

## АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ ЛОКАЛЬНОЇ КАРТИ СЕРЕДОВИЩА МОБІЛЬНОГО РОБОТА

Д.т.н. І.Ш. Невлюдов, Н.П. Демська, К.Є. Скрипник, Харківський національний університет радіоелектроніки

*Розглянуто питання створення програмного продукту для побудови карт місцевості в режимі реального часу та виявлення мобільного робота на побудованій карті. Визначена сукупність датчиків та додаткових пристроїв необхідних для реалізації програми.*

*Рассмотрены вопросы создания программного продукта для построения карт местности в режиме реального времени и выявления мобильного робота на построенной карте. Определенная совокупность датчиков и дополнительных устройств необходимых для реализации программы.*

*The issues of creating a software product for building terrain maps in real time and identifying a mobile robot on the map are considered. A certain set of sensors and additional devices necessary for the implementation of the program.*

**Ключові слова:** інформація, система, робототехніка, рівняння, карта, механіка, рух

### Вступ

Мобільні робототехнічні системи застосовуються сьогодні у різних галузях. Поки основною проблемою всіх нині існуючих мобільних апаратів, які прямують самостійно, без управління з боку людини, залишається навігація. Для успішної навігації в просторі бортова система робота повинна вміти будувати маршрут, управляти параметрами руху (задавати кут повороту коліс і швидкість їх обертання), правильно інтерпретувати відомості про навколишній світ, одержувані від датчиків, і постійно відстежувати власні координати. Все це вказує на актуальність досліджень в області навігації мобільних роботів [1, 2].

Комп'ютерні системи побудови маршруту розроблені досить добре. Спочатку вони створювалися для найпростіших віртуальних середовищ, і програма, що моделює дії робота, швидко знаходила оптимальний шлях до мети в двовимірних лабіринтах і кімнатах, наповнених простими перешкодами. Коли з'явилися швидкі процесори, стало можливим формувати траєкторію руху вже на складних тривимірних картах, причому в реальному часі. Цікаво, що істотний внесок в цей алгоритмічний напрямок внесли компанії-розробники комп'ютерних ігор, що фінансують відповідні дослідження. У сучасних іграх з кожної з конфліктуючих сторін бере участь кілька сотень бойових одиниць, що діють на випадково згенерованих тривимірних картах, і кожна одиниця швидко і досить ефективно знаходить шлях до мети. Правда, при цьому вона, як правило, неявно володіє повною інформацією про карту і своє місцезнаходження на ній.

### Способи пересування роботів

Система навігації є необхідною частиною системи управління мобільним роботом, і в цьому розділі

залишається безліч невирішених завдань, зокрема, завдання побудови і актуалізація карти робочого простору про час функціонування робота.

Пристрої пересування роботів відносять до їх виконавчих пристроїв [3]. У роботах на сьогодні застосовують практично всі відомі у транспорті та в інших областях техніки способи пересування. Крім того, предметом самої робототехніки є крокуючі (стопокрокуючі) транспортні засоби.

Відповідно до призначення робота і з загальною класифікацією транспортних засобів по областям застосування пристрою пересування роботів діляться на наземні, підземні, плаваючі, підводні, повітряні, космічні.

Наземні пристрої пересування складаються з ходової частини та її приводів. За принципом дії ходової частини ці пристрої класифікують на колісні, гусеничні, на електромагнітної підвісці, на повітряній подушці, крокуючі, плазуючі та інші.

Крім того, предметом робототехніки є різні біонічні способи пересування (локомоцій), запозичені у живої природи і не освоєні ще у техніці. До них, перш за все, відноситься пересування. Основною специфічною частиною всіх систем пересування є рушії, що перетворюють зусилля від двигунів приводів і зусилля, що забезпечує систему пересування.

Особливий розділ робототехніки складають крокуючі системи пересування і засновані на них транспортні машини. Вони є предметом робототехніки тому, що механічні ноги найбільш близькі іншим основним об'єктам робототехніки – маніпуляторам. Однак значення і потенційні області застосування крокуючих машин виходять за межі робототехніки. Спосіб пересування за допомогою ніг (крокування, біг, стрибання), як відомо, є найбільш поширеним в живій природі. Однак у техніці він ще не отримав помітного застосування насамперед через складність управління.

