

基于积极团队情感基调的情感机器人协作任务分配拍卖算法



李 虎 方宝富

合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009

(lihu@mail.hfut.edu.cn)

摘 要 多机器人系统(Multi Robot System, MRS)通过引入机器人个体情感因素,可以有效提高个体的自主协作能力、决策能力以及多机器人系统的整体智能化水平。然而,以往研究主要集中于个体情感状态(情绪、个性等),缺乏从团队情感层面来探索积极团队情感基调(Positive Group Affective Tone, PGAT)对团队协作能力和团队有效性的影响。为了发挥 PGAT 在任务分配中的积极作用,降低因为团队成员情绪衰减而导致团队解散的风险,并增加团队协作能力和团队有效性,提出了基于 PGAT 的情感机器人协作任务分配拍卖算法。仿真追捕对比实验表明,相对于基于焦虑情感模型的改进合同网协议多机器人任务分配算法和基于自主意识的分布式情感机器人任务分配算法,基于 PGAT 的情感机器人协作任务分配拍卖算法的追捕成功率分别提高了 269.3% 和 6.5%,任务分配成功率分别提高了 138.7% 和 5.1%,平均追捕时间分别缩短了 14.5% 和 26.3%,并且在 150 场追捕对比实验中,追捕时间小于对比算法的场次占比分别达到 87.3% 和 90.7%。

关键词: 多机器人系统;积极团队情感基调;情绪;个性;协作任务分配

中图法分类号 TP242.6

Emotional Robot Collaborative Task Assignment Auction Algorithm Based on Positive Group Affective Tone

LI Hu and FANG Bao-fu

School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Abstract Multi robot system (MRS) can effectively improve individual's autonomous cooperation ability, decision-making ability and overall intelligent level of multi robot system by introducing individual emotional factors. However, previous researches mainly focus on individual emotional state (emotion, personality, etc.), lacking of exploring the influence of group emotional state on group cooperation ability and group effectiveness from positive group affective tone (PGAT). In order to improve positive effects of PGAT in task allocation and reduce the risk of group dissolution caused by group members' emotional decaying, as well as increasing group cooperation ability and group effectiveness, this paper proposed collaborative task allocation auction algorithm based on PGAT. The results of simulation show that compared with modified contract network protocol multi-robot task allocation algorithm based on anxiety model and distributed task allocation method based on self-awareness of autonomous robots, the emotional robot collaborative task assignment auction algorithm based on positive group affective tone improves the pursuit success rate by 269.3% and 6.5%, and increases the task allocation success rate by 138.7% and 5% respectively, and reduces the average pursuit time by 14.5% and 26.3% respectively. Besides, in 150 episodes of pursuit comparison experiment, the proportion of the number of episodes whose pursuit time is less than the comparison algorithm is 87.3% and 90.7% respectively.

Keywords Multi-robot system, Positive group affective tone (PGAT), Emotion, Personality, Collaborative task allocation

1 引言

随着人工智能的快速发展,多机器人系统被广泛应用于巡逻^[1]、智能交通^[2]、追踪^[3]和救援^[4-5]等领域。如何有效提高机器人团队的协作能力,是研究人员必须面对的一项关键课题。文献[6]在研究异构多机器人系统的过程中,通过对不同能力值的机器人进行分类,以及分析机器人和任务的匹配度,建立了解决异构多机器人协同任务分配问题的任务分配模型,并提出了一种分布式拍卖算法,有效提高了异构多机器

人系统的有效性。文献[7]提出一种基于机器人能力和群体协作相关性的任务分配算法(task allocation algorithm based on Robot Ability and Relevance with Group Collaboration, RARGC),建立了具有良好协作能力的机器人团队,即使某个团队成员出现故障,团队整体依然能表现出良好的性能。

随着研究的深入,研究人员发现在多机器人系统中引入情感因素,可以增强多机器人系统对各种动态环境的适应性,提高团队协作能力和团队有效性,因此越来越多的研究人员投身到情感机器人协作任务分配领域。文献[8]在多机器人

协作系统中引入基于情感因素的任务共享方法,使不同个体之间表现出更好的协作能力,增加了系统的灵活性。文献[9]在多机器人协作任务分配和追捕场景中通过融合个性的情感模型,提高了机器人的自主能力和对复杂环境的适应性。文献[10]针对个性化多机器人系统,通过结合情绪渲染模型,提出了一种基于情绪渲染的追捕任务分配算法(Pursuit Task Allocation based on Emotional Contagion, PTA-EC),并证明了团队成员情绪之间的情绪渲染有助于提高团队协作能力和团队有效性。文献[11]针对搜索救援机器人任务分配问题,通过建立焦虑情感模型来评估机器人是否参与任务分配,提出了基于焦虑情感模型和改进合同网协议的多机器人任务分配算法。该算法有效提高了任务分配效率和任务分配的鲁棒性。文献[12]提出一种基于自主意识的分布式情感机器人任务分配算法,每个机器人通过分析自身情感状态是否饱满,以及计算追捕到逃跑者所需要的时间,自主地选择是否加入追捕。该算法可以有效降低因为追捕成员情绪衰减而导致追捕团队解散的风险,提高了任务分配成功率和追捕成功率。

然而,以往情感机器人任务分配研究主要集中于个体情感状态(情绪、个性等)对团队协作能力和团队有效性的影响,缺乏从团队情感层面来探索 PGAT 对团队协作能力和团队有效性的影响。

针对积极团队情感基调建模的研究,科研人员取得了众多成果。George^[13-14]通过实验证明在大部分现实团队内部,团队成员的情感可以通过情绪渲染、情绪衰减和情感聚合形成团队层面的一致情感反应,即团队情感基调^[15]。研究证明,团队情感基调不仅可以影响团队个体层面的情感状态和行为^[16],而且可以影响团队创造力^[17]、知识共享^[18]和团队合作^[19],并能预测团队行为^[20]等。文献[21]指出团队情感基调一般分为两种不同的维度:积极团队情感基调和消极团队情感基调(NGAT)。相对于 NGAT,PGAT 对团队的有效性影响更大。文献[22]针对当前关于积极团队情感基调的研究进行了综述,提出了用于研究积极团队情感基调的 IPSO 模型;然而该模型只是定性地概括了积极团队情感基调形成的大致过程,并没有列举积极团队情感基调形成的相关公式,在工程应用领域中无法定量分析 PGAT 对团队协作和团队有效性的影响。

