

ЗАДАЧА ФОРМУВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗОН ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ КОЛЕКТИВОМ МОБІЛЬНИХ АГЕНТІВ

© Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Ціж А.М., 2006

Розглянуто проблему розподілу колективом автономних мобільних агентів деякої території з не відомою наперед площею. Метою розподілу є формування однакових для всіх агентів індивідуальних зон відповідальності у межах цієї території. Запропоновано два методи для розв’язання цієї проблеми. Ці методи ґрунтуються на ідеях математичної проблеми вкриття або заповнення деякої обмеженої площини однаковими геометричними фігурами. Наведено також якісне порівняння запропонованих методів.

In this paper the following problem of collective behaviour is considered. The collective of mobile autonomous agents have to divide some territory within unknown boundaries to equal individual areas of responsibility for each agent. Two solutions for this problem are proposed. The solutions are inspired by ideas from mathematical problem of coverage (or packing) some volume by equal patterns. The comparison of these two solutions is provided.

Вступ

Дослідження в галузі багатоагентних систем [1, 2] стають все більш актуальними в світлі технологічних проривів у створенні засобів безпроводного зв’язку, вбудованих обчислювальних засобів та систем розподіленої робототехніки. Нові можливості потребують нових алгоритмічних рішень та методів їхньої програмно-апаратної реалізації. Внаслідок цього інтенсивно шукають нові підходи на перетині існуючих напрямків, таких як теорія автоматичного управління, штучний інтелект, теорія ігор, навчання обчислювальних машин та багатьох інших. Яскравий приклад таких пошуків – це створення так званих тестових задач (task environments, або test problems). Метою їхнього створення є розроблення та дослідження штучних раціональних агентів, які були б спроможні розв’язувати ці задачі. При цьому як наступний крок розглядають можливість використання цих агентів для розв’язання реальних задач, зміст яких за деяких припущень може бути зведений до змісту однієї чи декількох тестових задач. Як приклади такого підходу можна навести: футбол роботів (зокрема віртуальний) [3], задачу про побудову вежі [4], задачу про механічне врівноваження [5] та ін.

У цій роботі підхід на основі тестових задач використано для дослідження задачі автономного формування індивідуальних зон відповідальності колективом мобільних агентів у межах деякої території з не відомою наперед площею. Для розв’язання цієї задачі запропоновано два методи, основані на ідеях математичної проблеми вкриття або заповнення деякої обмеженої площини однаковими геометричними фігурами [6]. У роботі також наведено якісне порівняння запропонованих методів.

Огляд сучасного стану проблеми

У багатьох варіантах використання багатоагентних систем виникає актуальна проблема “справедливого”, або оптимального за деяким критерієм якості розподілу спільного обмеженого ресурсу між агентами. Особливого забарвлення ця проблема набуває в задачах просторової самоорганізації колективу мобільних агентів [7, 8], де роль такого спільного ресурсу належить обмеженій території, на якій розміщено агенти. Серед змістовних інтерпретацій таких задач можна виділити: 1) розподіл ділянок для збирання інформації мобільними агентами у складі вимірювально-

обчислювальних систем автономних розподілених досліджень [9–11], 2) розподіл зон патрулювання мобільними агентами у складі систем виявлення та відстеження порушників [12], 3) розподіл областей розмінування колективом робототехнічних агентів-саперів [13] та ін. Різноманіття змістовних інтерпретацій породжує низку відповідних задач, які відрізняються лише окремими деталями. При цьому як базову універсальну задачу в більшості випадків вигідно розглядати одну тестову задачу – задачу автономного формування індивідуальних зон відповідальності колективом мобільних агентів.

Серед основних підходів до розв’язання цієї задачі можна виділити такі три підходи: 1) на основі зваженої суми векторів “притягання–відштовхування” [14]; 2) на основі ідеї штучного “потенційного поля” [15]; 3) на основі діаграм Вороного [11]. Перші два підходи не оперують поняттям “зона відповідальності” повною мірою. Вони передбачають лише механізм рівномірного розподілу агентів у межах заданої території. Вже після цього шляхом деякої процедури “перемов” [2] агенти можуть узгодити границі індивідуальних зон відповідальності. У межах третього підходу індивідуальні зони відповідальності є еквівалентом комірок Вороного, які утворюються внаслідок відповідного розподілу території. Однак специфіка цього підходу не дає змогу формувати однакові за площею зони відповідальності. З огляду на це питання розроблення методів автономного формування однакових індивідуальних зон відповідальності, які були б наведені повною мірою, є особливо актуальним.

