求工作量取 26.1、17.4 hm^2 ,100 个 Agent 时,要求工作量取 91.4、60.9 hm^2 。

定义任务分配结束后合同者 s ($s \in [g, \vartheta]$) 的效能 U_s 为

$$U_s = U_s^a + \sum_{v=u}^x U_s^v \quad (27)$$

式中 U_s^a ——合同者 s 参加管理者 a 工作的效能

U_s^v ——合同者 s 参加管理者 v 工作的效能

任务分配结束后的团队整体效能 U 为

$$U = \sum_{s=g}^{\vartheta} U_s \quad (28)$$

改进的合同网算法与传统合同网算法在任务分配结束后整体效能如表 1 所示。

表 1 不同 Agent 团队规模与工作量下两种算法的整体效能

Tab. 1 Overall performance of two algorithms under different Agent groups size and workload

算法	Agent 群团队规模/个; 要求工作量/ hm^2			
	40; 26.1	100; 91.4	40; 17.4	100; 60.9
改进算法	-1.17	-0.89	-0.96	-0.29
传统算法	-1.49	-2.00	-1.63	-1.72

由表 1 可以看出,Agent 群团队规模为 40、要求工作量为团队总理论工作量的 75% 时,改进的合同网算法相比传统合同网算法的整体效能提高了 21.5%,而在要求工作量为总工作量的 50% 时,整体效能则提高了 41.1%,证明更低的要求工作量代表需要更少的 Agent 参与工作,本文设置的改进算法以及全局分布、局部集中的 Agent 架构更能发挥寻找最优解的优势。

在团队规模为 100 个、要求工作量为团队总理论工作量的 75% 时,改进算法相比传统算法的整体效能提高了 55.5%,而在要求工作量为总理论工作量的 50% 时,则提高了 83.1%。两组数据均高于团队规模为 40 个时的 21.5% 与 41.1%,证明在 Agent 规模逐渐增大时本文设置的算法改进方案具有更佳的寻优能力。

4.2 PID 参数调节

选择 Agent 团队规模为 40 个,要求工作量设置为 26.7 hm^2 ,迭代次数为 500。通过调试不同的 PID 参数,观察一个管理者进行招标时团队工作量变化曲线,选择收敛性最好、超调量最低的 PID 参数。将

第 1 组 PID 参数设置为: $K_p = 0.1, K_I = 0.1, K_D = 0.1$; 第 2 组 PID 参数: $K_p = 1, K_I = 1, K_D = 1$; 第 3 组 PID 参数: $K_p = 1, K_I = 2, K_D = 1$ 。Agent 团队的工作量变化曲线如图 3 所示, 积分作用过高导致第 3 组参数出现超调的现象, 故降低积分作用, 将第 4 组 PID 参数设置为 $K_p = 1, K_I = 1.5, K_D = 1$, 此时的工作量曲线在迭代前收敛, 收敛性能较第 2 组曲线提高了 50%, 且未出现超调的现象。

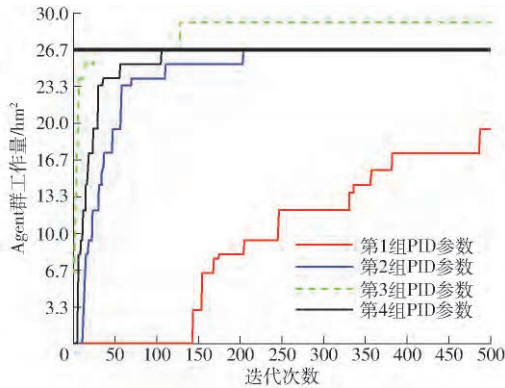


图 3 不同 PID 参数的工作量变化曲线

Fig. 3 Workload variation curves of different PID parameters

如图 4 所示, 将 PID 参数分别设置为 1、3、1, 则出现工作量超调的现象, 此时引入积分分离阈值, 设 $\varepsilon = 20$, 则工作量曲线在第 37 次迭代时提前收敛, Agent 团队总工作量未达到工作量要求; 将 ε 设置为工作量的 1/5, 即 $\varepsilon = 8$, 此时工作量未出现超调现象, 且在第 73 次迭代时即收敛。