基于以上假设,本文从团队情感层面来探讨 PGAT 对协作任务分配的影响,并提出了基于 PGAT 的情感机器人协作任务分配拍卖算法。首先,提出可以用于量化计算的基于多情感机器人协作的 PGAT 模型;其次,提出基于 PGAT 的情感机器人协作任务分配拍卖算法,并对该算法进行解释说明;最后,通过模拟实验分析团队成员的情绪值、团队成员之间的联系系数和团队成员的个性对积极团队情感基调的影响,验证了积极团队情感基调模型的合理性。在多个情感机器人追捕 1 个逃跑者的对比模拟追捕实验中,通过分析本文算法和对比算法(文献[11]提出的基于焦虑情感模型和改进合同网协议的多机器人任务分配算法,文献[12]提出的基于自主意识的分布式情感机器人任务分配算法)的追捕过程和结果,证明了本文算法的追捕团队由于具有饱满的情绪状态,可以有效地降低因团队成员的情绪衰减到指定阈值而发生追捕团队

解散的风险;与此同时,由于追捕团队具有较强的联系合作系数,本文算法可以有效提升追捕团队的围捕协作能力,进而缩短追捕时间,增强追捕团队的有效性。在大规模多个情感机器人追捕多个任务的对比模拟追捕实验中,通过分析本文算法和对比算法的追捕结果,证明了本文算法不仅可以有效缩短平均追捕时间,而且能有效提高任务分配成功率和追捕成功率。

本课题研究的意义如下:1)提出了基于多情感机器人协作的积极团队情感基调模型,并列出了相关量化计算的公式,加强了团队情感层面的积极团队情感基调的科研和工程领域应用;2)在具有情感的多机器人协作任务分配中,引入积极团队情感基调模型,提出基于 PGAT 的情感机器人协作任务分配拍卖算法,该算法提高了情感机器人的团队协作能力和团队有效性,丰富了情感机器人的协作任务分配研究。

2 情感模型

2.1 情绪描述

定义 1(情绪) 针对情感的描述主要有 3 种方法:基本情绪法、纬度法、合成法^[23]。本文使用基本情绪法来定义情感状态,并假设机器人共有 3 种基本情感,分别是 happy, fear 和 angry。定义机器人 R 的情绪为:

$$Emo = \langle e^{happy}, e^{fear}, e^{angry} \rangle \quad (1)$$

定义 2(情感协作因子) 机器人情感协作因子用 f 来表示,该因子有两种状态,即积极情绪状态和消极情绪状态。积极情绪状态表示机器人愿意参与追捕任务,消极情绪状态表示其不愿意参与追捕任务。机器人 R 的情感协作因子值 f 由情绪状态值 Emo 决定。

$$f = \begin{cases} 1, & Emo \geq \xi \\ 0, & Emo < \xi \end{cases} \quad (2)$$

其中, ξ 为情绪状态判断参数,当机器人 R 的情绪状态值 $Emo \geq \xi$ 时,表示机器人 R 处于积极情绪状态,愿意参与追捕任务;相反,表示机器人 R 处于消极情绪状态,不愿意参加追捕任务。

2.2 个性描述

个性是个体相对稳定的整体精神状况,即具有一定偏好性的心理特征的总和,是个体区别于其他个体的一种特质。针对个性的描述,心理学中普遍使用最著名的 OCEAN 模型^[24],如表 1 所列。

表 1 OCEAN 个性模型

Table 1 OCEAN personality model

Different Dimensions of Personality	Description
Openness	Creative, open
Conscientiousness	Dutiful, discreet
Extroversion	Enthusiastic, extroverted
Agreeableness	Amiable, sincere
Neuroticism	Calm, anxious

定义 3(情感机器人个性) 用 5 维的向量来描述情感机器人 R 的个性,向量中的每一个维度对应 OCEAN 模型中的每一个维度。

$$Per = \langle \Phi^O, \Phi^C, \Phi^E, \Phi^A, \Phi^N \rangle$$

$$\Phi^i \in [-1, 1], \Phi^i = N(u_i, \sigma_i^2), i \in \{O, C, E, A, N\} \quad (3)$$

$$u \in [0, 1], \sigma \in [-0.1, 0.1]$$

定义 4(情感的表达能力和接收能力) 在情绪渲染模型中,情绪的表达能力主要受个性的 Extroversion 分量影响,情绪接收能力主要受个性的 Openness 分量影响。

$$Exp_i = W_E * \Phi_i^E \quad (4)$$

其中, Exp_i 为情绪的表达能力, Φ_i^E 代表个性的 Extroversion 分量, W_E 是权重。

$$Sus_i = W_o * \Phi_i^O \quad (5)$$

其中, Sus_i 为情绪的接收能力, Φ_i^O 代表个性的 Openness 分量, W_o 是权重。

3 基于多情感机器人协作的积极团队情感基调模型

3.1 问题描述

在具有情感的多机器人多任务的追捕场景中,假设共有 m 个追捕者和 n 个逃跑者,追捕者为了完成追捕任务,形成了具有不同追捕任务的追捕团队 $Group_j = \{R_1, R_2, \dots, R_k\}$, 其中 k 代表第 j 个追捕团队中包含机器人的个数。根据追捕场景可以将机器人分为两类:追捕机器人 RP 和作为任务的逃跑机器人 RE 。

定义 5(追捕机器人)

$$RP_i = \langle Pos_i(t), Cap_i, Emo_i(t), Exp_i, Sus_i \rangle$$

其中, $Pos_i(t)$ 表示追捕机器人的平面坐标位置 (x_i, y_i) , Cap_i 表示追捕机器人的能力值, Emo_i 表示追捕机器人的情绪状态值, Exp_i 表示追捕机器人的情感表达能力值, Sus_i 表示追捕机器人的情感接收能力值。

定义 6(联系合作系数) Con 表示追捕者之间的联系合作系数矩阵,为 $m * m$ 的矩阵, Con_{ij} 表示追捕者 RP_i 与追捕者 RP_j 之间的联系合作系数, $Con_{ij} = k, k \in [0, 1]$, 其中 $Con_{ij} = 1$ 表示追捕者 RP_i 和 RP_j 存在强联系合作关系, $Con_{ij} = 0$ 表示追捕者 RP_i 和 RP_j 之间无联系合作关系。

$$Con_{ij} = \beta_1 * P_{\theta_{ij}} + \beta_2 * P_{d_{ij}} \quad (6)$$

其中, $P_{\theta_{ij}}$ 表示追捕者 RP_i 和 RP_j 相对逃跑者的角度联系合作系数, $P_{d_{ij}}$ 表示追捕者 RP_i 和 RP_j 相对逃跑者的距离联系合作系数; β_1, β_2 分别表示 $P_{\theta_{ij}}$ 和 $P_{d_{ij}}$ 的权重, 且 $\beta_1 + \beta_2 = 1$ 。

定义 7(作为任务的逃跑机器人)

$$RT_j = \langle Pos_j(t), Cap_j, Reward_j \rangle$$

其中, $Pos_j(t)$ 表示逃跑机器人的平面坐标位置 (x_j, y_j) , Cap_j 表示逃跑机器人的能力值, $Reward_j$ 表示追捕团队追捕到逃跑机器人 RT_j 时获得的报酬。

