

МЕТОД ПОБУДОВИ ЛОКАЛЬНОЇ КАРТИ СЕРЕДОВИЩА МОБІЛЬНОГО РОБОТА

В даній статті розглядаються методи представлення локальної карти середовища, отриманої від інфрачервоних і ультразвукових сенсорів. Запропоновано метод побудови локальної карти середовища мобільного робота, який має меншу обчислювальну складність і вищу універсальність у порівнянні з відомими методами, що є важливим при оперуванні робота в on-line режимі. Результати імітаційного моделювання показали високу точність запропонованого методу.

Актуальність і постановка задачі

Актуальність інтелектуальних мобільних роботів, які спроможні замінити людину в несприятливих і небезпечних для здоров'я людини середовищах, постійно зростає. Під мобільним роботом розуміється технічна система, яка може переміщуватись у просторі або бути стаціонарною та керувати рухами складових частин [1, 2, 3]. Формування інформації про стан довкілля є одною із необхідних компонент автономії мобільного робота. Для представлення навколишнього середовища і навігації в ньому мобільні роботи використовують глобальну та локальну карти довкілля, яка є невід'ємною складовою частиною планування його поведінки. Локальна карта довкілля містить інформацію, обмежену абстрактним "вікном" розмірності W із центром в позиції мобільного робота [4, 5, 6].

Отримання інформації від сенсорів є єдиним способом сприйняття довкілля для побудови локальної карти середовища і необхідною умовою автономії мобільного робота. Сенсори є пристроями з обмеженою точністю, що підлягають впливу завад, тому практичною задачею є отримання достатньо точних параметрів довкілля, в якому оперує мобільний робот [4, 7, 8, 9, 10, 11]. Використання методів злиття сенсорних даних (sensor fusion) є одним із способів забезпечення більш точної та повної інформації про довкілля. Такий підхід дозволяє використовувати переваги кожного типу взаємодіючих сенсорів і взаємно компенсувати їх недоліки [8, 12, 13].

Один з відомих методів побудови локальної карти середовища на основі злиття даних, отриманих інфрачервоними та ультразвуковими сенсорами, дозволяє формувати локальну карту довкілля в радіанній системі координат [14, 15]. Проте цей метод має значну обчислювальну складність і жорстку приналежність до розміщення і кількості сенсорів мобільного робота. Однак функціонування мобільного робота в реальному масштабі часу вимагає спрощення алгоритмів обробки даних. Тому в даній статті розглядається покращений метод побудови локальної карти довкілля мобільного робота, що має меншу обчислювальну складність і вищу універсальність у порівнянні з відомим.

Аналіз останніх досліджень розв'язання задачі побудови локальної карти середовища мобільного робота

Є багато методів для побудови карти довкілля мобільного робота, один з яких базується на представленні довкілля у формі полярних координат. Такий метод характеризує у визначеному радіусі обзору і кутовому діапазоні положення перешкод та відстаней до них. Наприклад, локальна карта середовища радіусом 2.4 метра формується відносно позиції мобільного робота і характеризує розміщення перешкод в кутовому діапазоні від 0 до 180 градусів з кроком 1 градус [14]. Вхідною інформацією для такого підходу є отримані ультразвуковими сенсорами та інфрачервоним сканером дані. Мобільний робот типу "Walter", Germany, на якому розміщено 7 ультразвукових сенсорів і інфрачервоний сканер, був використаний для експериментальних досліджень.

Ультразвукові сенсори, розміщені по периметру мобільного робота (рис. 1а), характеризуються частотою випромінювання 45 Гц, видимою областю для визначення лінійної відстані до перешкоди 10 м і кутом випромінювання 20 градусів. Такий підхід

дозволяє досить точно вимірювати відстань до перешкод, але не дозволяє точно визначити кутові координати до перешкоди, причинами яких є [4, 7]:

- низька точність визначення просторового положення грані перешкод: від 10 до 50 см, в залежності від відстані до об'єкта і кута між його площиною й акустичною віссю;
- ультразвукові шуми зовнішніх джерел і паразитні випромінювання від сусідніх сенсорів (тобто накладення каналів); завади не завжди можна відфільтрувати, що приводить до помилкового виявлення граней об'єктів;
- дзеркальні відбитки, коли кут між напрямком розповсюдження хвилі і нормаллю до поверхні об'єкта занадто великий; тому поверхня відбиває ультразвукові хвилі, що надходять на неї, повз датчик і перешкоду не буде виявлено.

