

ОРГАНІЗАЦІЯ НАВІГАЦІЇ У КОЛЕКТИВІ АВТОНОМНИХ МОБІЛЬНИХ АГЕНТІВ

© Голембо В.А., Гребеняк А.В., 2012

Запропоновано метод навігації у колективі робототехнічних агентів, який задовольняє потреби колективу в глобальній, локальній та внутрішній навігації. Цей метод не використовує наявних навігаційних систем та може бути застосований для навігації по невідомій території.

Ключові слова: агент, децентралізований колектив, навігація, триангуляція.

The method navigation in collective of robotic agents that satisfies the needs of collective in global, local and internal navigation. This method does not use existing navigation systems, and can be used to navigate through unknown territory.

Key words: agent, decentralized collective, navigation, triangulation.

Вступ

Магістральним напрямом розвитку в багатьох галузях науки, техніки та промисловості є використання замість людини автономних мобільних апаратів [1]. Зрозуміло, що один апарат не може бути використаний для виконання складних задач, бо має обмежені можливості. Саме тому в останні роки все більшу увагу приділяють використанню для розв'язання складних задач групи апаратів, які утворюють децентралізовану розподілену систему, що здатна самоорганізовуватись. Таку групу апаратів часто називають колективом, а її поведінку – колективною поведінкою. В найближчій перспективі проблема колективної поведінки апаратів набуде особливого значення в зв'язку з розвитком мікроробототехніки, що дає змогу наблизитись до вирішення проблеми спільного застосування колективів мікророботів, котрі налічують тисячі апаратів, об'єднаних загальною метою.

Для вирішення проблем, які виникають під час вивчення та застосування колективів апаратів, використовують формальні моделі колективної поведінки (зокрема автоматні моделі), багатоагентні системи, імітаційні моделі (зокрема моделі біологічних об'єктів) [2]. Очевидно, що є численні проблеми, які ускладнюють сумісну роботу колективу автономних апаратів. Одна з найскладніших проблем – проблема навігації в такому колективі, яка досі не знайшла ефективного розв'язання.

Стан проблеми

Будемо користуватись поняттями глобальної, локальної та внутрішньої навігації. Під глобальною навігацією розуміємо визначення координат апарата при руху на довгих маршрутах, а під локальною – розуміємо визначення координат апарата відносно деякої точки [3]. Також розглядатимемо поняття внутрішньої навігації, під якою розуміємо навігацію апарата в межах колективу, наприклад, щоб запобігти зіткненням між апаратами. Більшість з реалізованих систем працюють на вже відомій території, в цьому випадку по периметру території розташовують маяки. Апарат, орієнтуючись за маяками, може пересуватись всередині цієї території. Рух та навігація апарата по невідомій території потребували застосування принципово інших методів, якими стали системи супутникової навігації, такі як GPS, ГЛОНАСС, Galileo, IRNSS, та інерційні навігаційні системи. Коли колектив автономних апаратів повинен діяти в невідомому середовищі, застосування супутникової системи навігації накладає деякі обмеження.

Адже точність цієї системи недостатня. Крім цього, супутникові системи навігації не працюють під водою, під землею, в екранованих приміщеннях. Для таких випадків застосовують інерційні навігаційні системи. Гіроскопи дають змогу вимірювати момент зовнішньої сили, що прикладається до тіла, на якому вони розміщені, і на цій основі визначати положення тіла відносно позиції, з якої почався рух, і його швидкість. Акселерометри схожим способом визначають власне прискорення. Але основним недоліком інерційних навігаційних систем є накопичення помилок під час роботи, тобто чим довше працює апарат, оснащений такою системою навігації, тим більшою буде його похибка у визначенні координат. Ці системи також малоефективні у випадках, коли швидкість апарата часто і різко змінюється.

Найпростіший варіант інерційного навігаційного пристрою колісного апарата – одометр. Він вимірює швидкість обертання колеса і, знаючи діаметр останнього, визначає пройдений шлях. Серед недоліків одометра можна назвати прокручування, проковзування та неоднаковість коліс. Тому одометр постійно накопичує помилки вимірювання. Однак, попри ці недоліки, одометр застосовують дуже активно. Зауважимо, що одометр – це іноді єдине можливе навігаційне рішення, наприклад, якщо апарат розміщений під землею. Для підвищення точності одометра можна застосувати математичні методи корекції [4].

