

(послідовності операцій циклічного зсуву праворуч на один двійковий розряд). Використання вузлів циклічного зсуву на багато розрядів дає змогу скоротити час виконання послідовності зсувів приблизно на порядок, а час виконання алгоритму загалом приблизно на 7–9 %.

З метою зменшення тривалості обчислень рекомендується під час роботи відповідно до стандарту [1] у нормальному базисі використовувати поля зі степенями поліномів $m=281$ та $m=293$

1. Національний стандарт України ДСТУ 4145-2002. Інформаційні технології. Криптографічний захист інформації. Цифровий підпис, що ґрунтується на еліптичних кривих. Формування та перевіряння. – К.: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2003. 2. IEEE Std 1363-2000 IEEE Standard Specifications for Public-Key Cryptography Sponsor Microprocessor and Microcomputer Standards Committee of the IEEE Computer Society. Approved 30 January 2000. 3. Itoh T., Teechai O., Tsujii S. A Fast Algorithm for Computing Multiplicative Inverses in $GF(2^t)$ Using Normal Bases // J. Society for Electronic Communications. – Japan, 1986. – 44. – P. 31–36. 4. Глухов В., Заїченко Н., Оліярник Б. Шифропроцесор для бортових інформаційно-керуючих систем // Наукові нотатки: Міжвуз. зб. (за напрямом “Інженерна механіка”). – 2007. – Вип. 19. Луцький державний технічний університет. – Луцьк, 2007. – С. 33–43. 5. Глухов В.С., Євтушенко К.С., Заїченко Н.В., Оліярник Б.О. Криптографічні засоби спеціалізованої бортової ЕОМ для бронетехніки // Вісн. Хмельницьк. ац. ун-ту. – 2007. – № 2. Технічні науки. – Хмельницький, 2007. – Т. 2. – С. 29–33. 6. Глухов В.С. Операційний пристрій для роботи з елементами поля Галуа, представленими у нормальній формі // Матеріали наук.-техн. конф. ІІІІТ при Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – Львів, 2007. 7. Глухов В.С. Обчислювальний пристрій для операцій над еліптичними кривими // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2006. – № 573. – С. 54–61. 8. Hlukhov V. Improvement of Algorithm for Computing Multiplicative Inverses in $GF(2^m)$ Using Normal Bases. Матеріали конференції ACSN’2007. – Львів, 2007.

УДК 681.3, 621.3

В.А. Голембо, О.Ю. Бочкарьов, Х.Р. Попадюк
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних обчислювальних машин

ПРОБЛЕМА АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОЛЕКТИВНОЇ ПОВЕДІНКИ АВТОНОМНИХ МОБІЛЬНИХ АГЕНТІВ В ЗАДАЧАХ ПРОСТОРОВОЇ САМООРГАНІЗАЦІЇ

© Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Попадюк Х.Р., 2007

Розглянуто підходи до розроблення алгоритмічного забезпечення колективної поведінки автономних мобільних агентів в задачах просторової самоорганізації на основі аналізу особливостей цих задач та різних варіантів комплектації робототехнічної платформи агента.

The approaches to the development of algorithms for collective behaviour of autonomous mobile agents in the tasks of spatial self-organization based on analysis of features of these tasks and various settings of agent’s robotic platform are considered.

Вступ. Розглядається актуальна проблема розроблення алгоритмічного забезпечення багатоагентних систем (колективів агентів) в задачах просторової самоорганізації [1, 2]. Зокрема, обговорюється необхідність та можливість створення відповідного набору алгоритмів, який можна використовувати незалежно від типу мобільної робототехнічної платформи агента. Це, насамперед, зумовлено певною універсальністю задач просторової самоорганізації, вирішення яких потрібне для організації цілеспрямованої поведінки переважної більшості систем розподіленої робототехніки