Кожна з наведених помилок може привести до неправильного визначення відстаней до перешкод, що викликає некоректну поведінку робота.

Інфрачервоним сканером мобільного робота "Walter" застосовується сканер RS-180 фірми "Lauze electronic". Видима область інфрачервоного сканера характеризується радіусом від 0.3 до 2 метрів. Інфрачервоний сканер розділяє простір 180 градусів на 36 секторів (рис. 1b). Кутовий діапазон одного сектора становить 5 градусів. Точність отриманих інфрачервоним сканером даних залежить від різних зовнішніх факторів і від типу поверхні перешкод, від яких відбивається промінь сканера [16]. Похибка визначення лінійних відстаней до перешкоди інфрачервоним сканером значно більша ніж ультразвуковими сенсорами. Таким чином, алгоритм побудови локальної карти середовища полягає в злитті отриманих ультразвуковими і інфрачервоними сенсорами даних для точного визначення лінійних і кутових відстаней до перешкод.

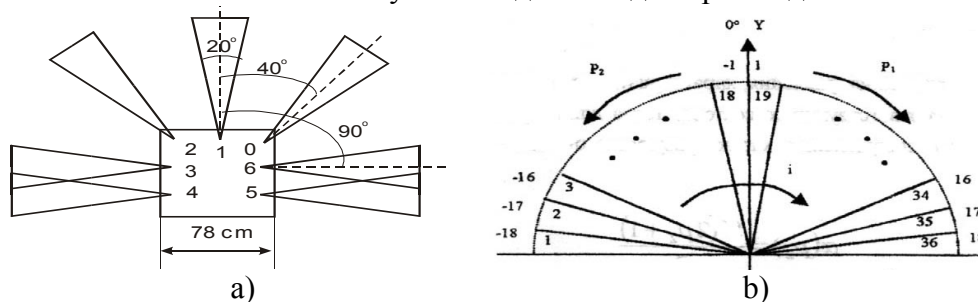


Рис. 1. Розміщення ультразвукових сенсорів (а) та інфрачервоного сканера (б)

Для побудови локальної карти середовища пропонуються 3 основні етапи [14]:

- 1) формування карти середовища мобільного робота в діапазоні дії ультразвукових сенсорів 0, 1, 2;
- 2) формування карти середовища мобільного робота в діапазоні дії ультразвукових сенсорів між 0 і 6 та 2 і 3;
- 3) формування карти середовища мобільного робота в діапазоні дії ультразвукових сенсорів 3, 4 і 5, 6.

Розглянемо формування локальної карти середовища згідно з етапом 1 (рис. 2a). Нехай $U(i)$ відображає відстань до перешкоди, яку визначає i -й ультразвуковий сенсор, $IR(p)$ відстань до перешкоди, яку визначає p -й інфрачервоний сканер. В якості кутового напрямку для інфрачервоного сканера вибирають середину відповідного сектора. Розглянемо формування карти середовища між 1 і 0 ультразвуковими сенсорами. Такий самий підхід використовується для формування карти середовища між 1 і 2 ультразвуковими сенсорами. Область дії нульового ультразвукового сенсора може покривати 6...9 сектори інфрачервоного сканера, а першого ультразвукового сенсора – 2...2 сектори відповідно.