Для організації навігації колективу автономних мобільних апаратів застосовуються різноманітні методи. Використання одного апарата з колективу для передачі поправок на відстань від системи GPS реалізовано в методі, де навігаційні системи кількох апаратів доповнюють один одного [5]. Моделювання поведінки колективів, які існують у природі, на прикладі колонії мурах реалізовано в методі цифрових феромонів [6]. Розвитком цієї ідеї став метод навігації за допомогою порівняння сигналів двох антен, які встановлені на апараті [7]. В методі векторного руху [8] глобальна локальна навігація реалізована за допомогою складного додаткового обладнання. Основні недоліки цих методів детально проаналізовано в [9].

Постановка задачі

Проблему глобальної, локальної та внутрішньої навігації для групи автономних мобільних апаратів, які спроможні діяти в різних фізичних середовищах, не здатні задовольнити системи супутникової навігації та інерційні навігаційні системи. Тому для роботи колективу апаратів у незнайомому середовищі кожен апарат оснащують складним додатковим обладнанням. В зв'язку з цим потрібно запропонувати методи, які б задовольняли потреби колективу апаратів у глобальній, локальній та внутрішній навігації, що не спираються на наявні системи навігації та не ускладнюють кожен апарат в колективі.

Надалі, викладаючи основні положення запропонованого методу організації навігації, замість технічного терміна “апарат” використовуватимемо широковживаний при дослідженні моделей колективної поведінки, зокрема в наших роботах [10, 11], термін “агент”. Агент – створена штучно автономна реальна або віртуальна сутність (сукупність апаратних і програмних засобів), яка спроможна виконувати самостійні цілеспрямовані активні дії у складі колективу або індивідуально в інтересах власника (розробника) або користувача. Під агентом можна також розуміти щось таке (сутність, об'єкт), якому, відповідно до лат. *agens (agentis – діючий)*, притаманна властивість діяти, проявляти активність у системі координат простір–час–параметр.

Метод організації навігації

Запропоновано новий метод організації навігації в колективі автономних мобільних агентів (АМА), що діють в незнайомому середовищі, який задовольняє потреби колективу в глобальній, локальній та внутрішній навігації. Розглянемо роботу цього методу на площині. Кожен агент має одометр. Обмінюючись інформацією про подолану відстань, агенти доповнюють один одного навігаційними даними, отриманими за допомогою одометра. Кожен агент володіє інформацією лише про своїх сусідів.

Наведемо основні процедури самоорганізації колективу АМА: самовиявлення, самоіменування, самоузгодження, самоорганізація в просторі, самоорганізація в часі, самоорганізація за параметром [12].

Під самовиявленням колективу розуміють отримання кожним агентом інформації про інші агенти які, для прикладу, можуть бути розташовані в зоні видимості засобів зв'язку. Самоіменування колективу – це процес присвоєння кожному агенту унікального ідентифікатора (ID), який характеризуватиме його, і є засобом для виділення агента з групи. Під самоузгодженням колективу розуміють процес погодження всіма апаратами деяких спільних величин (одинична відстань – мінімальна відстань руху агента, межі дії зв'язку). Самоорганізація в часі – це приведення всіх агентів колективу до спільного відліку часу для синхронного виконання завдань за умови відсутності “зовнішнього годинника”. Самоорганізація за параметром – це здатність колективу узгоджувати свої дії, наприклад, розміщення та переміщення агентів, на основі даних сенсорних підсистем. Самоорганізація в просторі – це здатність колективу цілеспрямовано керувати розміщенням та переміщенням агентів у просторі.

Вказані вище процедури самоорганізації агентів здійснюються в колективі для виконання задач вищого рівня. Під задачами вищого рівня розуміємо прикладні задачі, які виконують колективи АМА, наприклад, для пошуку, патрулювання, моніторингу тощо, в різних середовищах в інтересах науки, промисловості та у спецзастосуваннях. Для виконання цих задач кожен агент колективу повинен володіти даними про відстань до умовного центра колективу, відстані до сусідів, мати можливість визначати пройдений шлях та знати, в який бік орієнтований весь колектив.

