УДК 681.3, 621.3

О.Ю. Бочкарьов, В.А. Голембо, А.М. Ціж
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних обчислювальних машин

КОЛЕКТИВНА ПОВЕДІНКА МОБІЛЬНИХ АГЕНТІВ У ЗАДАЧАХ РІВНОМІРНОГО РОЗПОДІЛУ ОБМЕЖЕНОЇ ТЕРИТОРІЇ

Розглянуто проблему організації колективної поведінки в завданнях рівномірного розподілу обмеженої території. Запропоновано узагальнений підхід до вирішення цієї проблеми, який дає змогу одержувати універсальні розв’язки на вищому "організаційному" рівні прийняття рішень.

The problem of organization of collective behavior of mobile autonomous agents dividing some territory within unknown boundaries to equal individual areas of responsibility for each agent is considered. The generalized approach to solve this problem is proposed. The approach allows to find corresponding universal solutions at superior "organizational" level of decision making.

Вступ. Проблема організації колективної поведінки в задачах рівномірного розподілу деякої обмеженої території набуває все більшої актуальності у світлі останніх досягнень та бурхливого розвитку розподіленої робототехніки [1–5], агентно-орієнтованих технологій побудови розподілених програмних систем [6, 7] та інших галузей застосування концепції багатоагентних систем (multi-agent systems) [8, 9]. У загальному вигляді зміст цих завдань полягає у "справедливому" в деякому сенсі поділі заданої обмеженої області простору (території) на індивідуальні зони відповідальності агентів. При тому поділ відбувається 1) за умов відсутності єдиного центру управління діями агентів (кожний з агентів приймає рішення самостійно) та 2) за умов обмеженої інформаційної взаємодії між агентами (тип та параметри цих обмежень визначаються згідно з відповідною моделлю інформаційної взаємодії агентів). Необхідно також відмітити, що проблема рівномірного розподілу території колективом агентів має дуже широкий спектр змістовних інтерпретацій, починаючи з поведінки колективу робототехнічних мобільних агентів в завданнях картографування (mapping) та спостереження (surveillance) [1–3] і закінчуючи колективною поведінкою обчислювальних агентів в завданнях розподілу спільних обчислювальних ресурсів [6]. У зв’язку з цим доцільно відзначити, що територія, яка підлягає розподілу між агентами – це не обов’язково ділянка фізичного простору. У контексті деяких змістовних інтерпретацій "обмежена територія" трактується як область параметричного (фазового) простору, в якому роль координати відіграє значення одного чи декількох параметрів, які може змінювати окремий агент. У статті розглянуто сучасний стан справ в галузі вирішення завдань зазначеного типу, сформульоване завдання пошуку узагальненого підходу до його вирішення та запропоновані варіанти рішень, які характеризуються високим рівнем універсальності, що дає змогу адаптувати їх до різних випадків практичного застосування.

Стан проблеми. Сьогодні відома велика кількість робіт, в яких досліджено різні аспекти зазначеної проблеми [2–5, 7, 10]. Це зокрема роботи в галузі розподіленої робототехніки [1–5], децентралізованого управління [4, 5] та колективної поведінки віртуальних агентів [7, 10]. Варто також відзначити тісний взаємозв’язок цієї проблеми з іншими завданнями просторової самоорганізації (spatial self-organization) колективу мобільних агентів [7, 11, 12]. Наприклад, багато спільних ознак з проблемою рівномірного розподілу території має так звана "проблема охорони художньої галереї" (art gallery problem) [3, 11]. У завданнях просторової самоорганізації цього типу одночасно присутні дві "невизначеності": 1) невизначеність обумовлена нестачею інформації про розмір та конфігурацію території, в межах якої розміщені агенти; та 2) невизначеність, обумовлена нестачею інформації про біжуче розташування та подальші дії інших агентів (внаслідок повністю децентралізованого управління та обмеженої інформаційної взаємодії між агентами) [12]. Відповідно основними елементами у тому чи іншому розв'язку цих завдань є механізми подолання нестачі інформації зазначених двох типів. При цьому в наукових пошуках таких рішень склалися дві основні тенденції: 1) пошук рішень у вигляді набору евристичних правил [2, 3, 7, 10]; 2) пошук рішень у вигляді рішення відповідно сформульованої задачі оптимального управління [2, 4, 5].