定义 8(团队收益) 用 $Income_j$ 表示追捕团队 $Group_j$ 完成追捕任务时所获得的收益。

$$Income_j = Reward_j - \sum_{RP_i \in Group_j} (Cost_{risk_i} - Cost_{distance_i}) \quad (7)$$

其中, $Reward_j$ 表示追捕团队 $Group_j$ 完成追捕任务时获得的报酬; $Cost_{distance_i}$ 表示追捕团队 $Group_j$ 中的追捕者参与执行追捕任务的距离代价, 其值取决于追捕团队成员到追捕目标的距离; $Cost_{risk_i}$ 为风险代价, 其值取决于追捕团队成员的情感状态和完成追捕任务的大概追捕时间。

定义 9(任务分配矩阵) 用 $Q_{m * n} = (q_{ij})$ 表示追捕者参与执行追捕任务的任务分配情况。

$$q_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个追捕机器人参与执行第 } j \text{ 个任务} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

定义 10(追捕成功率) 如果在首次任务分配之后,追捕团队成功完成了追捕任务,则视该场次追捕成功,否则视为追捕失败。定义追捕成功率 $f_{success}$ 为:

$$f_{success} = \frac{N_s}{N_o}, f_{success} \in [0, 1] \quad (9)$$

其中, N_s 表示在首次任务分配后追捕团队便完成了追捕任务的次数, N_o 表示追捕场次数。

定义 11(任务分配成功率) 在完成任务分配后,追捕团队开始执行追捕任务。在追捕过程中,当追捕团队长时间不能完成追捕任务或追捕团队成员的情绪衰减到一定值时,则视为追捕失败,追捕团队解散,并启动新一轮的任务分配工作。定义任务分配成功率 f_{pursue} 为:

$$f_{pursue} = \frac{H_{Success}}{H_{Success} + H_{Failed}} \quad (10)$$

其中, H_{Failed} 表示在完成之前追捕团队发生解散的次数, $H_{Success}$ 表示追捕团队成功完成追捕任务的次数。

3.2 情绪衰减

根据心理学中情感强度的第三定律,在没有其他干扰因素的情况下,人类的情感强度会随着时间的推进不断地趋于零,并显示出负指数关系。

定义 12(机器人情感衰减函数)

$$I_t = I_{t-1} * \exp^{-k_t T} \quad (11)$$

其中, I_t 和 I_{t-1} 代表机器人在 t 和 $t-1$ 时刻的情感强度向量; k_t 代表情感衰减系数,不同个性的情感机器人情感衰减参数不同; T 代表情感衰减周期。

3.3 情绪渲染模型

在不同的机器人追捕团队中,追捕机器人 RP_i 的情感强度不仅受环境因素和情感衰减机制的影响,还受团队成员之间情绪渲染的影响。追捕团队成员 RP_i 在经过情绪渲染 Δt 时间后,其情绪值为:

$$E_i(t) = \sum_{i \neq j, Robot_i \in Group_k} Sus_i Exp_i * Con_{ij} * \omega_{ij} * \Delta E_{ij}(t) \quad (12)$$

其中:

$$\omega_{ij} = \frac{Exp_i con_{ij}}{\sum_{E_j \in Group_k} Exp_j con_{ij}}$$

$$\Delta E_{ij}(t) = \begin{cases} E_i - E_j, & i \neq j \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

ω_{ij} 为团队中机器人 RP_i 在团队 $Group_k$ 中的权值,表示 RP_i 在团队中发挥的影响力。 Exp_i 表示机器人 RP_i 的情感表达能力, Sus_i 表示机器人 RP_i 的情感接收能力。 Con_{ij} 表示机器人 RP_i 和 RP_j 之间的联系合作系数, ΔE_{ij} 为机器人 RP_i 和 RP_j 之间的情绪差值。

3.4 基于多情感机器人协作的积极团队情感基调

积极团队情感基调是团队成员的情感状态经过环境刺激、情绪渲染、情绪衰减机制后形成的一种团队层面的情感状态。文献[22]中的 IPSO 模型(如图 1 所示)是目前研究 PGAT 的主要模型,该模型将 PGAT 的形成过程划分为 4 个阶段(输入、过程、状态和输出),并列出了每个阶段的主要组成部分,这对后期 PGAT 的深入研究产生了重要影响。

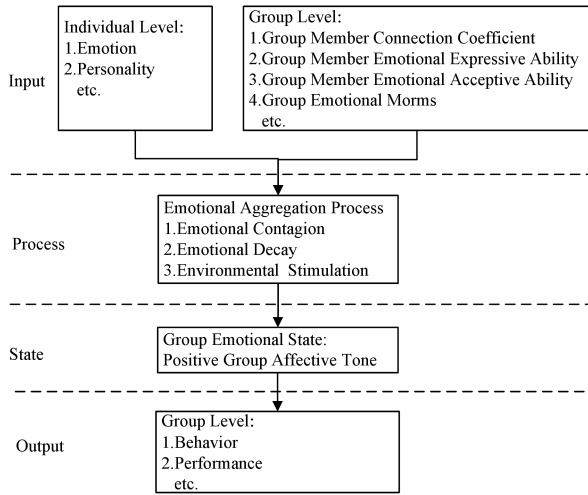


图1 IPSO模型
Fig. 1 IPSO model

本文通过研究团队情感层面的积极团队情感基调的形成过程,提出了基于多情感机器人协作的积极团队情感基调模型(如图2所示)和相关计算公式。该模型包含2个层面(Individual Level和Group Level),存在4个阶段(Input, Process, State, Output)。

输入阶段:该阶段主要完成PGAT情感模型的输入工作。输入阶段的个体层面包含个体情感状态(Emotion)和个

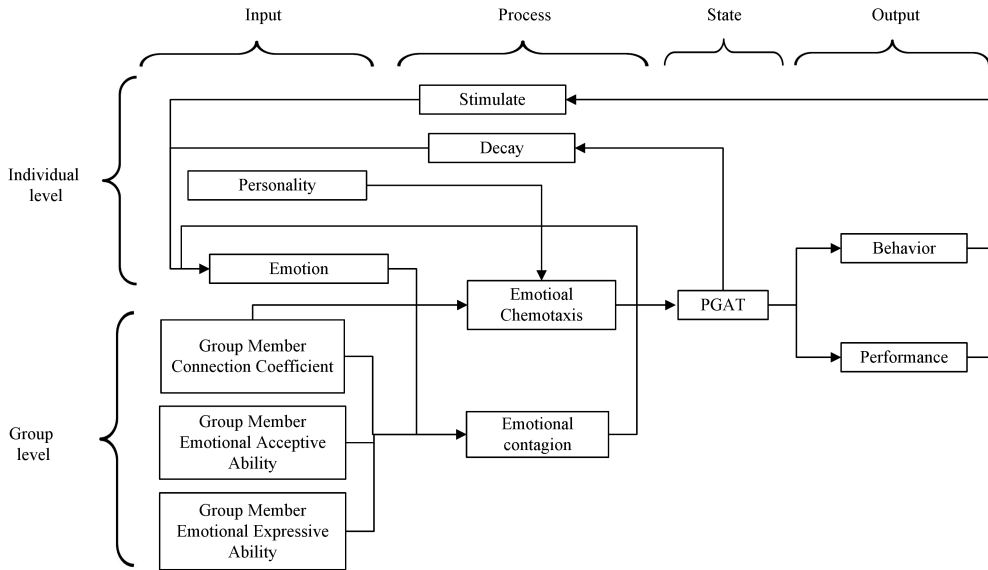


图2 基于多情感机器人协作的积极团队情感基调模型
Fig. 2 PGAT model based on emotional multi-robot cooperation