Запропонований метод організації навігації АМА полягає у послідовному виконанні процедур триангуляції, орієнтуванні всіх агентів в один напрям, визначенні умовного центра. Якщо можна визначати відстань між агентами в колективі, відбувається процедура триангуляції. Три агенти утворюють трійку для взаємодії. Визначають своє розташування один відносно одного, і так, хвилеподібно, визначається орієнтування всіх агентів колективу. Маючи дані про розташування агентів, знаходять умовний центр колективу. Знання координат умовного центра колективу необхідні кожному агенту, щоб визначити своє місце в колективі.

Для реалізації зв'язку між агентами можна використовувати різні середовища передачі інформації. Використовувати оптичний чи звуковий канал можна тільки за прямої видимості між агентами. При цьому можна безпосередньо визначити кут розташування одного агента відносно іншого. Використання радіохвиль не вимагає прямої видимості, але при цьому дані про кут розташування не можна безпосередньо визначити. Особливістю запропонованого нами методу є відсутність потреби прямої видимості, адже агенти можуть бути розташовані за перешкодами. Окрім передачі повідомлень за допомогою радіохвилі, можна вимірювати відстань до агента, який отримує повідомлення без прямої видимості. Відстань вимірюється за допомогою вимірювання сили отриманого сигналу RSSI (Received Signal Strength Indication) [13]. Отже, агент, який отримав повідомлення, матиме також інформацію про відстань до агента, який надіслав це повідомлення.

Кожне з повідомлень, якими обмінюються агенти, має певну структуру. Ця структура являє собою набір даних, які передаються між агентами. До них належать запит на утворення трійки агентів, що взаємодіють, завдання для сусідніх агентів, інформація про кути розташування між агентами, маршрут повідомлення про краї колективу, інформація про пряму відстань до умовного центра, а також поле для завдань вищого рівня.

Процедура триангуляції

Триангуляція – планарне розбиття площини на M фігур, з яких одна є зовнішньою безмежною, а решта трикутники [14] (рис. 1, *a*). Задача побудови триангуляції за заданим набором N точок – це задача з'єднання цих точок відрізками, які не перетинаються, таким методом, щоб в отриманій триангуляції між двома точками неможливо було побудувати відрізки без перетину вже наявних. Існує багато методів побудови триангуляції за заданим набором точок. Оптимальним вважається метод, в якому сума всіх ребер між точками мінімальна. Така триангуляція має складність $O(e^N)$ операцій. Тому для більшості прикладних задач такий метод неприйнятний через велику складність. Існують оптимальніші з погляду організації методи побудови триангуляції. Одним з них є триангуляція Делоне. Її складність має $O(N \log N)$ операцій. Відмінною особливістю цього методу є утворення триангуляції на основі даних про відстані до сусідніх точок. Триангуляцією Делоне для множини точок N на площині називають триангуляцію $DT(N)$, таку, що жодна інша точка a з

множини $a \in N$ не міститься всередині кола, описаного навколо будь-якого трикутника з точок $DT(N)$, такого, що жодна з його вершин не є точка a . Інакше: якщо всередину кола, описаного навколо будь-якого трикутника, утвореного з точок, не попадає жодна інша точка триангуляції (рис. 1, б).

Кожен агент після активації робить початкові налаштування: випадковим способом присвоює собі ID. Силу сигналу для зв'язку агент робить мінімальною. Агент більшу частину часу очікує запит на приєднання до трійки. В деякий проміжок часу агент передає повідомлення на утворення трійки. Кожен агент має мати свою трійку, де він буде лідером. Утворені трикутники не повинні дублювати вершини, тобто не має бути трикутників з однаковим складом агентів. Агент може брати участь в безлічі трійок.

Приєднання відбувається так: агент який є лідером трійки, пересилає свій ID агенту, який очікує повідомлення на приєднання до трійки. Разом з цим, агент, який очікує повідомлення, отримує значення відстані. Якщо ID агента, який очікує повідомлення, та ID лідера трійки однакове, то агент, який очікував повідомлення, змінює свій ID. Коли в лідера проходить період розсилання ID, агент, який очікував повідомлення, відправляє в своєму повідомленні ID лідера і свій ID. Якщо агенту – лідеру трійки повернулись два його ID від двох агентів, які очікували повідомлення, то лідер вважає, що він утворив трійку, і починає виконувати триангуляцію Делоне.