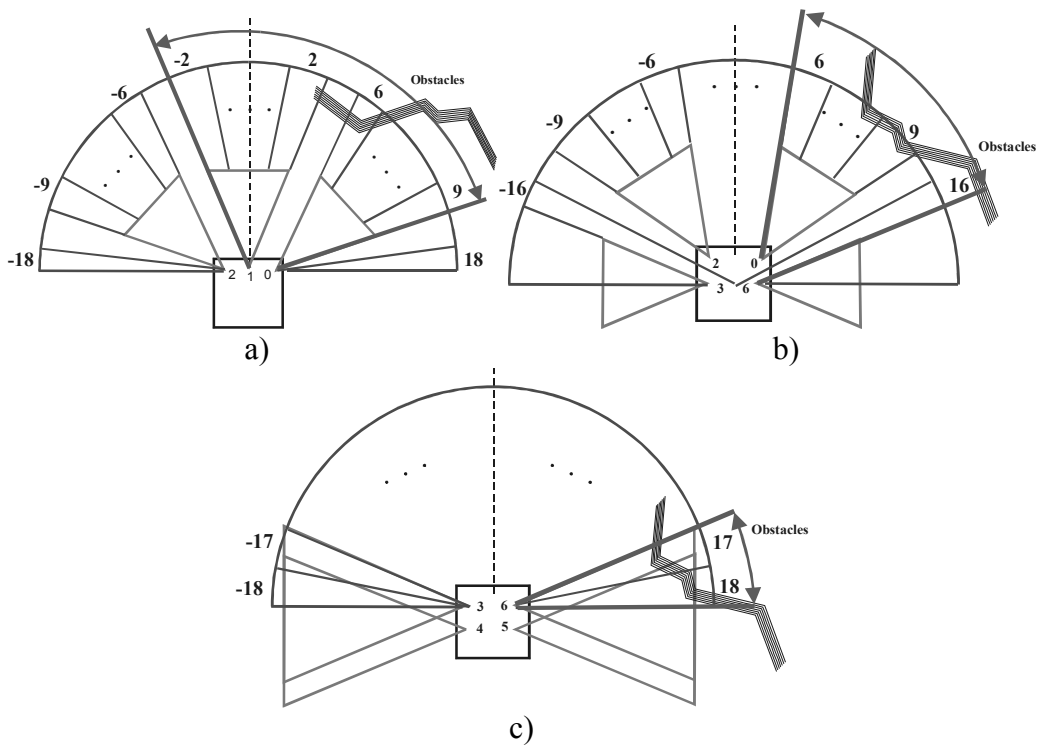


Рис. 2. Етапи формування локальної карти середовища мобільного робота

Для побудови карти середовища на етапі 1 необхідно виконати 4 основні кроки:

- 1) для кожного ультразвукового сенсора визначаємо сектор сканера, який відповідає мінімальній різниці між показами лінійної відстані до перешкоди:

$$k_1 = \min_p |U(1) - IR(p)|, \quad p = \overline{-2...2};$$

$$k_2 = \min_p |U(0) - IR(p)|, \quad p = \overline{6...9},$$

тоді сектори $k1$ і $k2$ однозначно відображають кутові напрями до перешкоди $a(k1)$ і $a(k2)$ (рис. 3).

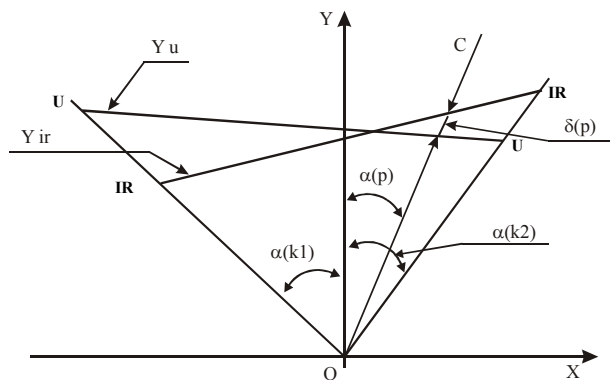


Рис. 3. Геометрична інтерпретація побудови карти середовища

- 2) здійснюємо відображення показів інфрачервоного і ультразвукових сенсорів згідно з напрямками $a(k1)$ і $a(k2)$ в системі координат робота (точки U і IR прямих $k1$ і $k2$ на рис. 3); за двома точками показів сенсорів згідно з напрямками $k1$ і $k2$ будуємо рівняння прямих Y_u і Y_{ir}

$$Y_u = f(X_u);$$

$$Y_{ir} = f(X_{ir});$$

- 3) для кожного сектора сканера p , для якого $p=[k1...k2]$, визначаємо координати точок перетину прямої OC , що характеризує кутовий напрям відповідного сектора інфрачервоного сканера, із прямими $Yu Yir$; після цього обчислюємо відстань між даними точками:

$$\delta(p) = b\sqrt{(X_u(p) - X_{ir}(p))^2 + (Y_u(p) - Y_{ir}(p))^2}, \quad p = \overline{k1..k2};$$

$$b = \begin{cases} 1, & \text{if } \sqrt{X_{ir}^2(p) + X_u^2(p)} < \sqrt{X_u^2(p) + X_{ir}^2(p)}, \quad p = \overline{k1..k2}; \\ -1, & \text{else} \end{cases}$$

- 4) здійснюється побудова локальної карти середовища між секторами ультразвукових сенсорів 0, 1 шляхом корекції даних, отриманих від сканера на значення δ :

$$MAP1(p) = IR(p) + \delta(p), \quad p = \overline{k1..k2};$$

при цьому, якщо покази ультразвукових сенсорів більші 2.4 метра, то корекція отриманих сканером даних не проводиться.