在具有积极团队情感基调的机器人团队追捕环境中,积极团队情感基调具有以下性质。

性质1 积极团队情感基调值越大,团队执行某项任务越积极,团队面临解散的风险越小。

性质2 积极团队情感基调值越小,团队执行某项任务越不积极,团队面临解散的风险越大。

定义13(积极团队情感基调) 用PGAT来表示积极团队情感基调的值,PGAT取值的范围为[0,1],定义PGAT为:

性(Personality),其中个体情感状态受过程阶段的情绪衰减(Decay)、环境刺激(Stimulate)和情绪渲染机制(Emotional Contagion)的影响。输入阶段的团队层面包含团队成员联系系数(Group Member Connection Coefficient)、团队成员接收能力(Group Member Emotional Acceptive Ability)和团队成员表达能力(Group Member Emotional Expressive Ability)。

过程阶段:该阶段是基于多情感机器人协作的积极团队情感基调模型的核心。过程阶段的个体层面包含情绪衰减、环境刺激;团队层面包含情绪趋化(Emotional Chemotaxis)和情绪渲染(Emotional Contagion)。其中,情绪趋化机制的输入包含3种数据:团队成员情感状态、团队成员个性和团队成员联系系数。趋化机制的主要工作是形成团队层面的情感状态——PGAT。情绪渲染机制的输入包含4种数据:个体情感状态(Emotion)、团队成员联系系数、团队成员接收能力、团队成员表达能力,其主要工作是在团队成员的情绪处于低迷时对团队成员进行情绪渲染,从而提高团队成员的情绪。

状态阶段:该阶段包含团队层面的积极团队情感基调状态,其值由情绪趋化结果决定,并影响团队成员的情感衰减速度(Decay)、团队成员的个体行为(Behavior)和团队有效性(Performance)。

输出阶段:该阶段包含团队成员行为(Behavior)和团队有效性,其值决定团队成员情感受到的刺激大小,间接影响团队成员的情感状态。

$$PGAT(t+\Delta t) = E_{Group_k}(t) * \mathbf{M} * \mathbf{W} \quad (13)$$

其中, \mathbf{M} 为基本情感状态到PAD情感模型的转换矩阵,矩阵的值由基本情感类型决定; $\mathbf{W} = \{\omega_i | i = 1, 2, 3\}$ 为PAD 3个不同维度所对应的权重; $E_{Group_k}(t)$ 表示团队 $Group_k$ 在 t 时刻的情绪值。团队情绪值由团队情绪衰减、环境对团队情绪的刺激和团队内部情绪渲染决定。令团队 $Group_k$ 在 $t+\Delta t$ 的情绪值 $E_{Group_k}(t+\Delta t)$ 为:

$$E_{Group_k}(t+\Delta t) = \alpha_1 * E_{Group_k}(t) * e^{-k_i T} + \alpha_2 * E_{Group_k}(t) *$$

$$\mathbf{B} + \alpha_3 * \bar{E}_{Group_k}(t) \quad (14)$$

其中, $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$; k_i 表示情绪衰减系数, 不同个性的情感机器人的 k_i 值不同; T 表示衰减周期; \mathbf{B} 表示环境刺激矩阵; $\bar{E}_{Group_k}(t)$ 表示团队成员经过情绪渲染后的团队情绪值。

$$\bar{E}_{Group_k}(t) = \sum_{i \neq j, R_i \in Group_k, R_j \in Group_k} Exp_i * Con_{ij} * \omega_i * \Delta E_{ij}(t) \quad (15)$$

其中:

$$\omega_i = \frac{Exp_i * con_{ij}}{\sum_{i \neq j, R_i \in Group_k, R_j \in Group_k} Exp_i * con_{ij}}$$

$$\Delta E_{ij}(t) = \begin{cases} \bar{E}_i - \bar{E}_j, & i \neq j \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

ω_{ij} 为团队中机器人个体 RP_i 在团队 $Group_k$ 中的权值, 表示 RP_i 在团队中发挥的影响力; Exp_i 表示机器人个体 RP_i 的情感表达能力; Con_{ij} 表示机器人个体 RP_i 和 RP_j 之间的联系合作系数; \bar{E}_{ij} 表示在经过情绪渲染以后, 机器人个体 RP_i 和 RP_j 之间的情绪差值。

3.5 基于 PGAT 的情感机器人协作任务分配拍卖算法

为了在任务分配阶段使情感机器人团队获得较的团队协作能力和饱满的情绪状态, 并降低团队解散的风险, 本文以多机器人多任务追捕实验为切入点, 在完善了积极团队情感基调模型的基础上, 提出了基于 PGAT 的情感机器人协作任务分配拍卖算法。该算法不仅可以确保成功地完成任务分配, 而且可以确保每个追捕团队都处于积极情绪状态并具有较强的团队协作能力, 从而降低追捕团队因为长期追捕不到目标或者追捕团队成员的情绪衰减到一定值时而发生追捕团队解散的风险, 缩短平均追捕时间, 提高团队的有效性。

该算法分两步: 1) 为每一个追捕子团队招募一个领导者, 并且领导者团队满足积极团队情感基调的要求, 如算法 1 和图 3 所示; 2) 每个追捕子团队的领导者开始招募协作者, 并且每个追捕子团队都满足积极团队情感基调的要求, 如算法 2 和图 4 所示。

算法 1 为每个追捕子团队招募一个领导者

输入: 追捕机器人 $RP = \{RP_1, RP_2, \dots, RP_m\}$, 逃跑机器人 $RT = \{RT_1, RT_2, \dots, RT_n\}$