### Кінематика мобільних роботів

Завдання про рух колісного робота відноситься до досить складного розділу теоретичної механіки, присвяченому дослідженню руху систем абсолютно твердих тіл з неголономними зв'язками. Навіть у разі одного тіла, що котиться по абсолютно твердій поверхні, виникають нетривіальні динамічні ефекти. Їх розгадка була знайдена тільки останнім часом.

Особливістю неголономних систем є, зокрема, особлива методика складання диференціальних рівнянь руху, розроблена П. Аппелем, П. Воронцовим і С. Чаплигінін [4].

Для визначеності далі розглянемо мобільний робот, який має два незалежно керованих моторизованих колеса. Нехай рух робота відбувається в горизонтальній площині, третє колесо робота вважається безінерційним, позбавленим тертя і закріпленним на шасі робота на вертикальній саморозвертаючій вилці. На рис. 1 наведено

загальний вигляд шасі мобільного робота. При прийнятих припущеннях його рух повністю визначається координатами  $\{x, y\}$  точка  $A$  – центр відрізка, що з'єднує провідні колеса шасі, і кутом повороту  $j$ , відлічуваним від осі  $X$ .

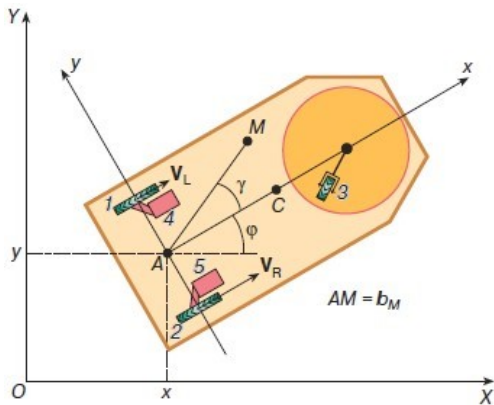


Рис. 1. Схема шасі мобільного робота

Рух усіх коліс відбувається без прослизання. Провідні колеса 1 і 2 мають радіус  $r$  і приводяться в обертання однаковими двигунами 4 і 5 відповідно, на які подаються керуючі напруги:  $U_L$  – для лівого колеса 1 і  $U_R$  – для правого колеса 2. Поворот робота здійснюється за допомогою різниці зазначених керуючих напруг.

Рух робота розглядається відносно нерухокої системи координат OXY. Рухома система координат  $A_{xy}$  з початком в точці  $A$  жорстко пов'язана з шасі робота. Ось  $x$  перпендикулярна відрізку, що з'єднує центри ведучих коліс, і є віссю симетрії шасі. Позитивний напрямок осі  $x$  збігається з напрямком руху робота. Центр мас робота знаходиться в точці  $C$ ; абсцису точки  $C$  в рухомій системі позначимо через  $A$ . При позитивних значеннях  $A$  центр мас і третє колесо знаходяться попереду ведучих коліс.

У разі рівного розподілу напруг, що подаються на двигуни ведучих коліс, диференціальні рівняння руху мобільного робота мають вигляд

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= -\mu V + a\Omega^2 + p \\ \frac{d\Omega}{dt} &= -\mu \frac{l^2}{r^2} \Omega - \frac{a}{\rho^2} V\Omega \end{aligned} \quad (1)$$

де  $V$  – швидкість точки  $A$ ;  $\Omega$  – кутова швидкість робота;  $\mu$  – параметр, пропорційний коефіцієнту сил в'язкого тертя;  $r$  – радіус інерції робота відносно осі, яка проходить через центр мас;  $l$  – відстань між центрами керуючих коліс робота;  $p$  – позитивний параметр, пропорційний сумі напруг, які подаються на керуючі колеса робота.

У разі постійності параметра  $p$  рівняння (1) описують некерований рух робота. При позитивних значеннях параметра  $a$  рівняння (1) мають єдину особливу точку

$$V = \frac{p}{\mu}, \Omega = 0. \quad (2)$$

Частне рішення (2) відповідає прямолінійному поступальному руху робота з постійною швидкістю  $V$ . Це рух асимптотно стійко «у великому», тобто всі рішення рівнянь (1) через деякий проміжок часу будуть як завгодно мало відрізнятися від рішення (2). Фазовий портрет системи (1) в цьому випадку показаний на рис. 2, причому частка рішення (2) являє собою стійку особливу точку типу «вузол».