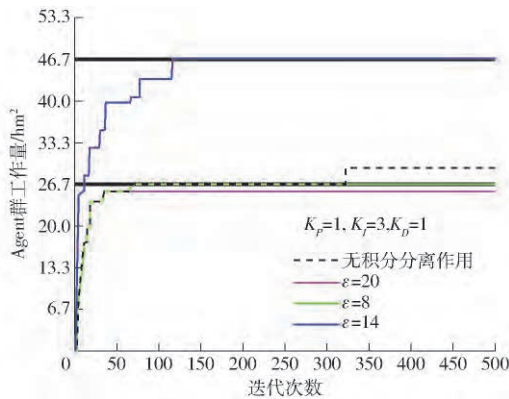


图 4 不同积分分离阈值下工作量变化曲线

Fig. 4 Workload variation curves under different integral separation thresholds

选择 Agent 团队规模为 100 个, 将要求工作量设置为 46.7 hm^2 , PID 参数 K_p, K_I, K_D 分别为 1、3、1, 积分分离阈值同样为工作量的 1/5, 即 $\varepsilon = 14$, 工作量变化曲线如图 4 所示, 工作量超调量与迭代速度均为理想效果, 证明本文设置的 PID 参数以及积分分离阈值设计方法对于不同 Agent 团队规模以及要求工作量具有普遍适用性。

图 4 中 $\varepsilon = 8$ 时 Matlab 程序运行时间为 0.059 s ,

以此运行时间为准, 额外设置 3 组简单的刺激量更新函数, 对比其自动控制效果与 PID 控制算法的优劣。3 组函数的设置方法为 $S_1(k) = S_1(k-1) + 0.1, S_2(k) = 1.5S_2(k-1) + 0.1, S_3(k) = S_3(k-1) + 2Re(k)$, 工作量变化曲线如图 5 所示。

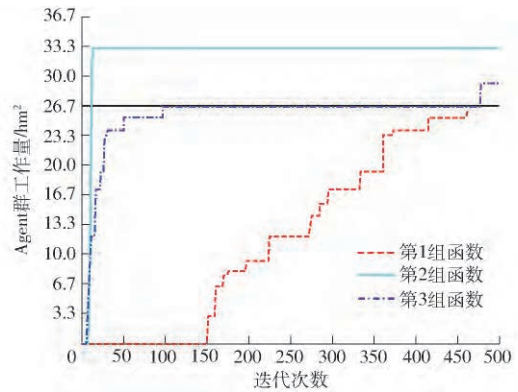


图 5 3 组刺激量更新函数的工作量变化曲线

Fig. 5 Workload change curves of stimulus update functions in three groups

定义工作量超调量 O 的数学模型: $O = \frac{u_{\max}(k) - W_d}{W_d} \times 100\%$, 其中 $u_{\max}(k)$ 为工作量的最大

输出值。通信量 Q 由通信次数 Q_1 与通信参数个数 Q_2 组成: $Q = Q_1 Q_2$ 。统计相同算法运行时间下基于 PID 算法的刺激量动态更新函数与另外 3 组简单函数在工作量超调量、通信量以及曲线收敛时的迭代次数方面的差异, 如表 2 所示。

表 2 4 种刺激量更新函数的比较

Tab. 2 Comparison of four stimulus update functions

仿真指标	本文更新函数	S_1	S_2	S_3
超调量/%	0	-0.5	24.5	9.5
迭代次数	73	464	20	480
通信量	90	87	105	96

由表 2 可以看出, 本文设置的基于 PID 控制算法的刺激量动态更新函数在超调量方面均优于另外 3 组函数, 且收敛时的迭代次数分别比额外设置的第 1 组函数与第 3 组函数降低了 84.3% 与 84.8%, 第 2 组函数虽收敛速度很快, 但超调量与通信量皆是 4 组函数中最高的。此外, 多次调节 3 组函数的系数效果均不理想。

4.3 2 种算法的通信量比较

给定 3 种 Agent 群团队规模下系统要求工作量分别为 $7.0, 26.7, 46.7 \text{ hm}^2$, 在改进的合同网算法中设置 7 个管理者 A ~ G。

以算法运行时间一致来制定改进的合同网算法与传统合同网算法的各种参数, 2 种算法 Agent 团队通信量如表 3 所示。

表3 不同 Agent 团队规模下 2 种算法的通信量

Tab.3 Traffic of two algorithms under different Agent group sizes

Agent 团队 规模/个	改进的合同网算法							总计	传统合同网 算法
	管理者 A	管理者 B	管理者 C	管理者 D	管理者 E	管理者 F	管理者 G		
20	6	3	15	9	6	12	6	57	112
40	15	15	18	12	6	21	3	90	248
100	9	18	27	24	21	6	21	126	456