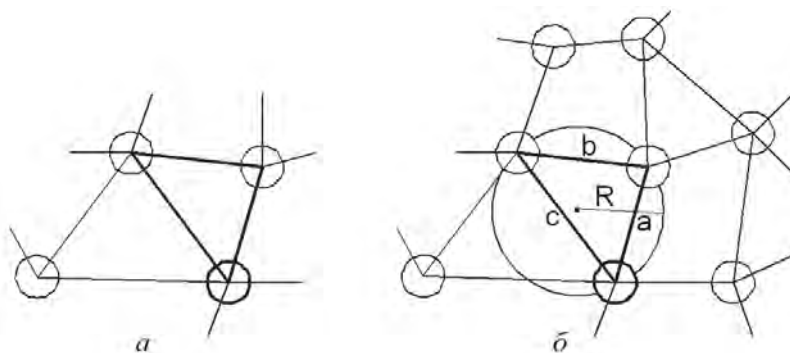


Рис. 1. Триангуляція Делоне: а – утворення трійки, б – описане навколо трикутника коло

З утворених трійок агентів утворюється трикутник, точки вершин якого є агенти, а сторонами є відстані між ними.

Щоб перевірити, чи відповідає утворена трійка умові Делоне, знаходимо радіус кола, описаного навколо вершин трикутника. Сторонами такого трикутника будуть відстані між агентами трійки (рис. 1, б).

Радіус описаного кола виразимо через площу трикутника:

$$R = \frac{abc}{4\sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}}, \quad (1)$$

де a, b, c – сторони трикутника; $p = \frac{a+b+c}{2}$ – половина периметра трикутника.

Отримавши радіус описаного кола, лідер трійки далі посилає повідомлення про запит на утворення трійки. Якщо якийсь новий агент відгукнувся, лідер утворює трикутник у складі нового агента, і агента, який розташований ближче до нього з попереднього трикутника. Якщо розрахований новий радіус з нового агента, агента, котрий розташований ближче, і лідера трійки менший за попередньо розрахований, то лідер розриває трійку з агентом, який розташований далі з попередньої трійки. Процес побудови триангуляції триває безперервно, приводячи до утворення оптимальнішого розподілу.

Агенти виконують триангуляцію, не припиняючи руху. Але оскільки кожен агент може мати безліч зв'язків з іншими агентами, то вони повідомляють також про відстань цьому агенту, яку він подолав. Важливо, що так реалізується принцип багаторазового дублювання одометрів, який використовується для недопущення хибних спрацювань, щоб не накопичувати помилки. Отримавши від кількох агентів дані про своє зміщення і порівнявши ці дані з даними свого одометра, можна з більшою точністю зробити висновки про фактичне зміщення. Також можна вказати агентам, від яких надійшли хибні дані, щоб вони відкоригували свій пройдений шлях.

Всі агенти колективу мають змогу рухатись без перерви, окрім випадків, коли в агента в процесі триангуляції залишається лише одна ланка, і він шукає ще одну ланку для утворення трикутника. В такому разі агент зупиняється до утворення ще одного трикутника.

Процедура орієнтування всіх агентів колективу в один напрям

Наступним кроком після етапу триангуляції є етап орієнтування колективу в одному напрямі. При цьому агенти можуть бути фізично розташовані не в одному напрямі. Але кожен агент має чітко визначити кут свого розташування відносно сусідів. Тобто весь колектив агентів знатиме про своє розташування один відносно одного. Агенти не володіють обладнанням для визначення кута один відносно одного. Задачу визначення кутів агенти реалізують на основі даних про відстані між ними в трійці. Наприклад, троє агентів утворили трикутник $DABC$ з відомими сторонами a, b, c (рис. 2).