Недоліком першої тенденції є відсутність формального доказу коректності та збіжності запропонованих рішень, працездатність яких натомість оцінюється експериментально на прикладі вирішення модельних (тестових) задач. На відміну від цього в межах другої тенденції, як правило, отримують формальні докази коректності та збіжності запропонованих рішень, стикаючись при цьому з великими труднощами внаслідок децентралізованості та великої розмірності відповідної задачі оптимального управління. У даному випадку поведінка кожного мобільного агента задається окремим диференціальним рівнянням (або системою диференціальних рівнянь). Відповідно математична модель колективної поведінки агентів в такому поданні – це занадто складний об'єкт для прямого застосування відомих методик пошуку розв'язків задачі оптимального управління. У роботах, що належать до другої тенденції, ця проблема вирішується "спрощенням" відповідної математичної моделі на основі низки обмежувальних припущень [2, 4, 5], що своєю чергою значно звужує сферу використання розроблених рішень.

Крім того спільним недоліком обох тенденцій необхідно відзначити заглиблення у специфічні деталі роботи окремої мобільної робототехнічної платформи та намагання отримати рішення на рівні відповідних сигналів управління та вхідної сенсорної інформації. Інакше кажучи, переважна більшість запропонованих рішень дуже залежать від специфіки обраного авторами цих рішень способу організації переміщення окремого мобільного агента в просторі.

Постановка задачі. Розробити узагальнений підхід до вирішення проблеми організації колективної поведінки мобільних агентів у задачах рівномірного розподілу обмеженої території, який би дав змогу знайти універсальні гарантовані розв'язки на більш високому "організаційному" рівні прийняття рішень, тобто на рівні координації спільних колективних дій.

Розв'язання задачі. Концепція розв'язання ґрунтується на принципі ієрархії ("вкладеності") процесів управління та прийняття рішень [8, 9, 13, 14], застосування якого дає змогу абстрагуватись від специфіки способу організації переміщення агента в просторі та відповідних деталей колективної поведінки. Як перший крок в цьому напрямку можна розглядати створення координаційних механізмів на основі інтегральних характеристик взаєморозміщення агентів. До таких механізмів зокрема можна зарахувати рішення на основі діаграм Вороного [4], різні варіанти методу штучних потенціалів [3, 5], методи на основі рішень математичної проблеми вкриття або заповнення деякої обмеженої площини однаковими геометричними фігурами [10] та ін. Наступний крок в цьому напрямку полягає в подальшому "відокремленні" механізму координації спільних колективних дій від "геометричних" характеристик біжучого стану процесу розв'язання задачі.

З цією метою можна запропонувати узагальнений підхід, згідно з яким:

1) обмежена територія Ω, яка підлягає розподілу між n агентами, відображається у спільний обмежений ресурс R:

$$F_{\Omega}: \varphi_k(\Omega) \to R, \tag{1}$$

де $\varphi_k(\Omega)$ – функція, яка визначає потрібну характеристику обмеженої території Ω (наприклад, лише площу або форму і площу Ω);

2) індивідуальна зона відповідальності агента ρ_i відображається у його частку спільного обмеженого ресурсу r_i:

$$F_{\rho}: \varphi_a(\rho_i) \to r_i. \tag{2}$$

де $\varphi_a(\rho_i)$ – функція, яка визначає потрібну характеристику індивідуальної зони відповідальності агента ρ_i. При цьому в будь-який момент часу t справедлива нерівність

$$\sum_{i=1}^{n} r_i(t) \le R. \tag{3}$$

Відповідно перед колективом агентів постають дві підзадачі: 1) з'ясувати наперед невідому величину спільного ресурсу R та 2) розподілити цей спільний ресурс порівну в такий спосіб, щоб частка кожного агента дорівнювала r* = R/n. Отже, умова розв'язання першої підзадачі полягає у забезпеченні

$$\lim_{t\to\infty}\left[\sum_{i=1}^{n} r_i(t)\right] = R\,, \tag{4}$$

тоді як умова розв'язання другої підзадачі полягає у забезпеченні для всіх i=1,…,n