由表 3 可以看出,传统合同网算法的通信量随着 Agent 团队规模的增大而急剧上升,改进的合同网算法的通信量在不同 Agent 团队规模下分别比传统合同网算法减少了 49.1%、63.7%、72.4%,在 Agent 团队规模 2 次增大的过程中,改进的合同网算法的通信量增长速度分别是传统合同网算法的 0.477 倍与 0.476 倍,由此可见,改进的合同网算法在面对更大问题规模时系统通信量更少,通信量增长速度更慢。

4.4 实验验证

在农场农业生产过程中,通过搭载 RMONCAM HD600 型红外摄像头的信息采集 Agent 在农田中遍历,可采集农田中农作物不同生长阶段的生长状况与病虫害信息。本文通过山东理工大学与淄博禾丰种业公司合作共建的数字生态循环农业农场中的农田信息采集农业 Agent 进行任务分配与实地全遍历实验,实验地点为山东理工大学图书馆南侧草坪。

本实验的要求工作量为 0.8 hm²,工作时限要求为 30 min。通过改进的合同网算法从现有 10 台信息采集 Agent 中选出 4 个 Agent 参加工作,任务分配 4 种性能参数权重因子均取 0.25,直接信任度与基于推荐的信任度权重因子均取 0.5;PID 参数 K_p、K_i、K_d 分别设置为 1、3、1,积分分离阈值取 8。改进的合同网算法与传统合同网算法对本实验的任务分配结果对比如表 4 所示。

表 4 实验任务分配结果对比

Tab.4 Comparison of experimental task assignment results

算法	通信量	Agent 数量/个	工作量超调量/%	整体效能
改进算法	12	4	15.0	-0.73
传统算法	40	5	18.8	-0.85

由表 4 可知,本次任务分配实验中改进的合同网算法的通信量与工作量超调量较传统合同网算法减少了 70.0%与 20.2%,整体效能相比传统合同网算法增加了 14.1%。

4 个 Agent 工作效率分别为 0.54、0.39、0.43、0.47 hm²/h,各 Agent 工作量与 Agent 团队实时工作数据通过云平台人机交互界面呈现,如图 6 所示。

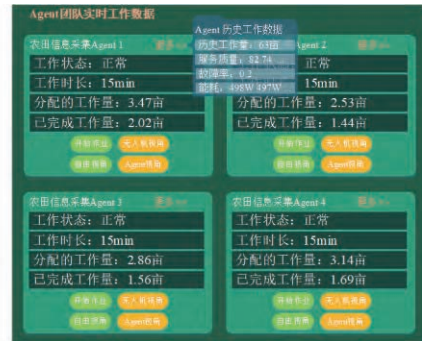


图 6 Agent 任务分配结果与实时工作数据

Fig.6 Agent task assignment result and real-time working data

其中 4 个 Agent 的投标信息中剩余电量使用时间均大于本实验的时限要求;各 Agent 均搭载工作视角为 120°的摄像头,因各 Agent 中摄像头安装高度不同,故本实验通过调节摄像头的安装角保证 4 个 Agent 的对地工作范围均为 1 m。根据任务分配结果以及本团队前期研究成果——复杂环境下异质农业机器人全区域覆盖方案划分各 Agent 工作区域。

4 个农田信息采集 Agent 的实地实验如图 7 所示,①~④对应 Agent 1~4。



图 7 Agent 群现场遍历图

Fig.7 Agent groups site traversal diagram

各 Agent 从起点(整体工作区域左下角顶点)出发,以最短的距离进入其工作区域,并在完成对其工作区域的全覆盖之后以最短的距离驶出工作区域且返回至起点。通过各信息采集 Agent 实时回传至云平台的工作信息统计各 Agent 的实际遍历面积、对原定工作区域的覆盖率、面积重复率以及完成工作的实际工作时间如表 5 所示。其中实际遍历面积表示 Agent 从进入草坪至驶出草坪全过程中遍历的面积;覆盖率表示 Agent 遍历全过程中遍历的区域对

原定工作区域的覆盖程度; 面积重复率表示实际遍历面积与原定工作量的重复程度; 实际工作时间为 Agent 从起点至遍历完其工作区域经历的时间。

表 5 各 Agent 工作数据统计
Tab. 5 Working data statistics of Agents

云端工作数据	Agent 1	Agent 2	Agent 3	Agent 4
实际遍历面积/hm ²	0.24	0.18	0.20	0.22
覆盖率/%	100	100	100	100
面积重复率/%	3.61	5.60	3.70	4.56
实际工作时间/min	25.71	26.28	26.93	27.34