Постановка задачі

Перед колективом мобільних агентів поставлено завдання самостійно за умов відсутності центру управління та локальної інформаційної взаємодії сформувати індивідуальні зони відповідальності з однаковою площею в межах деякої території, периметр та площа якої наперед не відомі. При цьому передбачено, що форма границі заданої території може бути досить складною, а також змінюватись в часі з деякою невеликою швидкістю, яка не перевищує швидкість переміщення мобільного агента. Передбачено також, що ця територія може містити внутрішні області, які неможливо або непотрібно вводити до зони відповідальності агентів. Початково агенти в межах території можуть розташуватись за одним з чотирьох варіантів: 1) компактною групою в центрі території; 2) компактною групою біля границі території; 3) розосереджене випадкове розташування; 4) розосереджене розташування за периметром території.

Розв’язання задачі

Запропоновані нижче методи ґрунтуються на ідеях математичної проблеми вкриття або заповнення деякої обмеженої площини однаковими геометричними фігурами. На основі проведеного аналізу для цієї задачі як таку геометричну фігуру обрано круг. На цей вибір зокрема вплинула наша попередня робота, присвячена параметричній самоорганізації [16], де в одному з алгоритмів використано принцип «роздування» кругів для вирішення задачі оточення зони збурень. Фундаментально математичну проблему вкриття або заповнення за допомогою кругів досліджено в роботі [6], де встановлено основні співвідношення між розміром кругів, їхньою кількістю та розміром і формою заданої площини. При цьому алгоритми побудови систем вкриваючих або заповнюючих площу кругів в цій роботі не розглядаються. Необхідно також зауважити, що проблема вибору деякої найкращої фігури, яку можна використати для вкриття або заповнення з відповідно мінімальною площею перекривання фігур або мінімальною площею вільних ділянок, математично не розв’язана. Тобто розроблення процедури синтезу такої найкращої фігури є завданням на майбутнє.

У запропонованих нижче методах формування зон відповідальності площа, за яку відповідає агент, визначається кругом з радіусом R , в центрі якого знаходиться агент. З прикладних міркувань перевагою такого подання зони відповідальності є мінімально можливий набір величин (лише радіус і координати агента). Крім цього, для зони відповідальності у вигляді круга набагато легше “уникнути” внутрішніх областей, які неможливо або непотрібно вводити до зони відповідальності

агентів. З точки зору практичної реалізації можна зазначити деяку аналогію між колами зон відповідальності та колами діаграм напрямленості засобів радіозв'язку мобільних робототехнічних агентів або зонами видимості їхніх сенсорних систем. На основі цих аналогій можна вести мову про ряд змістовних інтерпретацій задачі автономного формування індивідуальних зон відповідальності.

Отже, задача формування зон відповідальності зводиться до задачі вкриття або заповнення площі колами однакового радіусу. Вкривши або заповнивши всю площу заданої території однаковими колами, ми розділимо її поміж агентами так, що кожен з них контролюватиме територію свого кола. При цьому вкриття відрізняється від заповнення тим, що воно: 1) дає змогу колам частково перекриватися; 2) передбачає повне вкриття заданої площі колами без жодних вільних від кіл ділянок. На відміну від нього заповнення: 1) не дає змоги колам перекриватися (кола можуть лише дотикатися один до одного); 2) передбачає, що в результаті заповнення залишаються вільні від кіл ділянки. Тому можна розглядати два такі варіанти розв'язання задачі.

1) на основі ідеї повного вкриття території однаковими колами. У цьому випадку індивідуальні зони відповідальності частково перекриватимуться. При цьому загальна площа системи відповідних кіл складатиме щонайменше 120,9 % від площі території [6]. Тобто в найкращому випадку агенти спільно контролюватимуть 20,9 % загальної площі території.

2) на основі ідеї заповнення території однаковими колами. У цьому випадку між індивідуальними зонами відповідальності утворюються вільні ("нічийні") ділянки. При цьому в найкращому випадку колами буде вкрито 90,69 % площі території [6]. Тобто на вільні ("нічийні") ділянки припадатиме щонайменше 9,31 % загальної площі території.