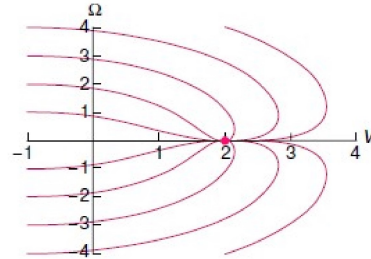


Рис. 2. Фазовий портрет при  $a > 0$

Ситуація змінюється, коли параметр  $A$  від'ємний, тобто центр мас і третє колесо знаходяться позаду ведучих коліс робота. При збільшенні напруги, що подається на двигуни, і зростанні його швидкості при  $p = \mu V = -\frac{1}{a} \left( \frac{\mu l p}{r} \right)^2$  на площині  $V, \Omega$  відбувається біфуркація народження двох нових особливих точок системи (1).

$$V = V^* = -\frac{\mu l^2 p^2}{a r^2}, \quad \Omega = \pm \Omega^* = \pm \sqrt{-\frac{p}{a} - \left( \frac{\mu l p}{a r} \right)^2}. \quad (3)$$

Особливі точки (3) є стійкими вузлами або фокусами. Механічний сенс рішень (3) полягає у такому обертальному русі робота з постійною кутовою швидкістю, при якому точка  $A$  описує коло радіуса  $R = V^* / \Omega^*$ . При цьому особлива точка (2) стає нестійкою і перетворюється в сідло.

Відповідний фазовий портрет для системи диференціальних рівнянь (1) побудований на рисунку 4.

Наведені математичні результати означають, що в разі, коли провідні колеса знаходяться попереду центру мас, мобільний робот може здійснювати стійкий прямолінійний рух тільки зі швидкістю, що не перевищує деякого граничного значення. З ростом напруги, що подається на двигуни, швидкість робота збільшується. Після досягнення зазначеного граничного значення прямолінійний рух стає нестійким; робот «закручує», і він прагне до одного з обертальних рухів (3). Чи буде фінальний рух «правим» або «лівим», заздалегідь передбачити неможливо. Це визначається малими збуреннями, що існують при русі реального робота. У випадку, коли третя колесо знаходиться попереду ведучих коліс, робот може стійко рухатися по прямій з будь-якою швидкістю.

Зрозуміло, спеціальна система управління може стабілізувати рух робота і в разі, коли провідні колеса знаходяться попереду, проте алгоритм цієї системи управління повинен враховувати природу нестійкості, яка визначається диференціальними рівняннями (1).

**Програмний рух мобільного робота**

Під програмним рухом далі розуміється рух, при якому одна з точок робота (локатор, телекамера та ін.) рухається з постійною швидкістю по заданій плоскій кусково-гладкій кривій. Розглянемо задачі визначення напружень [5], які треба подати на двигуни робота, щоб реалізувати із заданою точністю цей рух. Це завдання аналогічно першому завданні динаміки, яка полягає у визначенні сили за відомим руху матеріальної точки. З математичної точки зору зазначена класична задача зводиться до знаходження правих частин диференціальних рівнянь, для яких задані траєкторії є інтегральними кривими.

Для моментів, розвиваючих електродвигунами можна використовувати наступну лінійну апроксимацію:

$$M(U, \dot{\psi}) = c_1 U - c_2 \dot{\psi}, \quad (4)$$

де  $U$  – напруга, подається на двигун;  $c_1, c_2$  – позитивні постійні коефіцієнти;  $c_2 \dot{\psi}$  – момент проти електрорухомої сили;  $\dot{\psi}$  – кутова швидкість ротора двигуна.

Вектор  $V$  швидкості точки  $A$  завжди збігається з поздовжньою віссю робота, тому рівняння неголомомного зв'язку висловлює ортогональність швидкості точки  $A$  і осі  $y$ :

$$-V_{Ax} \sin \varphi + V_{Ay} \cos \varphi = 0, \quad (5)$$

Задамо програмний рух довільної точки робота  $M$  у нерухомій системі координат гладкими функціями часу

$$X_M = X_M(t), \quad Y_M = Y_M(t), \quad (6)$$

При цьому проекції швидкості точки  $M$  на нерухомій вісі координат будуть неперервними функціями часу  $V_{Mx} = \dot{X}_M(t) = \dot{X}_M$ ,  $V_{My} = \dot{Y}_M(t) = \dot{Y}_M$ .