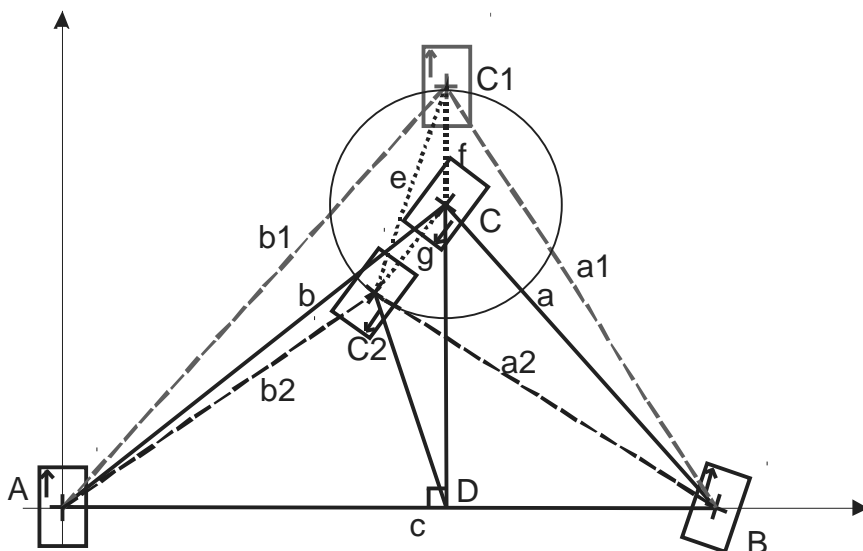


Рис. 2. Визначення орієнтації агента

Лідер трійки – агент A припускає, що всі агенти орієнтовані так само, як і він. Тоді агент A дає вказівку агенту C здійснити зміщення на одиничну відстань f , розраховує отримати трикутник $DABC1$. Кут між агентами A і C за такого припущення дорівнюватиме 0° . Агент C переміщається на одиничну відстань g . Так утворюється трикутник $DABC2$ зі сторонами a_2, b_2, c . Потрібно визначити кут зміщення агента C щодо агента A ($\angle C1CC2$). Агент C , подолавши одиничну відстань, може розташуватись в будь-якій точці на колі з радіусом одиничної відстані. Для визначення кута розташування агента знаходимо висоту трикутника $DABC$ на сторону AB :

$$CD = \frac{2}{AB} \sqrt{p(p-AC)(p-BC)(p-AB)}, \quad (2)$$

де $p = \frac{AB+BC+AC}{2}$ половина периметра трикутника.

Використовуючи (2), знаходимо катет AD прямокутного трикутника $DADC$

$$AD = \sqrt{AC^2 - CD^2}. \quad (3)$$

Використовуючи (2), знаходимо катет BD прямокутного трикутника $DBCD$

$$BD = \sqrt{BC^2 - CD^2}. \quad (4)$$

Прийемо, що агент C орієнтований відносно агента A на деякий кут $\angle a$. В нашому представленні це буде кут $\angle C1CC2$. Цей кут $\angle a$ може бути в межах від $0^\circ < \angle a < 360^\circ$. Визначатимемо кут, під яким агент C розташований відносно агента A , методом перебору. Вважатимемо, що агент C розташований на куті $\angle a = x^\circ$, тоді його відстані до агентів A і B будуть AC_2 і BC_2 . Якщо ці відстані збігаються з вимірними, то $\angle a$ правильний. Якщо відстані не однакові, то змінюємо $\angle a$ і розраховуємо сторони AC_2 і BC_2 , поки не отримаємо сторони, однакові за значенням з вимірними. Для

визначення сторін AC_2 і BC_2 знаходимо кут $\angle CDC_2$. Якщо $\angle a < 180^\circ$, то $x=a$; якщо $\angle a \geq 180^\circ$, то $x = 360^\circ - a$. Звідси знаходимо $\angle CDC_2 = 180^\circ - \angle x$.

Знаходимо сторону C_2D в DCC_2D , маючи сторони CC_2 , CD і кут $\angle C_2CD$,

$$C_2D = \sqrt{C_2C^2 + CD^2 - 2 * CC_2 * CD * \cos(\angle C_2CD)}. \quad (5)$$

Знаходимо кут $\angle CDC_2$ в DCC_2D , маючи всі три сторони і кут $\angle C_2CD$

$$\angle CDC_2 = \arcsin\left(\frac{\sin(\angle C_2CD) * CC_2}{C_2D}\right). \quad (6)$$