В результаті отримуємо локальну карту середовища між 0 і 1 сенсорами. Такий самий підхід застосовується для побудови карти середовища в області між 1 і 2 сенсорами.

На другому етапі формування карти середовища мобільного робота здійснюється в діапазоні від 6 до 16 і від -6 до -16 секторів інфрачервоного сканера (рис. 2b).

Формування карти середовища на цьому етапі поділяється на 2 підетапи:

- а) визначається відстань δ тільки за напрямом $k2$, яка відображає мінімальну різницю між показами ультразвукового сенсора 0 і показами секторів 6...9 інфрачервоного сканера

$$\delta(p) = b\sqrt{(X_u(p) - X_{ir}(p))^2 + (Y_u(p) - Y_{ir}(p))^2}, \quad p = k2;$$

$$b = \begin{cases} 1, & \text{if } \sqrt{X_{ir}^2(p) + X_u^2(p)} < \sqrt{X_u^2(p) + X_{ir}^2(p)}, \quad p = k2; \\ -1, & \text{else} \end{cases}$$

- б) якщо покази нульового сенсора і сканера більші за 2.4 метра, то корекція показів інфрачервоного сканера не проводиться. Інакше проводиться корекція показів кожного сектора сканера у відповідній області.

$$\begin{cases} MAP1(p) = IR(p) + \delta(p), & p = \overline{k2...k16}, \text{ if } [IR(p) \text{ and } U(p)] < 2.4 \text{ meter}; \\ MAP1(p) = IR(p), & p = \overline{k2...k16}, \text{ else.} \end{cases}$$

Аналогічним чином формується карта середовища в області -6...-16 секторів інфрачервоного сканера.

На третьому етапі будується карта середовища секторів 17, 18 і -17, -18 інфрачервоного сканера (рис. 2с).

Для цього етапу необхідно виконати наступні кроки:

- а) сектори 17 і -17 заповнюються показами 6 і 3 ультразвукових сенсорів відповідно без проведення корекцій

$$MAP1(17) = IR(17);$$

- б) даними для 18 і -18 секторів використовуються усереднені покази ультразвукових

сенсорів 6, 5 і 3, 4 відповідно

$$MAP1(18) = \frac{U(5) + U(6)}{2}$$

В результаті отримуються покази 36 секторів, які характеризують відстані до перешкод.

Для отримання детальнішої карти середовища мобільного робота, яка складається із 180 секторів, потрібно виконати додаткові перетворення:

1. Всі кутові напрями секторів 18 і -18 з кроком 1 градус заповнюються лінійними відстанями, які відповідають даним секторам

$$\begin{cases} MAP(i) = MAP1(1), & \text{for } i = \overline{0 \dots 5^\circ}; \\ MAP(i) = MAP1(36), & \text{for } i = \overline{175^\circ \dots 180^\circ}. \end{cases}$$

Для інших секторів від -17 до 17 лінійні відстані до перешкод відповідають їх серединам.

2. Проводиться з'єднання отриманих точок відрізками прямих ліній і розрахунок відстаней до цих ліній із кроком в 1 градус в діапазоні від -17 до 17 секторів інфрачервоного сканера

$$MAP(i) = LINE[MAP1(p), MAP1(p+1)], \quad \text{для } i \in [p, p+1], \quad p \in \overline{2 \dots 35}.$$

3. Здійснюється обмеження області огляду карти середовища радіусом 2.4 метра

$$\begin{cases} MAP(i) = MAP(i), & \text{if } MAP(i) < 2.4 \text{ meter}, \quad i = \overline{1 \dots 180}; \\ MAP(i) = 2.4 \text{ meter}, & \text{if } MAP(i) \geq 2.4 \text{ meter}, \quad i = \overline{1 \dots 180}. \end{cases}$$

В результаті виконання цих дій отримуємо карту середовища мобільного робота в діапазоні від 0 до 180 градусів (рис. 4).