输出: 由每个追捕子团队领导者组成的领导者团队 $\mathbf{Q}_1 = \{Leader_1, Leader_2, \dots, Leader_n\}$

1. $\mathbf{Q}_1 \leftarrow 0, PGAT \leftarrow 0$; /* 领导者团队的积极团队情感基调 PGAT 值初始化为 $0 * /$
2. initialize(RP, RT)
3. for $k \leftarrow 1$ to m do
4. $[\text{Cost}_{risk}, \text{Cost}_{distance}] \leftarrow f_1(RP_k, RT)$; /* 计算每个追捕者追捕不同逃跑者的风险代价和距离代价 */
5. end for
6. while $PGAT < \theta$; /* 领导者团队的 PGAT 值小于阈值 */
7. while $N_i < n$ do /* 处于积极状态的空闲追捕者个数 N_i 小于追捕团队个数 $n * /$
8. update(RP. Emo); /* 利用式(12)进行情绪渲染 */

9. end while
10. for $i \leftarrow 1$ to m do
11. for $j \leftarrow 1$ to n do
12. $\text{Cost}_{ij} = \text{Cost}_{risk_{ij}} + \text{Cost}_{distance_{ij}}$; /* 每个处于积极情绪状态的机器人计算参与执行不同任务所需要的总代价 */
13. end for
14. end for
15. $\mathbf{Q}_2 \leftarrow \max(\sum_{k=1}^n \text{Income}_k)$; /* 采用匈牙利算法得到收益最大的虚拟领导者团队 $\mathbf{Q}_2 * /$
16. $PGAT \leftarrow f_2(RP, RT, \mathbf{Q}_1)$; /* 根据式(13)计算虚拟领导者团队的积极团队情感基调 */
17. if $PGAT \geq \theta$
18. $\mathbf{Q}_1 \leftarrow \mathbf{Q}_2$; /* 虚拟领导者团队 \mathbf{Q}_2 变成真正领导者团队 $\mathbf{Q}_1 * /$
19. return \mathbf{Q}_1
20. endif
21. end while
22. end algorithm

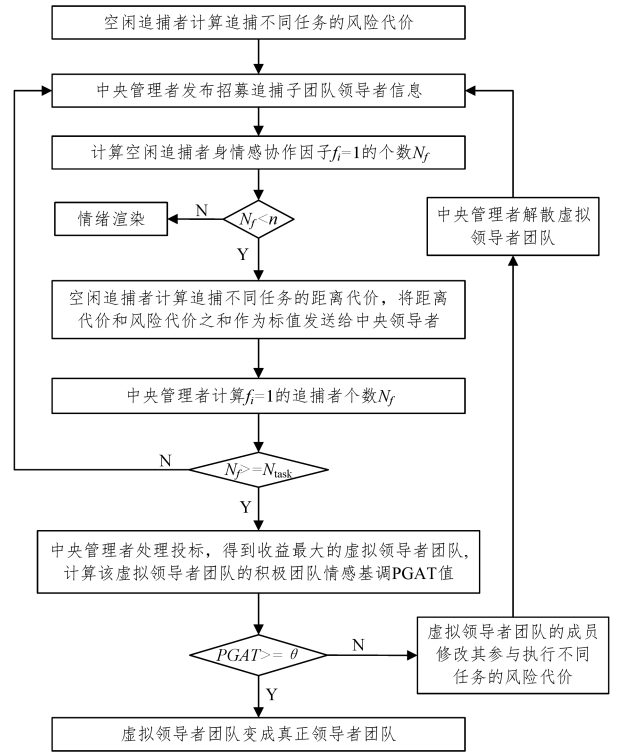


图 3 招募子团队领导者

Fig. 3 Recruitment of sub-group leaders

算法 2 为每个追捕子团队招募追捕协作者

输入: 追捕机器人 $RP = \{RP_1, RP_2, \dots, RP_m\}$, 逃跑机器人 $RT = \{RT_1, RT_2, \dots, RT_n\}$, 追捕子团队领导者矩阵 \mathbf{Q}_1

输出: 任务分配结果 $\mathbf{Q}_2 = \{Group_1, Group_2, \dots, Group_n\}$

1. $\mathbf{Q}_2 \leftarrow 0, PGAT \leftarrow 0, NG \leftarrow 0$; /* 追捕子团队的积极团队情感基调 PGAT 值不小于阈值个数 */
2. while $NG < n$; /* n 表示追捕子团队个数 */
3. $NG \leftarrow 0$
4. while $N_f < n$ do /* N_f 表示空闲追捕者的意愿度满足的个数 */
5. update(RP. Emo); /* 利用式(12)进行情绪渲染 */
6. end while

```

7.   for i←1 to m do
8.     for j←1 to n do
9.       Costij = Costriskij + Costdistanceij / * 每个处于积极情绪状态的
          机器人计算参与执行不同任务所需要的总代价 * /
10.    end for
11.  end for
12.  Q3 ← max(∑k=1n Incomek) / * 采用匈牙利算法得到使追捕子团队
      获得最大收益的追捕协作者 * /
13.  PGAT ← f2(RP, RT, Q2) / * 根据式(13)计算每个追捕子团队的
      积极团队情感基调值 * /
14.  if min(PGAT) < θ / * 判断是否存在追捕子团队的 PGAT 值不
      满足条件的情况 * /
15.    PGAT ← 0;
16.  else
17.    Q2 ← Q2 ∪ Q3 / * 每个追捕子团队都招募到一个协作者 * /
18.  end if
19.  for j←1 to n do
20.    if CapGroupj ≥ CapRTj / * 追捕子团队能力值大于或等于逃跑
        者能力值 * /
21.      NG ← NG + 1;
22.    endif
23.  end for
24. end while
25. return Q2
26. end algorithm

```

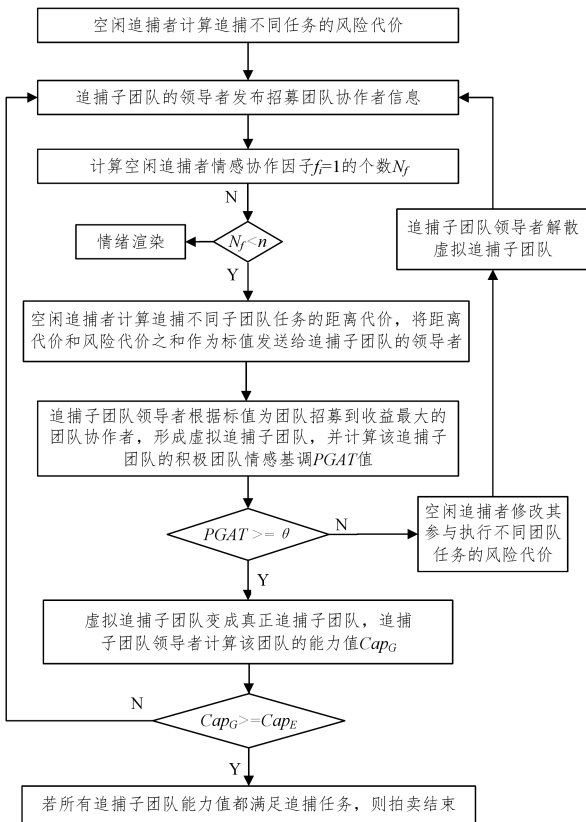


图4 招募子团队协作者

Fig. 4 Recruiting sub-group collaborators

4 实验

实验1 验证团队成员之间的联系合作系数和团队成员的情绪值对团队情感基调的影响。

设团队成员情感状态 Emo 由 3 种基本情感状态 happy, fear 和 angry 组成, 即 $Emo = [happy, fear, angry]$, 并假设团队成员的情绪表达能力、情绪接收能力、情绪衰减系数、基本情感状态 fear 和 angry 的值固定不变, 团队成员联系合作系数和基本情感状态 happy 的值可变。设团队成员情感状态为 $Emo = [f(x), 0.85, 0.75]$, 其中 happy 值为 $f(x) = x/20, x = 1, 2, \dots, 20$; 设团队成员联系合作系数为 $Con_{ij} = f(y)$, 其中 $f(y) = y/20, y = 1, 2, \dots, 20$ 。