Якщо однаково трактувати зони спільного контролю та вільні ("нічийні") ділянки як нерозділену поміж агентами територію, то переважатиме варіант на основі ідеї заповнення, оскільки цей варіант має менший відсоток нерозділеної території (9,31 % проти 20,9 %). Отже, розглядатимемо саме цей варіант розв'язання задачі. З іншого боку, доцільність використання того чи іншого варіанта можна визначити деякою практичною задачею, для розв'язання якої застосувати запропоновані рішення. У межах цієї задачі, наприклад, можна передбачити вирішення проблеми спільного контролю над ділянками, що перекриваються (варіант на основі вкриття) або проблеми розподілу вільних ("нічийних") ділянок (варіант на основі заповнення).

Треба також зауважити, що поряд з виконанням задачі формування зон відповідальності (розподілу території), як правило, завжди розглядається задача "захоплення" території (поширення колективу агентів у напрямку вільного місця з метою охоплення якомога більшої площі території). Ці дві задачі можна розв'язувати або послідовно (спочатку "захопити" задану територію, а вже згодом розподілити її між агентами), або одночасно (відразу розподіляти територію між агентами в процесі її "захоплення"). Обидва шляхи мають свої області застосування. Відповідно можна запропонувати такі два методи розподілу території (формування зон відповідальності).

Метод незалежного розподілу

За цим методом (рис. 1) агенти розходяться на вільні місця і в процесі руху незалежно один від одного збільшують радіус свого кола (процедура "роздування"). Агенти, які не мають місця для "роздування", не рухаються, а чекають на вільне місце, яке утвориться, коли сусідні агенти розійдуться. Територія повністю вкривається колами різного радіуса, а отже, наступний етап – це етап вирівнювання радіусів усіх кіл. Сусідні агенти створюють локальні групи, в межах яких знаходять середній радіус, спільний для усіх представників групи. Вільне місце, яке утворюється в процесі вирівнювання радіусів, "захоплюється" колами інших агентів, після чого знову запускається процедура вирівнювання радіусів. Ці етапи по чергово тривають, доки не буде досягнуто заданої точності розподілу території у вигляді максимального допустимого розходження радіусів різних кіл. Тоді територія розподілиться між усіма агентами рівномірно. Крім цього, чергування етапів "захоплення" вільного місця та вирівнювання радіусів кіл дає агентам змогу динамічно прилаштовуватися до змін території, коли її площа та периметр динамічно змінюються.

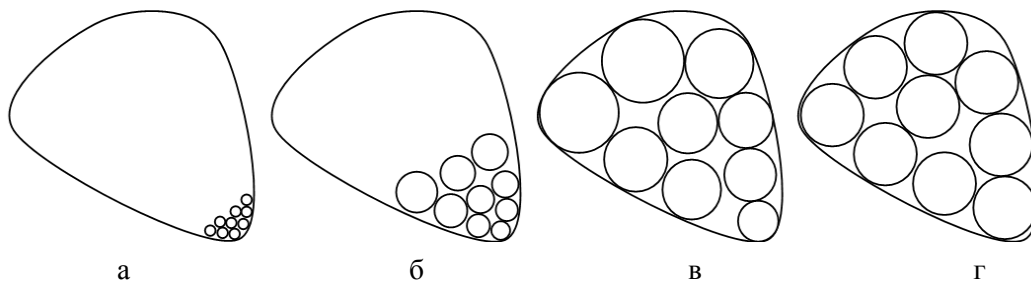


Рис. 1. Метод незалежного розподілу:

а – початковий стан; *б* – “роздування” кругів та рух агентів у напрямку вільного місця; *в* – завершення процесу “роздування” кругів та початок процесу вирівнювання кругів; *г* – кінцевий стан

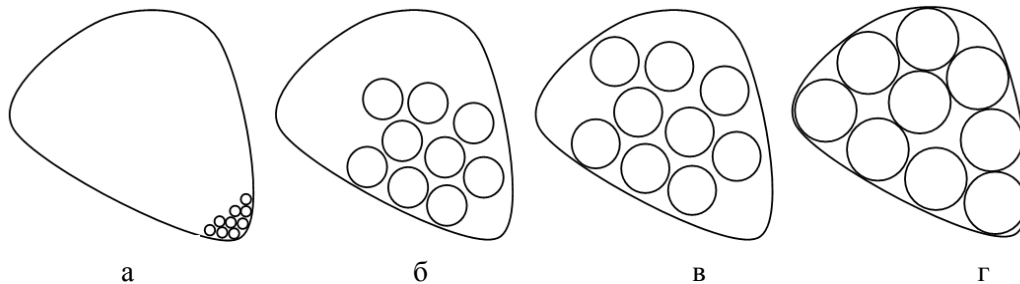


Рис. 2. Метод узгодженого розподілу:

а – початковий стан; *б, в* – узгоджене “роздування” кругів та рух агентів у напрямку вільного місця; *г* – кінцевий стан

У межах методу незалежного розподілу можна запропонувати такий алгоритм поведінки окремого мобільного агента.

- 1) якщо навколо є вільне місце, то
 - збільшити радіус круга;
 - рухатись у напрямку вільного місця і в напрямку “від інших агентів”;
 - перейти на пункт 1;
- 2) інакше:
 - чекати, доки не з’явиться вільне місце внаслідок розходження сусідніх агентів;
 - вирівняти радіус свого круга відносно радіусів кругів сусідніх агентів;
 - перейти на пункт 1.

Особливістю цього методу є те, що “захоплення” території відбувається швидко, але у результаті розподіл території є нерівномірним. Тобто внаслідок незалежності дій агентів виникає проблема різних за радіусом кругів. Це призводить до необхідності вирівнювання радіусів, що можна розцінювати як додаткові витрати часу та енергоресурсів на розв’язання задачі. Тобто цей спосіб розподілу доцільно використовувати в задачах, де одним з основних критеріїв ефективності є мінімізація часу отримання першої інформації про всю досліджувану територію. Це, наприклад, може бути інформація про приблизну форму та величину площі території або інформація про величину деякого інтегрального параметра (наприклад, характеристика температурного поля в межах певної території).

Метод узгодженого розподілу

За цим методом (рис. 2) агенти розходяться у напрямку вільного місця і, якщо в агентів є така можливість, то вони одночасно та узгоджено збільшують радіуси своїх кругів (“роздуваються”). Якщо хоча б в одного з агентів немає можливості збільшувати радіус свого круга, то він забороняє “роздувати” круги всім агентам. При цьому агенти не припиняють розходитись у напрямку вільного місця, що зменшує локальну “густину” розташування агентів і збільшує відстані між ними для

подальшого “роздування” відповідних кругів. У межах методу узгодженого розподілу можна запропонувати такий алгоритм поведінки окремого мобільного агента.

- 1) якщо навколо є вільне місце, то:
 - 1.1. Якщо є дозвіл на збільшення радіуса круга, то:
 - 1.1.1. Збільшити радіус круга;
 - 1.1.2. Перейти до пункту 1;
 - 1.2. Інакше:
 - 1.2.1. Чекати на дозвіл та рухатись в напрямку "від інших агентів";
 - 1.2.2. Перейти до пункту 1;
2. Інакше:
 - 2.1. Заборонити всім іншим агентам збільшувати радіус круга;
 - 2.2. Чекати, доки звільниться місце;
 - 2.3. Перейти до пункту 1.

Особливістю узгодженого методу є те, що всі агенти завжди (навіть під час процесу розподілу) контролюватимуть однакові за площею зони відповідальності. Крім цього, можна зауважити, що час розподілу території у цьому випадку буде меншим ніж з використанням методу незалежного розподілу, тоді як час отримання першої інформації про всю територію буде більшим. Такий спосіб розподілу доцільно використовувати в задачах, основним критерієм ефективності яких є рівномірний розподіл території між агентами.

Порівняння методів

Результати якісного порівняння наведених вище методів (див. таблицю) дають змогу зробити такий висновок. Перевагою методу незалежного розподілу є лише швидкість “захоплення” території. За рештою критеріїв він поступається методу узгодженого розподілу.

Якісне порівняння методів розподілу території

Критерій оцінки	Метод незалежного розподілу	Метод узгодженого розподілу
Швидкість „захоплення” всієї території	Висока	Низька
Швидкість розподілу території	Низька	Висока
Величина індивідуальних зон відповідальності в процесі розподілу території	Різна для різних агентів*	Однакова для всіх агентів
Складність протоколу інформаційної взаємодії агентів	Висока**	Низька***
Інтенсивність обміну інформацією між агентами	Висока	Низька

* Залежить від розташування агента в колективі та відстані, яку він пройшов.