(колективів мобільних роботів), незважаючи на суттєві відмінності між цими системами. При цьому в різних типах мобільних робототехнічних платформ реалізовані різні можливості щодо сприйняття навколишнього середовища, орієнтації у просторі, переміщення у просторі і т. п. Внаслідок цього кожний тип мобільної робототехнічної платформи вимагає "індивідуального підходу" під час розроблення алгоритмів колективної поведінки для розв'язання однакових чи дуже подібних за змістом задач просторової самоорганізації. Тому актуальними є дослідження можливості створення таких наборів алгоритмів просторової самоорганізації, які були б незалежними від типу робототехнічної платформи агента. Такий набір алгоритмів повинен надавати можливість розв'язання колективом агентів основних типів задач просторової самоорганізації незалежно від типу робототехнічної платформи агента. При цьому треба наголосити, що коли йдеться про незалежність алгоритмів від робототехнічної платформи агента, мають на увазі незалежність від засобів робототехнічної платформи, за допомогою яких агент отримує вхідну інформацію (система навігації, сенсорна система, засоби зв'язку з іншими агентами) та від засобів, за допомогою яких агент переміщується в просторі (реалізує обрані в процесі прийняття рішення дії).

Огляд сучасного стану проблеми. Сьогодні існує велике різноманіття мобільних робототехнічних платформ різного призначення. За даними Європейської економічної комісії ООН, за останні 30 років було створено понад 1 млн. мобільних роботів [3]. Сьогодні в світі (за даними тих самих експертів) нараховується близько 800 тисяч мобільних роботів, що класифікуються за різними ознаками, такими, наприклад, як підсистема переміщення, тип цільового середовища, тип енергозабезпечення, призначення та ін. [4]. Серед усього цього різноманіття на окрему увагу заслуговують системи розподіленої робототехніки або колективи мобільних робототехнічних агентів. Агенти у складі цих колективів розв'язують задачі просторової самоорганізації шляхом виконання певних алгоритмів колективної поведінки [1, 2]. Алгоритми колективної поведінки працюють на основі деяких вхідних даних, які вони отримують від відповідних підсистем робототехнічного агента. Результатом роботи алгоритму є деякі вихідні дані (команди), які, як правило, виконуються підсистемою переміщення робототехнічного агента. Наприклад, вхідними даними можуть бути: місцезнаходження агента, розташування інших агентів колективу, певні дані про середовище (наприклад, температура повітря або вологість) і т. д.; вихідними даними можуть бути: координати точки простору, до якої повинен прямувати агент, напрямок руху, швидкість руху тощо. Вхідні та вихідні дані алгоритму залежать від типу робототехнічної платформи агента, у межах якої він виконуватиметься. При цьому різні робототехнічні платформи надають алгоритму різні вхідні дані і потребують від нього різних вихідних даних для виконання дій згідно з поставленою задачею. Наприклад, одні робототехнічні платформи надають алгоритму дані про напрямок на сусідніх агентів і відстань до них, а інші лише про напрямок; одним робототехнічним платформам треба вказати координати точки простору, до якої треба прямувати, а іншим – напрямок та швидкість руху. Від того, які вхідні дані отримує алгоритм і які вихідні дані він надає робототехнічній платформі, залежить реалізація алгоритму.

Окремо треба підкреслити, що у більшості випадків перед робототехнічними агентами різних типів ставляться однакові чи подібні за змістом задачі просторової самоорганізації. При цьому різні типи відповідних робототехнічних платформ надають і отримують від алгоритмів просторової самоорганізації різні вхідні та вихідні дані, що впливає на реалізацію цих алгоритмів. Тобто різні типи робототехнічних агентів вимагають "індивідуального підходу" до розроблення алгоритмів колективних дій, що вирішують однакові чи подібні за змістом задачі просторової самоорганізації. Тому актуальними є дослідження можливості створення універсального набору алгоритмів просторової самоорганізації незалежних від робототехнічної платформи агента, на якій вони виконуватимуться.

Постановка задачі. Мета роботи – виробити підходи до розроблення алгоритмічного забезпечення колективної поведінки автономних мобільних агентів у задачах просторової самоорганізації на основі аналізу особливостей цих задач та різних варіантів комплектації робототехнічної платформи агента. Розглянути галузі застосування алгоритмів колективної поведінки в практичних задачах просторової самоорганізації.