本文通过式(5)根据各 Agent 的理论工作量计算其实际工作量, 则 Agent 实际工作量小于等于理论工作量, 故各 Agent 遍历时若无路径重复或路径重复率较低, 则可能出现表 5 中实际工作时间小于时限要求的情况。由表 5 可以看出, 参加工作的各 Agent 均能实现对各自工作区域的 100% 覆盖, 且均能在要求的工作时间内完成遍历任务。

5 结论

(1) 通过建立 Agent 群团队的收益与代价模型,

将农业 Agent 在能耗、故障率、历史任务量以及服务质量方面的差异映射到 Agent 动态信任度模型与响应阈值设计方法中, 以实现团队整体效能的最优。结果表明, 在不同要求工作量下, 团队规模为 40 个时, 改进的合同网算法相比传统合同网算法的整体效能分别提高了 21.5%、41.1%。在团队规模为 100 个时, 改进的合同网算法相比传统合同网算法的整体效能分别提高了 55.5%、83.1%。任务分配实验结果表明, 改进的合同网算法比传统合同网算法的整体效能提高了 14.1%。

(2) 结合合同网招标过程定义增量式 PID 算法的输出值、给定值与测量值, 研究基于增量式 PID 算法的刺激量动态更新函数, 并通过引入积分开关项系数与积分分离阈值降低工作量、超调量及收敛时的迭代次数。结果表明, 本文设置的刺激量动态更新函数的综合性能优于额外设置的 3 组函数, 且改进的合同网算法的通信量在不同 Agent 团队规模下分别比传统合同网算法减少了 49.1%、63.7%、72.4%。验证实验表明, 改进的合同网算法比传统合同网算法的通信量、工作量超调量分别减少了 70.0%、20.2%。实地全遍历实验表明, Agent 群能够在规定的时限要求内完成对工作区域的 100% 覆盖。

参 考 文 献

- [1] LAN Yubin, CHEN Shengde. Current status and trends of plant protection UAV and its spraying technology in China [J]. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 2018, 1(1): 1-9.
- [2] HU Jie, YANG Jiacheng. Application of distributed auction to multi-UAV task assignment in agriculture [J]. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 2018, 1(1): 44-50.
- [3] NIKITENKO A, LAVENDELIS E, EKMANIS M, et al. Task allocation methods for homogeneous multi-robot systems: feed pushing case study [J]. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2018, 52(5): 371-381.
- [4] KRIEGER M, BILLETTER J B, KELLER L. Ant-like task allocation and recruitment in cooperative robots [J]. *Nature*, 2000, 406: 992-995.
- [5] BLENDER T, BUCHNER T, FERNANDEZ B, et al. Managing a mobile agricultural robot swarm for a seeding task [C]// *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2016: 6879-6886.
- [6] TESLYA N, SMIRNOV A, IONOV A, et al. Multi-robot coalition formation for precision agriculture scenario based on gazebo simulator [C]// *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*, 2020: 329-341.
- [7] 李凯, 左春荣, 任明仑. 基于 Agent 的同类机智能调度算法 [J]. *农业机械学报* 2009, 40(2): 184-189.
LI Kai, ZUO Chunrong, REN Minglun. Agent based intelligent algorithm for uniform parallel machine scheduling problem [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(2): 184-189. (in Chinese)
- [8] 李淑琴. 面向任务的多 Agent 系统的组织设计研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
LI Shuqin. Study on organization of task-oriented multi-robot system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [9] 李娟, 张昆玉. 基于改进合同网算法的异构多 AUV 协同任务分配 [J]. *水下无人系统学报* 2017, 25(6): 418-423.
LI Juan, ZHANG Kunyu. Heterogeneous multi-AUV cooperative task allocation based on improved contract net algorithm [J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2017, 25(6): 418-423. (in Chinese)
- [10] YEUNG W L. Efficiency of task allocation based on contract net protocol with audience restriction in a manufacturing control application [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2018, 31(10): 1005-1017.
- [11] 肖玉杰, 李杰, 刘方. 基于合同网的分布式动态任务分配算法 [J]. *舰船科学技术* 2015, 37(3): 113-118.
XIAO Yujie, LI Jie, LIU Fang. Distributed dynamic task assignment algorithm based on CNP [J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(3): 113-118. (in Chinese)
- [12] 马斌奇. 多 Agent 协作与控制策略研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.