$$\lim_{t\to\infty} r_i(t) = r^*\,. \tag{5}$$

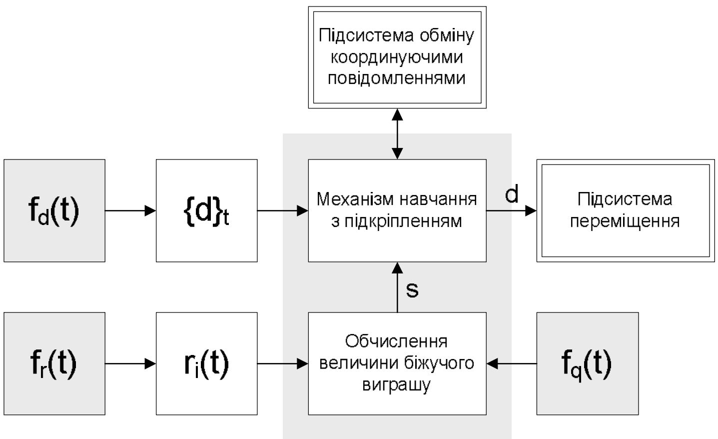
Крім того в межах узагальненого підходу розглядаються такі три допоміжні функції:

1) функція доступу до ресурсу $f_d(t)$, яка визначає можливості i-го агента щодо збільшення або зменшення його індивідуальної частки ресурсу r_i в момент часу t (тобто визначає алфавіт доступних на цьому кроці дій $\{d\}_t$ для кожного агента). За допомогою цієї функції моделюється нерівність агентів внаслідок обмеженої "свободи переміщень", спричиненої їх біжучим взаєморозташуванням та формою обмеженої території Ω;

2) функція оцінки індивідуальної частки ресурсу агента $f_r(t)$, яка визначає можливості i-го агента щодо визначення своєї зони індивідуальної відповідальності. За допомогою цієї функції моделюються ситуації неточного або помилкового визначення агентом величини r_i, а також можливі конфліктні ситуації, коли два або більше агентів "змагаються" за одну і ту саму ділянку Ω (і відповідну частку спільного ресурсу);

3) функція оцінки витрат на переміщення $f_q(t)$, яка визначає ціну того чи іншого рішення агента щодо зміни його індивідуальної частки ресурсу r_i в момент часу t. За допомогою цієї функції моделюються особливості способу організації переміщення агента у просторі [15] у вигляді залежності дія-ціна.

Отже, згідно з запропонованим підходом кожний агент (рисунок) визначає біжучу величину своєї частки спільного ресурсу та свої можливості (алфавіт доступних дій) щодо її зміни за допомогою функцій $f_r(t)$ та $f_d(t)$. Крім того агент визначає ціну попередньої дії за допомогою функції $f_q(t)$. Після цього на основі значення $r_i(t)$ та результату $f_q(t)$ за допомогою функції *V* обчислюється величина біжучого виграшу s, яка відображає успішність індивідуальних дій агента під час розв'язання поставленої задачі. Ця величина використовується як підкріплення в механізмі навчання з підкріпленням *M*, метою якого є максимізувати кількість успішних дій згідно з обраною моделлю оптимальної поведінки. Результатом роботи цього механізму є команда (обрана дія d), яка надсилається для виконання підсистемі переміщення. Крім того в роботі механізму навчання з підкріпленням може бути передбачено обмін координуючими повідомленнями з іншими агентами на основі відповідного механізму координації *C* та протоколу міжагентної взаємодії.



Функціональна схема мобільного агента

Відповідно вирішення проблеми рівномірного розподілу згідно з запропонованим узагальненим підходом полягає у синтезі таких (*V*, *M*, *C*), які б при заданих $\varphi_k(\Omega)$, $\varphi_a(\rho_i)$, $f_d(t)$, $f_r(t)$, $f_q(t)$ забезпечували виконання умов (4) і (5). У цьому разі можна провести пряму аналогію з відомими задачами на розподіл ресурсів колективом агентів [8,14], в яких, однак, відсутня невизначеність щодо величини спільного обмеженого ресурсу, який розподіляється між агентами за схемою запит-відповідь деяким арбітром (центром розподілу ресурсу). Під час вирішення проблеми рівномірного розподілу обмеженої території такий центр відсутній, внаслідок чого виникає проблема його заміни деяким механізмом координації колективних дій.