Знаходимо сторони AC_2 і BC_2 з трикутників DAC_2D і DBC_2D . Це можна зробити залежно від значення кута $\angle a$:

$$\text{Якщо } AD + BD > AB, \text{ то } \begin{cases} \angle C_2DA = 90^\circ + \angle C_2DC \\ \angle C_2DB = 90^\circ + \angle C_2DC \end{cases}. \quad (7)$$

$$\text{Якщо } \angle a \geq 180^\circ \text{ то } \begin{cases} \angle C_2DA = 90^\circ + \angle C_2DC \\ \angle C_2DB = 90^\circ - \angle C_2DC \end{cases}. \quad (8)$$

$$\text{Якщо } \angle a < 180^\circ \text{ то } \begin{cases} \angle C_2DA = 90^\circ - \angle C_2DC \\ \angle C_2DB = 90^\circ + \angle C_2DC \end{cases}. \quad (9)$$

Знаходимо сторону AC_2 з DAC_2D , підставляючи значення AD , C_2D , $\angle C_2DA$, обчислені у виразах (3), (5), (7), (8), (9),

$$AC_2 = \sqrt{AD^2 + C_2D^2 - 2 * AD * C_2D * \cos(\angle C_2DA)}. \quad (10)$$

Знаходимо сторону BC_2 з DBC_2D , підставляючи значення BD , C_2D , $\angle C_2DB$, які обчислені у виразах (4), (5), (7), (8), (9),

$$BC_2 = \sqrt{DB^2 + C_2D^2 - 2 * DB * C_2D * \cos(\angle C_2DB)}. \quad (11)$$

Порівнюємо отримані й розраховані значення AC_2 і BC_2 . Якщо вони не однакові, змінюємо кут $\angle a$ і розраховуємо знову нові значення AC_2 і BC_2 .

Знайшовши кут зміщення пари агентів між собою, агентів не обов'язково фізично вирівнювати в один напрям. Вони просто повинні знати, як орієнтовані один відносно одного. Коли трійка орієнтована однаково, кожен агент фіксує свій кут зміщення від напрямку орієнтування всього колективу і кількість однаковоорієнтованих агентів. На першому етапі кількість одноорієнтованих агентів дорівнює трьом. Якщо запущений процес одноорієнтування в трійці, то сусідні трійки, до яких входять агенти A , B , C , не можуть почати процес одноорієнтування. Як тільки в трійці всі агенти не виконують процес одноорієнтування, а один з агентів вже орієнтований, то два інші агенти орієнтуються відносно нього і в повідомленні, яке відправлено, для орієнтування наступних трійок, додають до кількості одноорієнтованих агентів ще два (рис. 3, а). Ці цифри в повідомленні про кількість орієнтованих агентів додаються для того, щоб у випадку, коли почнеся орієнтування в трійці, де два агенти вже орієнтовані, трійка переорієнтувалась на агента з більшої групи орієнтованих агентів, тобто так, як орієнтована більша множина агентів. Тоді всі агенти будуть одноорієнтовані, тобто орієнтовані в один напрям (рис. 3, б).

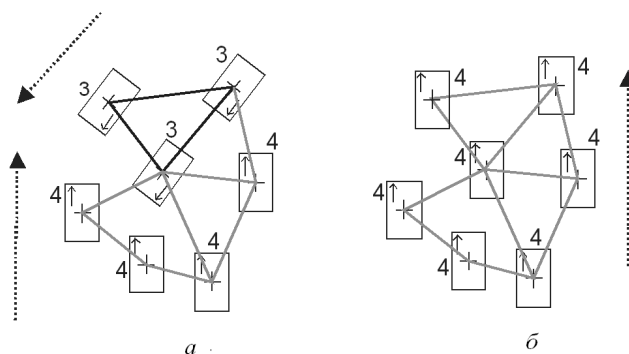


Рис. 3. Процес одноорієнтування:
а – вибір орієнтації колективу; б – колектив, орієнтований в один напрям