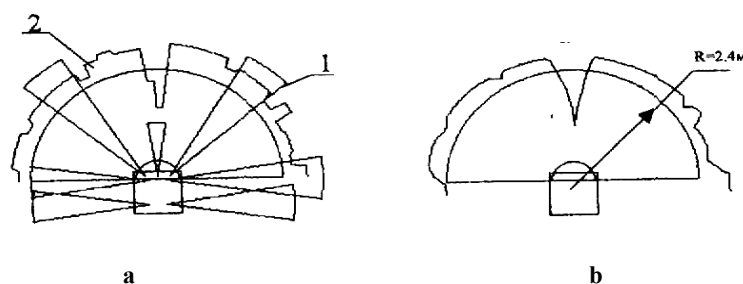


Рис. 4. Локальна карта середовища мобільного робота:

а) вхідні дані від ультразвукових сенсорів (1) і інфрачервоного сканера (2);

б) локальна карта середовища. Таким чином, розглянутий підхід до формування карти середовища мобільного робота характеризується: складністю реалізації алгоритму, враховуючи множину етапів, які потрібно виконати; сильною приналежністю до апаратної частини робота (фіксованої позиції сенсорів); неуніверсальністю програмного забезпечення, яке при зміні апаратної частини буде неспроможне коректно формувати карту середовища; неефективністю використання показів інфрачервоних сенсорів в діапазоні секторів -18 і 18; невисокою точністю визначення відстані до перешкоди, враховуючи лінеаризуючий підхід для інтерполяції карти середовища.

Запропонований нижче підхід дозволяє усунути вище наведені недоліки для фо-

рмування карти середовища мобільного робота.

Запропонований метод побудови локальної карти середовища

Прототипом до виконання покращеного методу формування локальної карти середовища мобільного робота розглянуто перший етап, який описаний вище. На відміну від прототипу, запропонований метод складається з одного етапу і містить 5 кроків. Вхідною інформацією цього методу є покази ультразвукових та інфрачервоного сенсорів (рис. 5). Результатом запропонованого підходу є карта середовища мобільного робота, яка будується в полярній системі координат в діапазоні від 0 до 360 градусів в залежності від кількості розміщених на мобільному роботі сенсорів з кроком 1 градус.

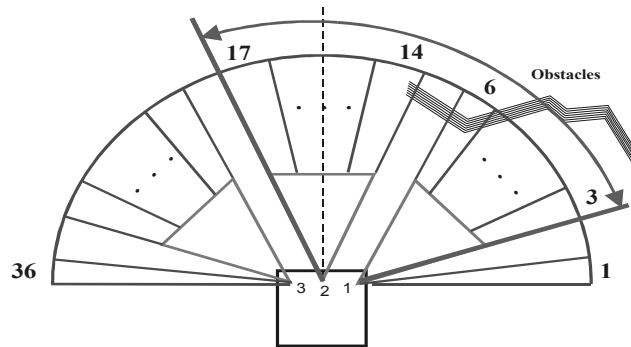


Рис. 5. Графічна інтерпретація покращеного методу формування локальної карти середовища мобільного робота

Розглянемо детальніше алгоритм запропонованого методу формування локальної карти середовища, на прикладі мобільного робота “Walter”, із тими ж технічними характеристиками що і прототипа:

1. Визначається сектор сканера для кожного ультразвукового сенсора, який відповідає мінімальній різниці між показами сенсорів щодо лінійної відстані до перешкоди:

$$k_i = \min_p |U(i) - IR(p)|, \quad p \in i, \quad i = \overline{1..Size(U)},$$

де i – кількість ультразвукових сенсорів мобільного робота, p – номер сектора інфрачервоного сканера.

2. Визначаються покази інфрачервоних і ультразвукових сенсорів згідно з напрямками $a(k_i)$ і $a(k_{i+1})$ в системі координат робота (точки U і IR прямих k_i і k_{i+1} на рис. 6). За двома точками показів сенсорів згідно з напрямками $k1$ і $k2$ будуємо рівняння прямих Y_u і Y_{ir}

$$Y_u = f(X_u);$$

$$Y_{ir} = f(X_{ir}),$$

де X_{ir} , Y_{ir} , X_u , Y_u – координати точок прямої лінії, яка з’єднує точки ліній інфрачервоного та ультразвукового сенсорів згідно з рис. 6.

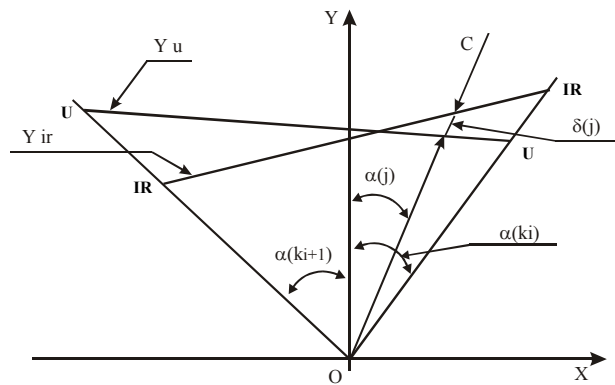


Рис. 6. Геометрична інтерпретація побудови карти середовища

3. Визначаємо координати точок кожного сектора j інфрачервоного сканера $j=k1..k2$. Ці координати лежать на перетині прямих Y_{ir} , Y_u з прямою OC , яка характеризує кутовий напрям секторів інфрачервоного сканера з кроком 1 градус. Обчислюємо коректувальне значення δ між визначеними точками, що призводить до інтерполяції показів між секторами інфрачервоного сенсора і детальнішої карти середовища мобільного робота:

$$\delta(j) = b\sqrt{(X_u(j) - X_{ir}(j))^2 + (Y_u(j) - Y_{ir}(j))^2}, j = \overline{k_i..k_{i+1}}, step = 1;$$

$$b = \begin{cases} 1, & \text{if } \sqrt{X_{ir}^2(j) + X_u^2(j)} < \sqrt{X_u^2(j) + X_{ir}^2(j)}, j = \overline{k_i..k_{i+1}}, step = 1. \\ -1, & \text{else} \end{cases}$$

- 4) Будуємо карту середовища в діапазоні від 0 до 180 градусів. Суть цього етапу полягає в тому, що коректувальні значення додаються до тих значень показів секторів p інфрачервоного сканера, які знаходяться між прямими k_1 і $k_{Size(U)}$, інакше корекція не проводиться:

$$MAP(j) = \begin{cases} IR(p), & j \in p, \text{ if } j < k_1 \text{ OR } j > k_{Size(U)}, p = \overline{1..Size(IR)}, j = \overline{0..180}. \\ IR(p) + \delta(j), & p = \overline{k_i..k_{i+1}}, i = \overline{1..(Size(U) - 1)}, \text{ else} \end{cases}$$

- 5) Обмежуємо радіус карти середовища в залежності від характеристик сенсорів щодо визначення лінійних відстаней до перешкод. Тоді карта середовища мобільного робота базується на відстані 2,4 метра відносно робота, розміщеного в центрі карти

$$\begin{cases} MAP(j) = MAP(j), & \text{if } MAP(j) < 2.4 \text{ meter}, j = \overline{1..180}; \\ MAP(j) = 2.4 \text{ meter}, & \text{if } MAP(j) \geq 2.4 \text{ meter}, j = \overline{1..180}. \end{cases}$$

Результати моделювання

Запропонований метод був програмно реалізований при використанні середовища моделювання Matlab 6.0 [17]. Під час моделювання задавалась конфігурація мобільного робота, який містить 36 секторів інфрачервоного сканера і 5 ультразвукових сенсорів із кутовою спрямованістю 0, 50, 90, 130 і 180 градусів. Похибка інфрачервоного сенсора становить 5 градусів відносно визначення кута до перешкоди і 30 см (пікселів на зображенні) відносно лінійної відстані до перешкоди. Похибка кожного ультразвукового сенсора становить 20 градусів відносно кута до перешкоди і 10 см (пікселів на зображенні) відносно лінійної відстані до перешкоди. Кожен піксель відповідає лінійній відстані 1 см.

Для навігації мобільного робота модель середовища задається у формі бінарної матриці (рис. 7). На рис. 9а представлено побудовану локальну карту середовища в ра-

діанній системі координат на основі показів інфрачервоного сканера (рис. 8а) і показів ультразвукових сенсорів (рис. 8б). Відносні похибки визначення відстаней до перешкод зображено на рис. 9б. Максимальна відносна похибка визначення лінійних відстаней до перешкод запропонованим методом становить 45.8%, тоді як прототипу – 47.1% відносно реальних відстаней до перешкод.