Таким механізмом, на нашу думку, доцільно використати метод ігрової координації багатоагентних систем [16–19]. Цей метод побудований на ідеї використання стану рівноваги за Нешем в деякій "фіктивній" грі (fictitious play), яку розігрують між собою агенти, в якості цільового термінального стану "врівноваженості" індивідуальних інтересів агентів (компромісне рішення як результат координації). Згідно з цим методом агенти починають гру за умов невизначеності щодо матриці виграшів та обирають свою стратегію на перших кроках випадково. Під час гри кожний гравець виконує алгоритм ігрового навчання з підкріпленням (огляд таких алгоритмів наведено в [18]), за рахунок чого нагромаджується досвід про дійсні значення матриці виграшів та відбувається пошук оптимальної стратегії, яка забезпечує стан рівноваги за Нешем. З погляду застосування цього методу координації для розв’язання задачі рівномірного розподілу території, нестача інформації про розмір та конфігурацію території Ω долається за рахунок нагромадження досвіду про дійсні значення спеціально організованої матриці виграшів, а нестача інформації про біжуче розташування та подальші дії інших агентів долається за рахунок пошуку кожним агентом оптимальної стратегії, яка забезпечує стан рівноваги за Нешем.

Отже, проблема зводиться до пошуку та організації такої координаційної гри, яка б забезпечувала еквівалентність рівномірного розподілу території (у вигляді виконання умов (4) і (5)) та стану рівноваги за Нешем у цій грі. З цього погдяду як найперспективніші варіанти можна запропонувати наступні координаційні ігри.

Метод координації на основі гри в розподілення (allocation game). У грі в розподілення [14] кожен з n гравців має k стратегій D={d} і n > k. В кожній партії гравець обирає одну із стратегій. Тобто колектив гравців розподіляється за стратегіями. Виграш окремого гравця w(d) залежить від того, скільки інших гравців обрали ту саму стратегію, що і він: w(d) = f(v(d))/v(d), де w(d) – виграш, який отримують всі гравці, що обрали стратегію d, v(d) – частка гравців, що обрали стратегію d. При цьому v(d) = m(d)/n, де m(d) – кількість гравців, що обрали стратегію d. Вага стратегії f(v(d)) має задовольняти умову -v(d)≤f(v(d)) ≤v(d). Різні за виглядом функції f(v(d)) породжують різні варіанти гри в розподілення. У найзагальнішому випадку ці функції можуть бути різними для різних стратегій d. Відповідно в контексті проблеми рівномірного розподілу території під стратегіями розуміються окремі ділянки території (та відповідні частки спільного обмеженого ресурсу). При тому кількість стратегій та вагові функції f(v(d)) підбирають так, щоб забезпечити еквівалентність стану рівноваги за Нешем рівномірному розподілу території. Зокрема можна організувати серію ієрархічно вкладених ігор в розподілення, кожна з яких розігрується у все меншій ділянці простору між тими агентами, які туди "потрапили".

Метод координації на основі гри на виживання (game of survival). У цій грі [20] перед її початком кожному i-му гравцю видається запас деякого ресурсу r_i. Далі в кожній ітерації розігрується однакова гра-компонента з нульовою сумою. Результат гри-компоненти визначає, яку частку ресурсу переможений віддає переможцю. Загалом програє ("вмирає") той, в кого запас ресурсу вичерпається першим. Після цього гра завершується. При тому, оскільки загальний для всіх гравців запас ресурсу R з часом не змінюється, гра може продовжуватися нескінченно довго. Відповідно в контексті проблеми рівномірного розподілу території можна запропонувати розіграш "оберненої" гри на виживання, в якій кожен з гравців навпаки намагався би мінімізувати запас свого ресурсу r_i. У результаті стан рівноваги за Нешем стає еквівалентним ситуації, коли в кожного гравця залишається мінімальний запас ресурсу, що можливо лише тоді, коли він у всіх однаковий, тобто дорівнює r*. Отже, пошук оптимальної стратегії кожним з агентів-гравців призведе до розв’язання задачі рівномірного розподілу території.

Варіанти ускладнення задачі. Серед варіантів ускладнення розглянутої проблеми потрібно відмітити такі додаткові проблеми, які потребують подальшого аналізу та вирішення: 1) проблема оптимізації процесу рівномірного розподілу території з використанням двох основних критеріїв: витрат часу та витрат енергоресурсу; 2) проблема організації спільного володіння однією часткою ресурсу декількома агентами (проблема спільних зон відповідальності); 3) проблема реагування на зміни обмеженої території Ω, коли спільний обмежений ресурс стає функцією від часу $R \rightarrow R(t)$ і відповідно стає потрібним додаткове дослідження закономірностей у змінах R(t).