Процедура визначення умовного центру

Для вирішення цього питання необхідно ввести поняття умовного центра та країв колективу. Під умовним центром розуміємо агента, який розташований в геометричній середині колективу. Координати цього агента не є фіксовані, а в процесі функціонування можуть змінюватись, залежно від того, який агент буде розташований посередині колективу. Щоб визначити центр колективу агентів, до складу якого входять агенти $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, потрібно знати кількість агентів N і розташування агентів у колективі. Під розташуванням мається на увазі, що кожен агент володіє даними про кут b_i відносно напрямку орієнтування всього колективу. Оскільки агенти вже мають дані про те, як розташовані агенти один відносно одного, а також визначено орієнтування в один напрям, тобто агенти знають, як їм розташуватись, щоб бути однонапрямленими, визначаємо агентів, які є краями колективу. Якщо всі сусіди агента a_i розміщені тільки попереду або поруч, то кути до сусідів будуть в межах від $[0^\circ; 90^\circ]$ або $[270^\circ; 360^\circ]$. Якщо кути до сусідів – в межах $[90^\circ; 270^\circ]$ то агент розміщений позаду колективу. Такий агент a_i посилає повідомлення K , що він крайній знизу, всім своїм сусідам a_{i+1} . Наступні агенти a_{i+1} ретранслюють це повідомлення всім своїм сусідам a_{i+2} , але вже з даними про довжину відстані d_i і дописують в повідомлення також свій ID. Надалі процес повторюється з тією особливістю, що якщо до агента a_{i+x} приходить інформація про розташування крайнього агента a_i від кількох зв'язків a_{i+x-1} , то агент a_{i+x} ретранслює тільки те повідомлення, де коротша сума ланок $\sum_i^{i+x} d_i$ (рис. 4, а).

Так процес триває доти, доки не трапляється агент, у якого всі його сусіди розміщені позаду нього. Якщо повідомлення дійшло до переднього краю, тобто до агента, який не має попереду сусідів, то повідомлення повертається зворотно по маршруту, який міститься в повідомленні K . Всі агенти, які беруть участь в маршруті повідомлення від нижнього краю до верхнього, очікують проходження повідомлення від лівого краю до правого. Якщо агент a_j має сусідів a_{j+1} тільки справа або поруч $[0^\circ; 180^\circ]$, то він надсилає повідомлення K сусідам, що він крайній зліва. Сусіди a_{j+1} так само додають в повідомлення довжину ланки d_j свій ID та відкидають повідомлення з довшою довжиною ланок. Дійшовши до крайнього правого агента, повідомлення повертається. Як тільки повідомлення переходить через агента a_k , який має дані про те, що через нього проходить найкоротший маршрут від нижнього краю колективу до верхнього, то агент a_k посилає всім своїм сусідам a_{k+1} , у повідомленні K , інформацію про те, що він (агент a_k) умовний центр колективу. Паралельно з повідомленням про центр колективу до відправника повертається повідомлення про прохід від лівого краю до правого. Якщо агент і надалі є крайнім, то він ініціює нове передавання повідомлення про лівий край колективу, і так відбувається весь час.

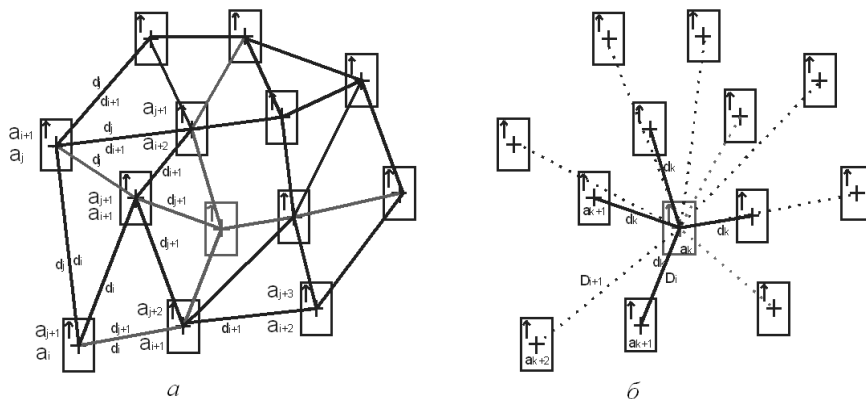


Рис. 4. Процес проходження повідомлення вибору центра:
а – процес вибору умовного центра; б – процес передачі прямої відстані до центра

Сусіди a_{i+1} агента a_i , маючи інформацію про свою відстань d_i від умовного центра колективу a_i , передають сусідам a_{i+2} інформацію про відстань d_{i+1} вже з поправкою на “пряму” видимість, а не на довжину ланок $d_i + d_{i+1}$ (рис. 4, б). Так визначаємо відстань D_{i+x} кожного агента a_{i+x} від умовного центра a_i , а також кут B_{i+x} , кожного агента a_{i+x} до умовного центра a_i відносно напрямку орієнтування всього колективу,

$$\text{якщо } i = n - 1, \text{ то } D_i = d_i, B_i = b_i, \quad (12)$$

$$\text{якщо } i < n - 1, \text{ то } D_i = \sqrt{d_{i+1}^2 + D_{i+1}^2 - 2 \cos(B_{i+1} - b_{i+1}) d_{i+1} D_{i+1}},$$

$$B_i = \arccos\left(\frac{d_{i+1}^2 + D_i^2 - D_{i+1}^2}{2d_{i+1} + D_i}\right). \quad (13)$$