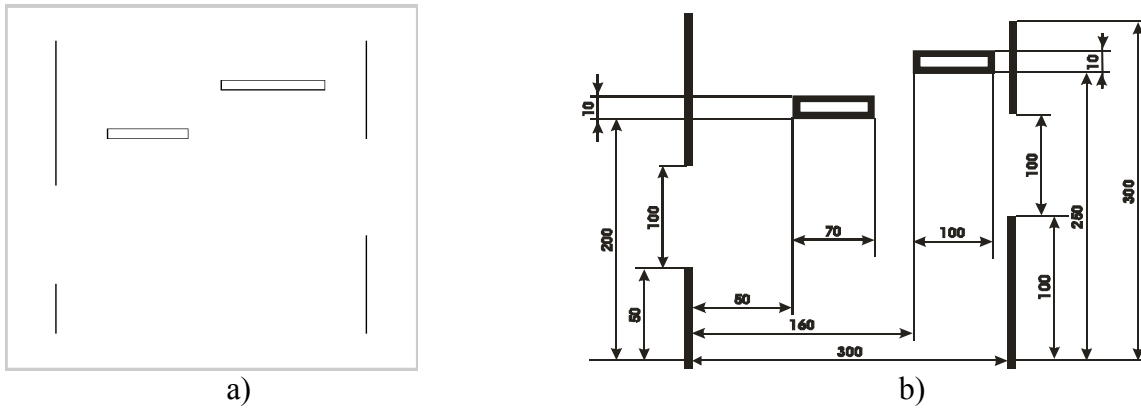


Рис. 7. Модель середовища мобільного робота:
а) бінарне зображення середовища; б) основні розміри середовища

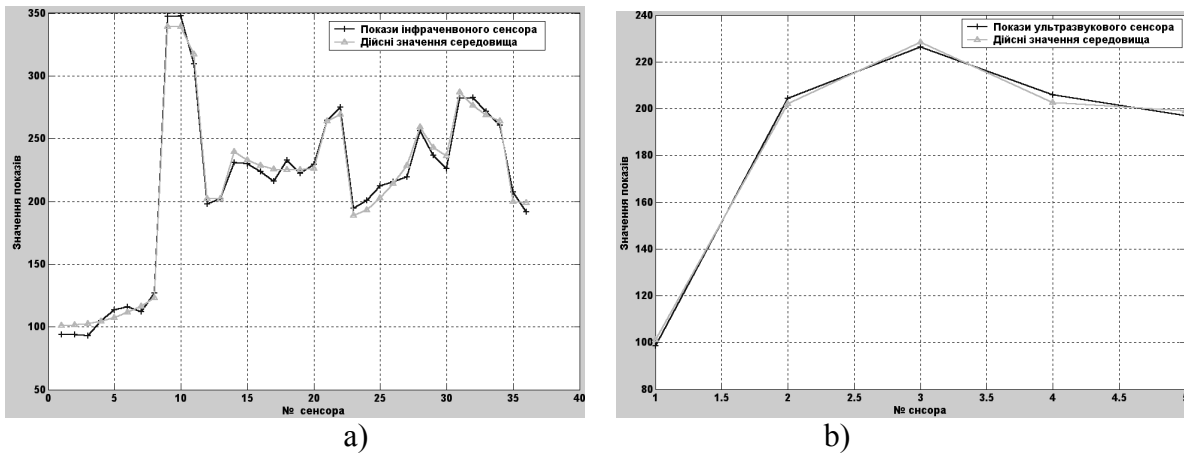


Рис. 8. Покази сенсорів мобільного робота: а) інфрачервоного сканера; б) ультразвукових сенсорів

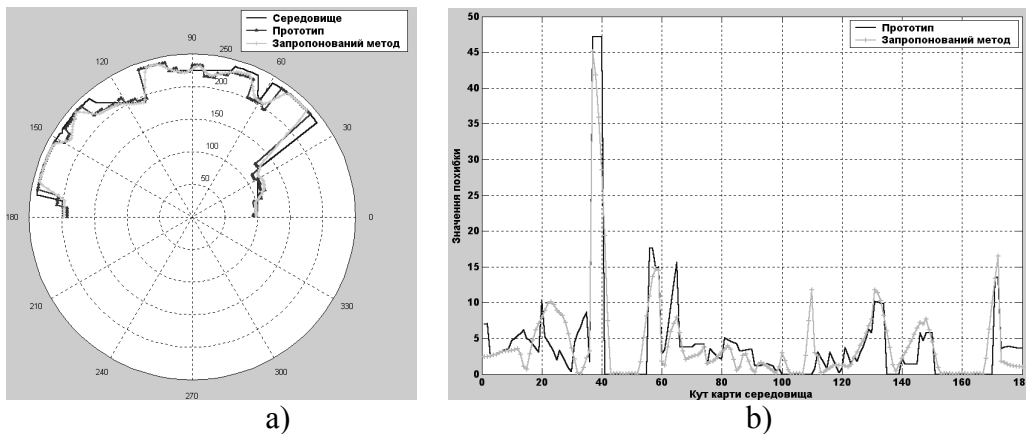


Рис. 9. Результати моделювання роботи вдосконаленого методу формування карти середовища мобільного робота: а) карта середовища в радіанній системі координат; б) відносні відхилення формування середовища вдосконаленого алгоритму і прототипу від реального середовища.