- [13] LIU Ning , GAO Feyan. Research on the negotiation strategy of multi-Agent based on extended contract net [C]//Proceedings of International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications ,2009: 11 – 18.
- [14] 李明 刘玮 张彦铎. 基于改进合同网协议的多 Agent 动态任务分配 [J]. 山东大学学报(工学版) 2016 ,46(2) : 51 – 56.
LI Ming , LIU Wei , ZHANG Yanduo. Multit-Agent dynamic task allocation based on improved contract net protocol [J]. Journal of Shandong University(Engineering Science) ,2016 ,46(2) : 51 – 56. (in Chinese)
- [15] 李新亮 翟江涛 戴跃伟. 动态环境下基于改进合同网的多 Agent 任务分配算法 [J]. 科学技术与工程 ,2013 ,13(27) : 8014 – 8019.
LI Xinliang , ZHAI Jiangtao , DAI Yuewei. A task allocation algorithm base on improved contract net protocol under the dynamic environment [J]. Science Technology and Engineering ,2013 ,13(27) : 8014 – 8019. (in Chinese)
- [16] 赵新宇 林作铨. 合同网协议中的 Agent 可信度模型 [J]. 计算机科学 2006 ,33(6) : 150 – 153.
ZHAGN Xinyu , LIN Zuoquan. DOC: the degree of credibility model in contract net protocol [J]. Computer Science ,2006 ,33(6) : 150 – 153. (in Chinese)
- [17] AARTI S , DIMPLE J. Introducing trust establishment protocol in contract NET protocol [C]//2010 International Conference on Advances in Computer Engineering ,2010: 59 – 63.
- [18] FANG T , PARKER L E. A complete methodology for generating multi-robot task solutions using ASyMTRe – D and market-based task allocation [C]//2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation ,2007: 3351 – 3358.
- [19] LEE K J , CHANG Y S , LEE J K. Time-bound negotiation framework for electronic commerce agents [J]. Decision Support Systems ,2000 ,28(4) : 319 – 331.
- [20] 马巧云. 基于多 Agent 系统的动态任务分配研究 [D]. 武汉: 华中科技大学 2006.
MA Qiaoyun. Research on dynamic task allocation based on MAS [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology ,2006. (in Chinese)
- [21] 王英聪 张领. 一种面向空间分配问题的群智能劳动分工新方法 [J]. 系统工程理论与实践 2020 ,40(5) : 1304 – 1316.
WANG Yingcong , ZHANG Ling. A new method of group intelligent division of labor for spatial allocation problem [J]. Systems Engineering-Theory & Practice ,2020 ,40(5) : 1304 – 1316. (in Chinese)
- [22] 贺政纲 黄娟 帅宇红. 基于蚁群劳动分工的多式联运利益分配研究 [J]. 铁道学报 2018 ,40(11) : 19 – 26.
HE Zhenggang , HUANG Juan , SHUAI Yuhong. Research on benefit allocation of multimodal transport based on ant colony's labor division [J]. Journal of the China Railway Society ,2018 ,40(11) : 19 – 26. (in Chinese)
- [23] LOPE J D , MARAVALL D , QUINONEZ Y. Response threshold models and stochastic learning automata for self-coordination of heterogeneous multi-task distribution in multi-robot systems [J]. Robotics and Autonomous Systems ,2013 ,61(7) : 714 – 720.
- [24] ROLDÁN J J , AUNON P G , GARZÓN M , et al. Heterogeneous multi-robot system for mapping environmental variables of greenhouses [J]. Sensors ,2016 ,16(7) : 1018.
- [25] 齐文超 李彦明 张锦辉,等. 丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊 PID 控制方法 [J/OL]. 农业机械学报 ,2019 ,50(10) : 17 – 23 ,34.
QI Wenchao , LI Yanming , ZHANG Jinhui , et al. Double closed loop fuzzy PID control method of tractor body leveling on hilly and mountainous areas [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery ,2019 ,50(10) : 17 – 23 ,34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191002&flag=1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 10. 002. (in Chinese)
- [26] 陈满 鲁伟 汪小昆,等. 基于模糊 PID 的冬小麦变量追肥优化控制系统设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报 ,2016 ,47(2) : 71 – 76.
CHEN Man , LU Wei , WANG Xiaochan , et al. Design and experiment of optimization control system for variable fertilization in winter wheat field based on fuzzy PID [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery ,2016 ,47(2) : 71 – 76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160210&flag=1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 02. 010. (in Chinese)
- [27] 苗中华 李闯 韩科立,等. 基于模糊 PID 的采棉机作业速度最优控制算法与试验 [J/OL]. 农业机械学报 ,2015 ,46(4) : 9 – 14 ,27.
MIAO Zhonghua , LI Chuang , HAN Keli , et al. Optimal control algorithm and experiment of working speed of cotton-picking machine based on fuzzy PID [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery ,2015 ,46(4) : 9 – 14 ,27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150402&flag=1. DOI: 10. /6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 04. 002. (in Chinese)