Особливістю завдань управління мобільним роботом, який представляє собою неголомомну електромеханічну систему, є обмеження, що виникають при завданні програмних траєкторій. У даному випадку рівняння (5) приводить до неможливості довільного завдання кутової координати робота. Курсовий кут робота зобов'язаний бути рішенням диференціального рівняння першого порядку:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{-V_{Mx} \sin \varphi + V_{My} \cos \varphi}{b_M \cos \gamma}, \quad (7)$$

де  $b_M \cos \gamma$  та  $b_M \sin \gamma$  – постійні координати точки  $M$  у рухомій системі координат  $A_{xy}$ .

Інтегрування рівняння (7) с заданою початковою умовою дозволяє знайти закон зміни курсового кута  $\varphi$ . При цьому модуль швидкості точки  $A$  визначається формулою:

$$V = \frac{V_{Mx} \cos(\varphi + \gamma) + V_{My} \sin(\varphi + \gamma)}{\cos \gamma}, \quad (8)$$

Модуль  $V$  швидкості точки  $A$  і кутова швидкість  $\Omega$  робота задовольняють динамічним рівнянням

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\frac{2c_2}{mr^2} V + a\Omega^2 + \frac{c_1}{mr} (U_L + U_R), \\ \dot{\Omega} &= -\frac{2c_2 l^2}{I_A r^2} \Omega + \frac{ma}{I_A} V\Omega + \frac{c_1 l}{I_A r} (U_R + U_L). \end{aligned} \quad (9)$$

де  $m$  – маса корпусу,  $I_A = c_1 + ma^2$  – його момент інерції.

Підставляючи (7) і (8) в (9), можна з отриманої системи двох алгебраїчних рівнянь знайти напруги  $U_L, U_R$ , що забезпечують реалізацію програмного руху (6).

Таким чином, крім операцій диференціювання рівнянь (6) траєкторії точки  $A$ , важливим етапом визначення напружень є інтегрування диференціального рівняння (7), що є наслідком існування в розглянутій задачі неголомомного зв'язку (5).

Наведемо результат рішення описаної вище прямої задачі робототехніки у разі, коли траєкторія точки  $M$  складається з двох чвертей кіл радіуса  $R$  (рис. 3), а точка  $M$  рухається по цій кривій з постійною за модулем швидкістю.

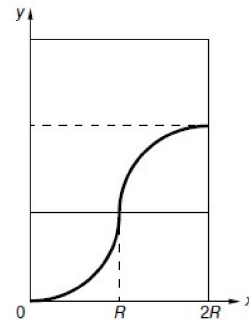


Рис. 3. Траєкторія точки  $M$

Обмежимося графіками напружень, які треба подати на двигуни робота, щоб реалізувати траєкторію, наведену на рис. 5. Графіки напруг, побудовані на рис. 4, відповідають роботі з масою корпусу  $m = 12$  кг;  $I_A = 0,75$  кгм;  $r = 0,08$  м;  $l = 0,2$  м;  $h = 0,56$  м;  $c_1 = 0,084$  Н, м/В,  $c_2 = 0,084$  Н, м/с. Модуль швидкості точки  $M$   $|V| = 1$  м/с.

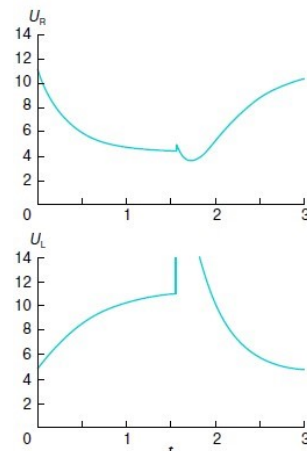


Рис. 4. Графіки напруги на двигунах при  $\varphi = 0$

З цих графіків видно, що програмні напруги мають стрибки, а амплітуди напруг перевищують величину

напруги бортового акумулятора 12 В. Отже, точно реалізувати траєкторію, що представлена на рис. 3 програмного руху принципово неможливо. При розробці алгоритму управління роботом [6] потрібно враховувати цю обставину, і завдання полягає у виборі закону управління напругою на двигунах, при якому відхилення точки  $A$  від бажаної траєкторії мінімальні.