** Передбачається обмін інформацією про поточні значення радіусів кругів у межах процедури вирівнювання радіусів.

*** Передбачено обмін інформацією лише про загальний дозвіл або заборону збільшувати радіус круга.

Зауваження

Для підвищення щільності розподілу території на зони індивідуальної відповідальності доцільно розглянути можливість використання різних систем взаєморозташування однакових за розміром кругів. Серед основних таких систем можна виділити: 1) випадкове заповнення; 2) впорядковане “ортогональне” заповнення; 3) впорядковане заповнення з розташуванням у вершинах правильних трикутників. Остання система взаєморозташування згідно з [6] забезпечує максимальну щільність розподілу території. Якщо у межах цієї схеми взаєморозташування перейти від зон відповідальності у формі кругів до зон відповідальності у формі шестикутників, то можна повністю позбавитись від вільних ділянок між цими зонами.

Висновки

Розглянуто задачу розподілу колективом автономних мобільних агентів деякої території з невідомою наперед площею з метою формування однакових для всіх агентів індивідуальних зон відповідальності у межах цієї території. Запропоновано два методи для розв'язання цієї задачі на основі ідей математичної проблеми вкриття або заповнення деякої обмеженої площини однаковими геометричними фігурами. Наведено результати якісного порівняння запропонованих методів. Заплановано навести результати обчислювальних експериментів з дослідження запропонованих методів розподілу території, щоби оцінити залежність основних критеріїв ефективності (час виконання задачі та витрати енергії на її виконання) від вхідних параметрів цієї тестової задачі (кількість агентів, розмір та форма границі території, початкове розміщення агентів).

1. *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, by Gerhard Weiss (Editor), MIT Press, 2000. 2. *Woolridge M. An Introduction to MultiAgent Systems*, John Wiley & Sons, 2002. 3. *RoboCup Federation. Official materials.* (www.robocup.org). 4. *Toru Ishida, Real-Time Search for Learning Autonomous Agents*, Kluwer Academic Publishers, 1997. 5. Бочкарьов О.Ю. Вирішення задачі механічного врівноваження колективом мобільних агентів // *Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка"* – 2002. – № 463. – С. 14–18. 6. Том Л. Ф. *Расположения на плоскости, на сфере и в пространстве.* – М.: Глав. изд-во физ.-мат. лит., 1958. – 364 с. 7. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А., Попадюк Х.Р. Самоорганізація колективу мобільних агентів у просторі: формування многокутника // *Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка"*. – 2004. – № 523. – С. 15–23. 8. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А., Попадюк Х.Р. Розробка та розв'язання тестових задач просторової самоорганізації багато-агентної системи // *Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка"*. – 2005. – № 546. – С. 17–23. 9. Мельник А.О., Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю. Нові принципи побудови вимірювально-обчислювальних мереж на основі інтелектуальних агентів // *Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка"*. – 2003. – № 492. – С. 100–107. 10. Бочкарьов О.Ю. Колективна поведінка мобільних інтелектуальних агентів в задачах автономних розподілених досліджень // *Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка"*. – 2005. – № 546. – С. 12–17. 11. Cortes J., Martinez S., Karatas T. and Bullo F. Coverage control for mobile sensing networks // *IEEE Conference on Robotics and Automation.* – May 2002, Arlington, VA. – P. 1327–1332. 12. Мельник А.О., Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Кусьніць О.П. Проблема самоорганізації багато-агентної системи виявлення та відстеження порушників // *Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка"*. – 2005. – № 548. – С. 11–15. 13. Sukthankar G., Sycara K. *Team-aware Robotic Demining Agents for Military Simulation*, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 2000 (<http://www.cs.cmu.edu/~softagents/iaai00/iaai00.html>). 14. Craig W. Reynolds, *Steering Behaviors For Autonomous Characters*, Sony Computer Entertainment America, presented on Game Developers Conference, February 10, 1999. 15. Andrew Howard, Maja J Matari'c, 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, 25–27 June 2002. 16. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А., Грщуляк Т.О. Параметрична самоорганізація колективу автономних вимірювальних агентів: задача оточення зони збурень // *Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка"*. – 2004. – № 523. – С. 6–15.