实验结果如图 5 所示。可以看出, 当团队成员之间的联系合作系数不变时, 团队的积极团队情感基调值与团队成员情感值呈正相关。当团队成员情感值固定不变时, 团队的积极团队情感基调值与团队成员之间的联系合作系数呈正相关; 相对于团队成员情绪值对团队情感基调的影响, 团队成员之间的联系合作系数对团队情感基调的影响更大。

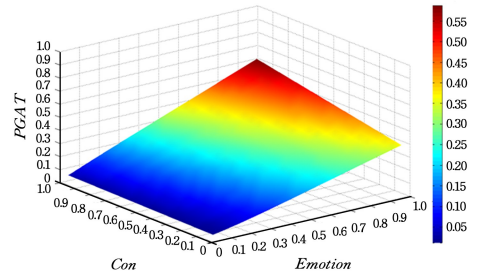


图5 团队成员之间的联系合作系数和团队成员的情绪值对积极团队情感基调的影响

Fig. 5 Impact of team members' relationship coefficient and group members' emotional value on positive group affective tone

实验2 验证 Openness 型个性和 Extroversion 型个性对团队的积极团队情感基调的影响。由于 Openness 型个性直接影响个体的接收能力, Extroversion 型个性直接影响个体的表达能力, 令团队中的机器外向型个性值为 x , 开放型个性为 y , 情绪表达能力 $Exp = [0.85, 0.95, f(x)]$, 情绪接收能力 $Sus = [0.9, 0.7, f(y)]$ 。其中, $f(x) = x/20, x = 1, 2, \dots, 20$; $f(y) = y/20, y = 1, 2, \dots, 20$ 。

实验结果如图 6 所示。

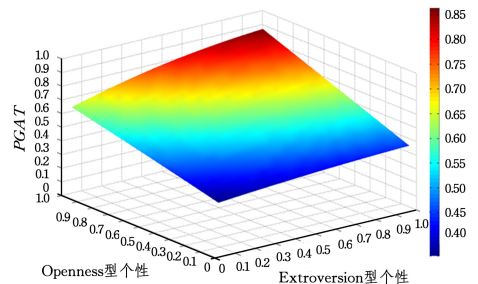


图6 Openness 型个性和 Extroversion 型个性对积极团队情感基调的影响

Fig. 6 Influence of openness personality and extroversion personality on team's positive team emotional tone

可以看出,团队成员的开放型个性值与积极团队情感基调值呈正相关,团队成员的外向型个性值与积极团队情感基调值呈正相关;相对于外向型个性,开放型个性对团队情感基调的影响力更大。

实验3 在MATLAB仿真环境下进行多个情感机器人追捕1个逃跑机器人的模拟追捕实验。通过分析本文算法与对比算法1^[11]和对比算法2^[12]的追捕过程和追捕结果数据,验证本文提出的基于PGAT的情感机器人协作任务分配拍卖算法可以有效地缩短追捕时间,提高团队协作能力、围堵拦截

能力和团队有效性。

追捕实验的场景设置:1)令追捕机器人数量 $P=10$,速度 $Speed=3$,能力值 $Cap=4$,并在 180×180 的区域内随机产生追捕机器人的初始位置 Pos 、情绪值 Emo 、个性 Per 、情绪表达能力 Exp (范围为 $[0,1]$)和情绪接收能力 Sus (范围为 $[0,1]$);2)令逃跑机器人数量 $E=1$,速度 $Speed=2$,能力值 $Cap=10$,并在 180×180 的区域内随机产生逃跑者的初始位置 Pos 。

相关初始数据如表2和表3所列。

表2 追捕机器人的属性

Table 2 Properties of pursuit robot

robot	Pos	Cap	Speed	Emo	Per	Exp	Sus
P_1	[21,72]	4	3	[0.19,0.47,0.69]	[0.29,-0.64,0.26,0.92,0.06]	[0.05,0.73,0.26]	[0.19,0.42,0.48]
P_2	[102,41]	4	3	[0.69,0.43,0.03]	[0.56,0.84,0.86,0.31,-0.24]	[0.42,0.54,0.94]	[0.12,0.58,0.22]
P_3	[20,179]	4	3	[0.76,0.31,0.53]	[-0.72,-0.70,-0.48,0.68,-0.49]	[0.41,0.98,0.30]	[0.38,0.58,0.25]
P_4	[34,21]	4	3	[0.65,0.40,0.41]	[0.62,-0.51,0.85,-0.30,-0.61]	[0.70,0.66,0.53]	[0.29,0.61,0.26]
P_5	[166,6]	4	3	[0.71,0.96,0.63]	[0.48,-0.62,0.37,-0.63,-0.26]	[0.69,0.66,0.17]	[0.82,0.98,0.73]
P_6	[148,142]	4	3	[0.42,0.30,0.61]	[0.25,0.56,-0.83,0.85,0.55]	[0.12,0.99,0.17]	[0.34,0.58,0.10]
P_7	[16,44]	4	3	[0.77,0.72,0.09]	[-0.02,-0.12,-0.10,-0.38,0.01]	[0.03,0.56,0.88]	[0.90,0.87,0.81]
P_8	[41,161]	4	3	[0.26,0.15,0.68]	[0.02,0.63,0.58,0.28,-0.24]	[0.66,0.19,0.36]	[0.26,0.59,0.02]
P_9	[170,81]	4	3	[0.34,0.52,0.45]	[0.62,0.06,-0.29,0.87,0.75]	[0.46,0.98,0.15]	[0.42,0.31,0.16]
P_{10}	[131,119]	4	3	[0.37,0.51,0.94]	[0.10,0.24,0.17,-0.58,-0.39]	[0.85,0.64,0.37]	[0.17,0.42,0.09]