Результати моделювання показали високу точність побудови карти середовища мобільного робота, яка в 1,8 рази вища за точність інфрачервоного сканера щодо визначення лінійної відстані до перешкоди і в 1,2 рази вища, ніж ультразвукових сенсорів щодо визначення кутової відстані до перешкоди. Алгоритмічна складність запропонованого алгоритму становить 0,16 с, тоді як швидкість побудови локальної карти середовища прототипом – 0,22 с, що становить 42,1% та 57,9% загального часу побудови карти середовища двома методами відповідно (дані кількісні показники отримані засобами профілювання розроблених підпрограм в середовищі Matlab 6.0 без використання підпрограм виведення графічної інформації на процесорі AMD Duron 700 МГц).

Висновки

В даній статті висвітлено методи злиття різнорідних сенсорів з метою побудови карти середовища для керування поведінкою мобільного робота. Запропонований метод має меншу обчислювальну складність, ніж відомі методи, є більш універсальним в застосуванні, не має сильної приналежності до апаратної частини мобільного робота і на відміну від прототипу дозволяє легко адаптуватись до змін конфігурації робота.

Подяки

Автор даної статті висловлює подяку NATO Scientific Affairs Division в рамках спільного Україно-Іспанського проекту PST.CLG.978744, “Using Sensor Fusion and Neural Networks Techniques for Robot Control” (2002-2004) за підтримку, яка дозволила отримати описані в даній статті результати.

The construction of local area maps on the based on heterogeneous sensor readings is considered in this paper. Presented in this paper method for the construction of local area maps displays lower calculation complexity and broader universality compared to existing methods and this is important for on-line robot activity. The simulation results showed the high accuracy of the method.

Література

1. Popov E.P., Oismennyj G.V. The robotics bases. - М: “High school”. - 1990 – 224 p.
2. Dorst L. An Introduction to Robotics for the computer sciences, University of Amsterdam. - 1993 -78 p.
3. Durrant-Whyte H. F. Integration, Coordination and Control of Multi-sensor Robot Systems. - Kluwer, Boston, MA – 1988 – 312 p.
4. Joris van Dam. Environment Modeling for Mobile Robots: Neural Learning for Sensor Fusion, Amsterdam: University van Amsterdam – Met lit. opg. - 1998 – 225 p.
5. Barraquand J., Langlois B., Latombe J. Numerical potential field techniques for robot path planning, Report No. STAN CS 89 1285. Dept. of Computer Science, Stanford University. –1989 – 89 p.
6. Besiere P., Dedieu E., Mazer E. Representing robot/environment interactions using probabilities: the beam in the beam experiment, From Perception to Action Conference, IEEE computer society press. - Sept. – 1994 – 73 p.
7. Borenstein J., Koren Y. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. - Vol. 19, No. 5. - Sept./Oct. 1989. - pp. 1179-1187
8. Mongi A. Abidi, Rafael C. Gonzalez. Data fusion in robotics and machine intelligence. Academic Press, Inc. – 1992 – 546 p.
9. Duro R., Santos J., Graña M. Biologically inspired robot behavior engineering. - Physica-Verlag. – 2003 – 438 p.
10. Poncela A., Perez E., Bandera A., Urdiales C., Sandoval F. Efficient integration of metric and topological maps for directed exploration of unknown environments. Robotics and Autonomous Systems. - No. 41 (2002). - pp. 21–39.
11. Maaref H., Barret C. Sensor-based navigation of a mobile robot in an indoor environment. Robotics and Autonomous Systems. - No. 38 (2002) – pp. 1–18.
12. Brooks R., Iyengar S. Multi-sensor fusion: fundamentals and applications with software. Prentice-Hall PTR. – 1998 – 416 p.
13. Crowley J., Demazeau Y. Principles and techniques for sensor data fusion. Signal Processing. - No. 32. - 1993 - pp. 5-27.
14. Golovko V.A. Neurointelligence: theory and application. BPI, Brest. - 1999 - 228 p.
15. Flynn A.M. Combining sonar and infrared sensors for mobile robot navigation. International journal of robotic research. Vol. 7. No. 6. – 1988 – pp. 32-37.
16. Benet G., Blanes F., Simó J., Pérez P. Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots. Robotics and Autonomous Systems. - 2002- No. 40. - pp. 255–266.
17. Chapman S. MATLAB Programming for Engineers. 2nd Edition. Brooks/Cole Publishing Company. – 2002 – 348 p.

Одержано 10.02.2003 р.