Вирішення задачі. *Особливості задач просторової самоорганізації.* Проблема самоорганізації колективу мобільних агентів в просторі виникає в тих ситуаціях, коли присутня певна невизначеність стосовно або цього простору, або дій інших агентів колективу [2]. Тобто процес просторової самоорганізації розглядається як поступове подолання колективом мобільних агентів цієї невизначеності. При цьому різні задачі просторової самоорганізації можна класифікувати на основі типу невизначеності, яку долають агенти, розв'язуючи ці задачі. Залежно від того, що саме не відомо агентам, можна виділити три основні типи невизначеності, які можуть так чи інакше існувати в задачах просторової самоорганізації (таблиця).

Типи невизначеності в задачах просторової самоорганізації

| Позначення | Тип невизначеності | Приклад |
|------------|--|--|
| A | Нестача інформації про “геометричні” характеристики середовища | Невідома конфігурація границь території в задачах розгортання колективу агентів у просторі |
| B | Нестача інформації про дії інших агентів (внаслідок децентралізованого управління) | Невизначеність щодо подальшого напрямку руху інших агентів в задачах узгодженого спільного переміщення колективу агентів |
| C | Нестача інформації про динамічні характеристики середовища, які впливають на рух агентів | Невизначеність щодо напрямку та інтенсивності потоків повітря в задачі організації руху роботів-парапланів |

У випадку невизначеності А під “геометричними” характеристиками середовища мається на увазі конфігурація простору, в якому розміщений колектив агентів (границі, рельєф тощо). У найскладніших випадках ця конфігурація може динамічно змінюватись. У випадку невизначеності В можна виділити два основні варіанти: 1) агенти співпрацюють один з одним (В1); 2) агенти протидіють один одному (В2). У випадку невизначеності С передбачається, що динамічні характеристики середовища деяким чином впливають на рух мобільного агента (рухомі перешкоди, течії, зміни коефіцієнта тертя тощо). Це особливо важливо для мобільних агентів, які пересуваються у просторі за допомогою підсистеми переміщення з частковим управлінням. При цьому наведені типи невизначеності не обов'язково присутні у “чистому” вигляді. В кожному конкретному випадку можуть існувати різні комбінації цих невизначеностей.

Оцінка ефективності роботи алгоритмів просторової самоорганізації, як правило, прив'язана до відповідних задач просторової самоорганізації. При цьому робиться акцент на мінімізацію ресурсів, які витрачаються на розв'язання задачі, зокрема енергетичні, обчислювальні, комунікаційні та ін. ресурси. Крім цього, у більшості випадків використовують не один, а систему декількох критеріїв ефективності, серед яких найбільшу вагу мають ті критерії, які найбільше цікавлять користувача. Можна виділити такі основні критерії оцінки ефективності вирішення задач просторової самоорганізації: W_1 – час виконання поставленої задачі; W_2 – витрати енергетичних ресурсів на розв'язання задачі; W_3 – витрати обчислювальних ресурсів; W_4 – навантаження на систему інформаційної взаємодії (витрати комунікаційних ресурсів); W_5 – витрати інформаційного ресурсу; W_6 – показник повноти розв'язання задачі. Крім цього, в деяких випадках відбувається порівняння роботи алгоритму просторової самоорганізації з відповідним ідеальним (еталонним) розв'язком, який, як правило, моделюється у межах обчислювального експерименту.

Варіанти комплектації робототехнічної платформи. Реалізація алгоритмів просторової самоорганізації залежить від типу робототехнічної платформи (типу носія), зокрема від способу організації переміщення агента у просторі, типу середовища, в якому він переміщується, способу навігації та ін. [1, 2]. Усі ці атрибути задачі впливають на склад та вигляд даних, які отримує на вхід алгоритм просторової самоорганізації. Від цих атрибутів залежить також склад та вигляд вихідних даних (команд), які надходять від алгоритму просторової самоорганізації до підсистеми переміщення робототехнічної платформи. При цьому можна зауважити, що від різних атрибутів

задачі структура та параметри алгоритмів просторової самоорганізації залежать по-різному. Тобто для кожного з атрибутів можна визначити своєрідний ступінь залежності алгоритму просторової самоорганізації від цього атрибуту.