Висновки. Розглянуто проблему організації колективної поведінки в задачах рівномірного розподілу деякої обмеженої території з невідомою наперед площею та формою. Запропоновано узагальнений підхід до вирішення цієї проблеми, який дає змогу одержати універсальні гарантовані розв'язки на більш високому "організаційному" рівні прийняття рішень (на рівні координації спільних колективних дій). У межах цього підходу розглянуто можливі способи вирішення проблеми рівномірного розподілу території та запропоновано два методи координації спільних колективних дій з розв'язання цієї задачі: метод координації на основі гри в розподілення та метод координації на основі гри на виживання. **З**апропоновані методи характеризуються високим рівнем універсальності, що дозволяє адаптувати їх до різних випадків практичного застосування.

1. Jiming Liu, Jianbing Wu, Multiagent Robotic Systems, CRC Press, 2001. – 304p. 2. Richard M. Murray, Recent Research in Cooperative Control of Multi-Vehicle Systems, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Aug 2006. 3. Andrew Howard, Maja J Mataric, and Gaurav S Sukhatme, Mobile Sensor Network Deployment using Potential Fields: A Distributed, Scalable Solution to the Area Coverage Problem // In Proceedings of the 6th International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems (DARS02), Fukuoka, Japan, June 25-27, 2002. 4. Jorge Cortes, Sonia Martinez, Timur Karatas, and Francesco Bullo, Coverage control for mobile sensing networks // IEEE Conference on Robotics and Automation, May 2002, Arlington, VA, pp. 1327-1332. 5. Paley D., Zhang F., Leonard N., Cooperative Control for Ocean Sampling: The Glider Coordinated Control System, IEEE Transactions On Control Systems Technology, April 30, 2006. 6. Andrews, G. Foundations of Multithreaded, Parallel, and Distributed Programming. Reading, MA: Addison-Wesley, 2000. 7. Craig W. Reynolds, Steering Behaviors For Autonomous Characters, Sony Computer Entertainment America, presented on Game Developers Conference, February 10, 1999. 8. Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence, by Gerhard Weiss (Editor), MIT Press, 2000. – 648p. 9. Michael Wooldridge, An Introduction to MultiAgent Systems, John Wiley & Sons, 2002. – 348 p. 10. Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Ціж А.М. Задача формування індивідуальних зон відповідальності колективом мобільних агентів // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка" . – 2006. – № 573 – С. 62–67. 11. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А., Попадюк Х.Р. Розробка та розв'язання тестових задач просторової самоорганізації багатоагентної системи // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2005, №546. – С.17–23. 12. Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Попадюк Х.Р. Проблема алгоритмічного забезпечення колективної поведінки автономних мобільних агентів в задачах просторової самоорганізації // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі", № 603, 2007. – С.26–30. 13. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит-уры изд-ва "Наука", 1969. – 316 с. 14. Варшавский В.И. Коллективное поведение автоматов. – М.: Наука, 1973. – 408 с. 15. Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Кусьпісь О.П. Проблема організації переміщення мобільного вимірювального агента у складі розподіленої системи автономних досліджень // Вимірювальна техніка та метрологія, 2007, № 67. – С.78-82. 16. Fudenberg, D., Levine, D.K.: The Theory of Learning in Games. MIT Press, 1998. 17. Jose M. Vidal, Learning in Multiagent Systems: An Introduction from a Game-Theoretic Perspective, In Eduardo Alonso, editor, Adaptive Agents: LNAI 2636. Springer Verlag, 2003. 18. Michael Bowling, Manuela Veloso, An Analysis of Stochastic Game Theory for Multiagent Reinforcement Learning, Tech.Report CMU-CS-00-165, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2000. 19. Michael Bowling, Manuela Veloso, Existence of Multiagent Equilibria with Limited Agents, Tech.Report CMU-CS-02-104, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2002. 20. Льюис Р.Д., Райфа Х. Игры и решения. – М.: Изд-во иност. лит-ры, 1961. – 642 с.