Висновки

У роботі запропоновано метод організації навігації в колективі автономних мобільних агентів, в якому послідовно виконуються процедури триангуляції, орієнтування всіх агентів колективу в один напрям, визначення умовного центра. Перевагою цього методу є можливість застосування глобальної, локальної та внутрішньої навігації у колективі автономних мобільних агентів на невідомій території, а також відносна простота кожного агента: агент не має обладнання для визначення кутів, йому не потрібний точний одометр, він не потребує даних про всіх членів колективу. Застосовано багаторазове дублювання даних одометра для підвищення його точності. Запропоновано метод однакової орієнтації всіх агентів, які утворюють колектив, та метод визначення умовного центра колективу, що дало змогу, застосовуючи метод виявлення орієнтації агентів один відносно одного, реалізувати процедуру самоузгодження колективу автономних мобільних агентів.

1. Бочкар'єв О. Ю., Голембо В. А. *Моделі автономної поведінки вимірювальних агентів* // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп’ютерні системи та мережі”. – 2002. – № 463. – С. 19–27.
2. Субботін С.О., Олійник А.О., Олійник О.О. *Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: монографія / під заг. ред. С.О. Субботіна.* — Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. — 375 с.
3. Бобровський С. *Навігація мобільних роботів* // PC Week/RE № 9 от 16.04.2004, С. 52; № 10 от 23.04.2004, с. 53; № 11 от 30.04.2004, с. 45.
4. Magdalena Dobrzanska, Pawel Dobrzanski. *Navigation software of automated guided vehicle* // Supplement to International Journal “Information technologies and knowledge”, Volume 3 / 2009. – 217 p.
5. Jonathan Dixon, Oliver Henlich. *Mobile Robot Navigation (Final Report)* // Imperial College, London, information systems engineering year 2: Surprise 1997 : http://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_97/journal/vol4/jmd/ 6. Pub. No.: US 2006/161405 A1. *Methods for locating targets and simulating mine detection via a cognitive, swarm intelligence-based approach* / Munirajan V.K. Pub. Date: 2006-07-20.
7. Pub. No.: US 2009/099768 A1. *Methods and Apparatus for Swarm Navigation of Multiple Agents.* / Bauer P.K., Scheutz M.. Pub. Date: 2009-04-16.
8. Pub. No.: WO0208843 A2. *Method and apparatus for controlling the movement of a plurality of agents.* / Howard M., Payton D., Hoff B., Lee C., Daily M.. Pub. Date: 2009-04-16.
9. Голембо В.А., Гребеняк А.В. *Навігація в колективі автономних апаратів* // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп’ютерні системи та мережі”. – 2010. – № 688. – С. 77–83.
10. Мельник А.О., Голембо В.А., Бочкар'єв О.Ю. *Нові принципи побудови вимірювально-обчислювальних мереж на основі інтелектуальних агентів* // Вісник НУ “Львівська політехніка” “Комп’ютерні системи та мережі”. – 2003. – № 492. – С. 100–107.
11. Бочкар'єв А.Ю., Голембо В.А. *Самоорганізація колектива мобільних измерительних агентів в задаче распределенных контактных измерений* // Искусственный интеллект. – Донецк. – 2005. – № 3. – С. 723–731.
12. Голембо В.А., Бочкар'єв О.Ю., Гребеняк А.В. *Проблема організації узгоджених колективних дій автономних мобільних підводних апаратів* // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп’ютерні науки та інформаційні технології”. – 2009. – № 650. – С. 168–173.
13. Восков Л.С., Комаров М.М. *Позиционирования датчиков беспроводной сенсорной сети как способ энергосбережения* // Датчики и системы. – 2012. – № 1. – С. 34–38.
14. Скворцов А.В. *Обзор алгоритмов построения триангуляции Делоне* // Вычислительные методы и программирование. – 2002. – Т.3. – С. 14–39.