Проблема залежності реалізації алгоритмів просторової самоорганізації від основних атрибутів відповідних задач виникає, наприклад, в ситуаціях, коли ці алгоритми треба перенести на робототехнічну платформу іншого типу [5]. При цьому з погляду самої задачі мобільні агенти виконують однакові завдання, тоді як умови і засоби виконання цих завдань змінюються. Цю ситуацію можна проілюструвати на прикладі задачі дослідження деякої території колективом мобільних агентів з метою пошуку цільового об'єкта. Алгоритм розв'язання цієї задачі з погляду організації узгодженої колективної поведінки агентів буде майже однаковим як для наземних колісних роботів, так і для автономних підводних апаратів, які спільно досліджують задану ділянку дна океану. Водночас конкретні реалізації алгоритму в обох випадках сильно відрізнятимуться внаслідок великої різниці між відповідними робототехнічними платформами.

З погляду впливу різних варіантів комплектації робототехнічної платформи на реалізацію алгоритмів просторової самоорганізації, можна виділити п'ять основних параметрів, що характеризують відмінності між цими варіантами: 1) можливості агента щодо керування своїм рухом (підсистема переміщення); 2) спосіб навігації (підсистема навігації); 3) можливості інформаційної взаємодії з іншими агентами (підсистема зв'язку); 4) можливості сприйняття навколишнього середовища (сенсорна підсистема); 5) можливості прийняття рішень (підсистема прийняття рішень). Позначимо кожний з цих параметрів як x_i , сформувавши так множину параметрів $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$. При цьому кожний з параметрів x_i може набувати значень з множини $V = \{v_{ij}\}$, де i – індекс параметра, а j – індекс значення параметра. Конкретне значення параметра v_{ij} визначає склад та вигляд даних, які надходять на вхід алгоритму просторової самоорганізації та з'являються на його виході у вигляді команд. З огляду на це універсальний набір алгоритмів просторової самоорганізації має бути незалежним від множини значень параметрів V .

Набір алгоритмів, не залежних від робототехнічної платформи агента. Аналіз основних напрямків робіт з розроблення алгоритмів колективної поведінки, що не залежать від робототехнічної платформи, дає змогу зробити висновок, що їх основна ідея полягає у забезпеченні алгоритму однаковими даними незалежно від типу робототехнічної платформи [5, 6]. Тобто, йдеться про різні способи адаптації складу та вигляду вхідних та вихідних даних до алгоритму. Як альтернативу цьому підходу можна запропонувати адаптацію алгоритму до складу та вигляду даних, з якими він працює. Тобто алгоритм повинен “вміти” працювати з різними вхідними даними і надавати результати роботи в різних формах. Цікавим варіантом у межах цього підходу може бути ситуація, коли склад та вигляд вхідних та вихідних даних є невідомим наперед, і внаслідок цього необхідний процес адаптації алгоритму відбувається безпосередньо в процесі його роботи.

Нехай деякий алгоритм просторової самоорганізації A можна розбити на окремі функціональні блоки так, що реалізація кожного блоку залежатиме від значення одного параметра робототехнічної платформи x_i (наприклад, лише від способу навігації). Тоді алгоритм A можна представити як множину функціональних блоків a_{kj} , які виконуються послідовно: $A = \{a_{kj}\}$, де k – індекс (порядковий номер) функціонального блоку, i – індекс параметра x_i , від значення якого залежить реалізація цього блоку. Тобто замість алгоритму A , реалізація якого залежить від множини параметрів робототехнічної платформи агента X , ми отримаємо окремі функціональні блоки алгоритму a_{kj} , реалізація кожного з яких залежить від значення одного параметра робототехнічної платформи x_i . При цьому для кожного значення v_{ij} параметра x_i можна реалізувати відповідний варіант функціонального блоку алгоритму a_{kj} , який залежить від x_i . Так ми отримаємо набір різних реалізацій блоку алгоритму a_{kj} для різних значень v_{ij} : $r_v(a_{kj}, v_{ij})$. Якщо реалізувати так усі блоки алгоритму, отримаємо множину реалізацій блоків алгоритму: $R_a = \{r_v(a_{kj}, v_{ij})\}$, тобто реалізацію алгоритму A для різних робототехнічних платформ. У межах цього підходу конкретна робототехнічна платформа агента задається як множина значень параметрів, від яких залежить алгоритм: $P = \{(x_i, v_{ij})\}$. Процес адаптації алгоритму A до заданої конфігурації робототехнічної

платформи P_A задається функціональним перетворенням $F: (P, R_a) \rightarrow A^*$. Складність та вигляд функціонального перетворення F визначається специфікою задачі адаптації алгоритму просторової самоорганізації до робототехнічної платформи агента.