表3 逃跑机器人的属性

Table 3 Properties of evader robot

robot	Pos	Cap	Speed
E_1	[54,79]	10	2

将追捕者的初始位置用“蓝色实心圆”标记,且实心圆半

径与追捕者的情绪值呈现正相关。将第一次任务分配后的追捕者轨迹用“蓝色点号”标记,第二次任务分配后的追捕者轨迹用“绿色点号”标记。将逃跑者的初始位置用“红色正方形”标记,逃跑者轨迹用“红色加号”标记。追捕过程的实验结果如图7所示。

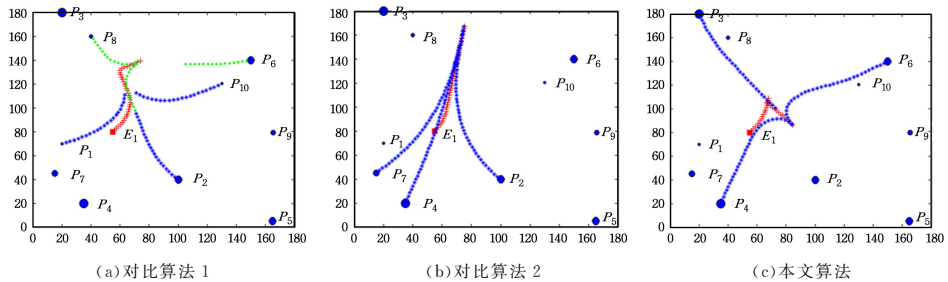


图7 追捕过程的对比(电子版为彩色)

Fig. 7 Comparison of pursuit process

对比算法1:基于焦虑情感模型和改进合同网协议的多机器人任务分配算法^[11](追捕过程如图7(a)所示)。该算法将个体的焦虑情感模型融入任务分配中,当个体的焦虑情感因子满足指定条件时,个体才会参与任务分配和追捕任务。图7(a)的追捕过程可以分为两个阶段:第一次任务分配后的追捕团队追捕过程(第一阶段,轨迹用“蓝色点号”标记)和第二次任务分配后的追捕团队追捕过程(第二阶段,轨迹用“绿色正方形”标记)。第一阶段:在追捕团队 $\{P_1, P_2, P_{10}\}$ 的追捕过程中,由于 P_1, P_{10} 的焦虑情感因子增加到指定阈值时,引发了 P_1 和 P_{10} 的焦虑情感因子不再满足继续参与追捕的条件,导致该追捕团队解散和任务重新分配。第二阶段:在任务重分配后形成了新的追捕团队 $\{P_2, P_6, P_8\}$,虽然追捕团队最终完成了追捕任务,但是由于 P_6 和 P_8 是在任务重分配之后才加入追捕的,并没有对逃跑者进行有效的围堵拦截,因此团队追捕时间较长。

对比算法2:基于自主意识的分布式情感机器人任务分配算法^[12](追捕过程如图7(b)所示)。该算法通过将认知智能和情感智能相结合,使每个机器人具有自主意识,并且可以通过分析周围环境信息和自身信息自主地选择参与追捕任务。在对比算法2的实验中,首次任务分配后,追捕团队便成功完成了追捕任务。通过分析追捕团队 $\{P_2, P_4, P_7\}$ 成员的情感状态和相对于逃跑者的位置信息,可以发现追捕团队成员的位置都比较靠近逃跑者,并且都处于情绪饱满状态,在完成追捕任务之前,情感状态都没有衰减到临界阈值。

本文算法:基于PGAT的情感机器人协作任务分配拍卖算法(追捕过程如图7(c)所示)。该算法通过将本文提出的可以量化计算的积极团队情感基调模型融入任务分配中,得到了具有积极团队情感基调的追捕团队 $\{P_1, P_3, P_4\}$ 。追捕团队成员具有的饱满的情绪和较强的联系合作系数,有效地降低了追捕团队解散的风险。通过分析图7(c)可知,追捕团

体由于具有较高的团队围捕协作能力,进行了有效的围堵拦截,迫使逃跑者在改变逃跑路线的过程中浪费了大量的时间去跳出追捕包围圈。实验数据显示,本文算法有效缩短了追捕时间。

通过分析不同算法的追捕过程和实验结果数据(见表4)可知,在本次模拟实验中,相对于对比算法1和对比算法2,本文算法在保证较好的任务分配成功率(100%)的情况下,有效地将追捕时间缩短到了18.7s。

表4 不同算法的结果对比(1)

Table 4 Comparison results of different algorithms (1)

算法	任务分配成功率/%	追捕时间/s
对比算法1	33.3	24.5
对比算法2	100	32.2
本文算法	100	18.7

综上,在本次模拟实验中,相对于其他算法,本文算法可以得到情绪饱满和较强联系合作系数的追捕团队,能有效提高追捕团队的协作能力和围堵拦截能力,进而缩短追捕时间。

实验4 利用MATLAB仿真环境,在相同条件下进行大规模的多个情感机器人追捕多个逃跑者的随机场景对比实验。实验表明,本文所提出的基于PGAT的情感机器人协作任务分配拍卖算法可以有效提高任务分配成功率、追捕成功率和团队有效性,并缩短平均追捕时间。

在MATLAB仿真环境中进行150场30追3的对比追捕实验。场次 $Episode=150$,在每个场次中:1)令追捕机器人数量 $P=30$,速度 $Speed=3$,能力值 $Cap=4$,并在 180×180 的区域内随机产生追捕机器人的初始位置 Pos 、情绪值 Emo 、个性 Per 、情绪表达能力 Exp (范围为 $[0,1]$)和情绪接收能力 Sus (范围为 $[0,1]$);2)令逃跑机器人数量 $E=3$,速度 $Speed=2$,能力值 $Cap=10$,并在 180×180 的区域内随机产生逃跑者的初始位置 Pos 。保证在每个实验场次中,不同算法都具有相同的初始数据。在每个追捕场次中,当每个逃跑者都有相应的追捕子团队负责追捕,并且每个追捕子团队的能力值不小于逃跑者能力值($RE_j.Cap \leq Group_j.Cap$)时,任务分配才算成功。每种算法在每场对比实验中的追捕时间如图8所示,3种算法的实验结果如表5所列。

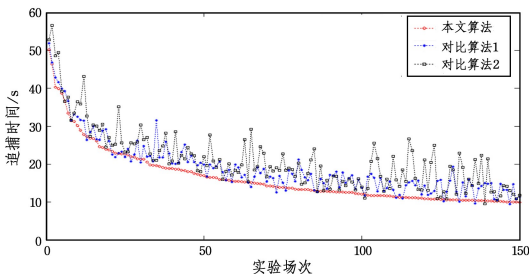


图8 追捕时间的对比

Fig. 8 Comparison of pursuing time

通过分析对比算法1和对比算法2的实验数据可以发现,对比算法1虽然有较短的平均追捕时间,但是追捕成功率和任务分配成功率较低;对比算法2虽然具有较高的追捕成功率和任务分配成功率,但是平均追捕时间较长。