Напрями застосування. Запропонований підхід можна використати для розв'язання складних задач просторової самоорганізації, наприклад, задачі впорядкованого розміщення колективу мобільних робототехнічних агентів у просторі [1, 2], задача розподілу цілей, “лабіринтна” задача, задача відстеження траєкторії, задача локалізації та ін. Розглянемо детальніше деякі з цих задач.

Задача впорядкованого розміщення [1, 2] полягає у побудові впорядкованих просторових структур (наприклад, відрізка лінії, кола чи квадрата) із заданим кроком міжагентної відстані колективом агентів, які спочатку розміщені в просторі випадково. При цьому передбачається, що кожен з агентів здатний виявляти сусідніх агентів (визначати напрям і відстань до них) у деякому обмеженому радіусі видимості (тобто розглядаються агенти з компасом і далекоміром).

У “лабіринтній” задачі перед колективом мобільних агентів ставиться завдання якомога швидше подолати складний двовимірний або тривимірний “лабіринт” усім колективом або знайти вихід з “лабіринту” хоч б одним агентом. Завдання вирішується в умовах децентралізованого управління і обмежень на радіус видимості засобів зв'язку і детектування інших агентів. Відмінність цієї задачі від багатьох аналогічних задач полягає в абстрагуванні від характеристик засобів виявлення стін та перешкод, на які в задачах-аналогах робиться основний акцент. Натомість в цій задачі акцент робиться на різних варіантах колективних дій при подоланні лабіринту.

У задачі локалізації перед колективом агентів ставиться завдання визначити місце знаходження “плями” (обмеженої замкненої області), заданої конкретним значенням деякого параметра (наприклад, температури) або значеннями декількох параметрів. Іншими словами, колектив агентів повинен розташуватися на топологічній лінії заданої величини заданого параметра в умовах обмеженого радіуса видимості засобів зв'язку і детектування. При цьому передбачається, що кожен агент здатний проводити тільки контактні вимірювання, тобто вимірювати величину заданого параметра в тій точці простору, де він у цей момент знаходиться.

Висновки. У статті розглянуто актуальну проблему розроблення алгоритмічного забезпечення багатоагентних систем (колективів агентів) в задачах просторової самоорганізації. Зокрема розглянуто необхідність та можливість створення універсального набору алгоритмів просторової самоорганізації незалежних від мобільної робототехнічної платформи агентів, на яких вони будуть виконуватись. Запропоновано підхід до розроблення набору алгоритмів просторової самоорганізації незалежних від робототехнічної платформи агентів на основі принципу адаптації. Розглянуто напрями застосування запропонованого підходу.

1. Бочкар'єв О.Ю., Голембо В.А., Попад'юк Х.Р. Самоорганізація колективу мобільних агентів у просторі: формування многокутника // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2004. – № 523. – С. 15–23. 2. Бочкар'єв О.Ю., Голембо В.А., Попад'юк Х.Р. Розробка та вирішення тестових задач просторової самоорганізації багатоагентної системи // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2005. – № 546. – С. 17–23. 3. Yoshihiro K. *The International Robot Exhibition 1997, Industrial Robot: An International Journal*. – 1998, Volume: 25 – P. 193–195. 4. Gregor Bo, Robert E. Randall, E. Kurt Albaugh. *In selected applications AUVs work faster and cheaper than tethered vehicles // Offshore*. – January 2002. – P. 64–82. 5. Beckstein C., Dittrich P., Erfurth Ch., Fey D., Konig-Ries B., Mundhenk M., Sack H. *SOGOS – A Distributed Meta Level Architecture for the Self-Organizing Grid of Services // Proceedings of MOSO 2006 – Mobile Services and Ontologies, Nara, Japan, May, 9th, 2006*. 6. Steven G. Chappell, Sai S. Mupparapu, Rick J. Komerska, and D. Richard Blidberg, *SAUV II High Level Software Architecture // Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*. – August, 2005.