表5 不同算法的结果对比(2)

Table 5 Comparison results of different algorithms (2)

算法	追捕成功率/%	任务分配成功率/%	平均追捕时间/s	在150场对比追捕实验中,本文算法追捕时间小于对比算法的场次百分比/%
对比算法1	23.2	36.7	19.3	87.3
对比算法2	80.5	83.4	22.4	90.7
本文算法	85.7	87.6	16.5	

与对比算法1和对比算法2相比,本文算法的追捕成功率分别提高了269.3%和6.5%,任务分配成功率分别提高了138.7%和5.1%,平均追捕时间分别缩短了14.5%和26.3%,并且分别在87.3%和90.7%的追捕场次中的追捕时间更短。因此,本文算法不仅具有较短的平均追捕时间,还有较高的追捕成功率和任务分配成功率。

结束语 为了提高具有情感的多机器人的协作能力和团队有效性,本文提出了基于积极团队情感基调的情感机器人协作任务分配拍卖算法,并通过实验证明:1)团队成员之间的联系合作系数、团队成员的情绪值、团队成员的个性对团队的积极团队情感基调具有重要影响;2)积极团队情感基调对提高团队成员的协作能力和团队有效性具有重要影响;3)在具有情感的多机器人协作系统中,本文提出的基于PGAT的情感机器人协作任务分配拍卖算法通过形成具有积极团队情感基调的追捕团队,可以有效降低团队解散的风险系数,提高团队的协作能力和团队的有效性。

未来将在具有情感的多机器人追捕过程中充分发挥PGAT在机器人团队追捕策略上的积极调解作用,进一步提高团队协作能力和团队的有效性。

参考文献

- [1] FARINELLI A, IOCCHI L, NARDI D. Distributed on-line dynamic task assignment for multi-robot patrolling[J]. *Autonomous Robots*, 2016, 41(6): 1-25.
- [2] KOKUTI A, HUSSEIN A, DE LA ESCALERA A, et al. Market-based approach for cooperation and coordination among multiple autonomous vehicles[C]// 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2017: 534-539.
- [3] GOLDHOORN A, GARRELL A, ALQUÉZAR R, et al. Searching and tracking people with cooperative mobile robots[J]. *Autonomous Robots*, 2018, 42(4): 739-759.
- [4] WANG H, ZHANG C, SONG Y, et al. Robot SLAM with Ad hoc wireless network adapted to search and rescue environments[J]. *Journal of Central South University*, 2018, 25(12): 3033-3051.
- [5] SUGIYAMA H, TSUJIOKA T, MURATA M. Real-time exploration of a multi-robot rescue system in disaster areas[J]. *Advanced Robotics*, 2013, 27(17): 1313-1323.
- [6] HUANG Y, ZHANG Y, XIAO H. Multi-robot system task allocation mechanism for smart factory[C]// 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence

- Conference (ITAIC). IEEE,2019;587-591.
- [7] HAN Y,LI D,CHEN J, et al. Task allocation algorithm based on robot ability and relevance with group collaboration in a robot team[C]//2009 Second International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems. IEEE,2009;273-277.
- [8] BANK S C,WATANABE K,HABIB M K, et al. An emotion-based task sharing approach for a cooperative multiagent robotic system[C]//2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE,2008;77-82.
- [9] DING Y,ZHU M,HE Y, et al. An autonomous task allocation method of the multi-robot system[C]//2006 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. IEEE,2006;1-6.
- [10] FANG B,GUO X,WANG Z, et al. Collaborative task assignment of interconnected, affective robots towards autonomous healthcare assistant[J]. Future Generation Computer Systems,2019,92;241-251.
- [11] WANG X,SHENG B. Multi-robot task allocation algorithm based on anxiety model and modified contract network protocol [C]//2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE,2017;1606-1612.
- [12] WANG Z,ZHU J,GUO X P, et al. Distributed task allocation method based on self-awareness of autonomous robots[J]. The Journal of Supercomputing,2019,76(2):1-13.
- [13] GEORGE J M. Handbook of work group psychology [M]. Chichester, UK; Wiley,1996;77-93.
- [14] GEORGE J M,KING E B. Chapter 5 Potential Pitfalls of Affect Convergence in Teams: Functions and Dysfunctions of Group Affective Tone[J]. Research on Managing Groups & Teams,2007,10;97-123.
- [15] WALTER F,BRUCH H. The positive group affect spiral: a dynamic model of the emergence of positive affective similarity in work groups [J]. Journal of Organizational Behavior,2008,29(2);239-261.
- [16] COLLINS A L,JORDAN P J,LAWRENCE S A, et al. Positive affective tone and team performance: The moderating role of collective emotional skills[J]. Cognition and Emotion,2016,30(1):167-182.
- [17] SHIN Y,KIM M,LEE S H. Positive Group Affective Tone and Team Creative Performance and Change-Oriented Organizational Citizenship Behavior: A Moderated Mediation Model[J]. The Journal of Creative Behavior,2019,53(1);52-68.
- [18] TSAI Y H,MA H C,LIN C P, et al. Group social capital in virtual teaming contexts: A moderating role of positive affective tone in knowledge sharing[J]. Technological Forecasting and Social Change,2014,86;13-20.
- [19] LIN C P,HE H,BARUCH Y, et al. The effect of team affective tone on team performance: The roles of team identification and team cooperation [J]. Human Resource Management,2017,56(6);931-952.
- [20] TANG Y Y, TSAUR S H. Supervisory support climate and service-oriented organizational citizenship behavior in hospitality: The role of positive group affective tone[J]. International Journal of Contemporary Hospitality Management,2016,28(10):2331-2349.
- [21] TSAI W C,CHI N W,GRANDEY A A, et al. Positive group affective tone and team creativity: Negative group affective tone and team trust as boundary conditions[J]. Journal of Organizational Behavior,2012,33(5);638-656.
- [22] COLLINS A L,LAWRENCE S A,TROTH A C, et al. Group affective tone: A review and future research directions[J]. Journal of Organizational Behavior,2013,34(S1);S43-S62.
- [23] FANG B,WANG Z,CHEN L, et al. Research on pursuit task allocation algorithm of emotional robot based on personality [C]//2015 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE,2015;457-462.
- [24] TANASESCU V,JONES C B,COLOMBO G, et al. The Personality of Venues: Places and the Five-Factors (Big Five) Model of Personality[C]//2013 Fourth International Conference on Computing for Geospatial Research and Application. IEEE,2013;76-81.



LI Hu, born in 1989, postgraduate. His main research interests include multi robot collaboration and emotion computing.



FANG Bao-fu, born in 1978, Ph.D, associate professor, postgraduate supervisor. His main research interests include multi robot/agent system, emotion/self-interest robot and machine learning.