### Математична модель навігації мобільного робота

Нехай на мобільному роботі встановлені два датчика [7], що вимірюють кутову швидкість обертання ведучих коліс 1, 2 робота (рис. 1). При відсутності прослизання і деформацій коліс сигнал кожного датчика пропорційний швидкості центру відповідного колеса. У цьому випадку на основі показників датчиків можна обчислити швидкість  $V$  точки  $A$  і кутову швидкість  $W$  робота за формулами:

$$V = \frac{1}{2}(V_R + V_L), \quad \Omega = \frac{1}{2l}(V_R - V_L) \quad (10)$$

де  $V_R, V_L$  – ідеальні показники датчиків.

Відповідно до рисунку 1, кінематичне рівняння, яке поєднує узагальнені швидкості з величинами  $V$  та  $W$ , мають вигляд

$$\dot{x} = V \cos \varphi, \quad \dot{y} = V \sin \varphi, \quad \dot{\varphi} = \Omega \quad (11)$$

Підставляючи (10) у (11), отримуємо кінематичні рівняння для істинних значень координат робота

$$\dot{x} = \frac{1}{2}(V_R + V_L) \cos \varphi, \quad \dot{y} = \frac{1}{2}(V_R + V_L) \sin \varphi, \quad \dot{\varphi} = \frac{1}{2l}(V_R - V_L) \quad (12)$$

Якщо у деякий момент часу  $t = 0$  задати початкові значення координат точки  $A$  та курсового куту  $\varphi$

$$\dot{x}|_{t=0} = \dot{x}_0, \quad \dot{y}|_{t=0} = \dot{y}_0, \quad \dot{\varphi}|_{t=0} = \dot{\varphi}_0, \quad (13)$$

та у бортовому комп'ютері про інтегрувати систему диференціальних рівнянь

$$\dot{x} = \frac{1}{2}(V_R + V_L) \cos \varphi, \quad \dot{y} = \frac{1}{2}(V_R + V_L) \sin \varphi, \quad \dot{\varphi} = \frac{1}{2l}(V_R - V_L) \quad (14)$$

то в кожен момент часу робот буде «знати» своє становище у нерухомій системі координат ОХУ. У рівняннях (14) – реальні показники датчиків,  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$ ,  $\dot{\varphi}$  – обчислювані у бортовому комп'ютері координати робота. Рівняння (14) називаються модельними рівняннями автономної навігації.

Модельні змінні  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$ ,  $\dot{\varphi}$  та показники датчиків можна уявити у вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{x} + \Delta \dot{x}, \quad \dot{y} = \dot{y} + \Delta \dot{y}, \quad \dot{\varphi} = \dot{\varphi} + \Delta \dot{\varphi}, \\ V_R &= V_R + \Delta V_R, \quad V_L = V_L + \Delta V_L, \end{aligned} \quad (15)$$

де  $\Delta \dot{x}$ ,  $\Delta \dot{y}$ ,  $\Delta \dot{\varphi}$  – різниця між обчисленими і істинними значеннями узагальнених координат робота, – інструментальні похибки датчиків вимірювання швидкостей центрів коліс робота.

Підставляючи (15) в (14) і вважаючи помилки визначення узагальнених координат  $\Delta \dot{x}$ ,  $\Delta \dot{y}$ ,  $\Delta \dot{\varphi}$  і похибки датчиків малими величинами, можна отримати рівняння помилок числення шляху:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta x}{dt} &= \frac{1}{2}(V_R + V_L) \sin \varphi \Delta \varphi + \frac{1}{2} \cos \varphi (\Delta V_R + \Delta V_L), \\ \frac{d\Delta y}{dt} &= \frac{1}{2}(V_R + V_L) \cos \varphi \Delta \varphi + \frac{1}{2} \sin \varphi (\Delta V_R + \Delta V_L) \end{aligned} \quad (16)$$

Рівняння помилок (16) теж можуть бути проінтегровані в бортовому комп'ютері, що дозволяє підвищити точність визначення положення робота. При інтегуванні рівнянь (16) використовується додаткова інформація, що отримується від локаторів маяків, від оптичних датчиків в моменти перетину кордонів квадратів полігону та ін. Використання додаткової інформації називається корекцією навігаційного алгоритму, при цьому завдання корекції ставиться як задача оцінювання рішення рівнянь помилок (16) з урахуванням відповідних корекційних вимірювань. Описана процедура дозволяє ввести поправки на вихід бортового комп'ютера, в якому інтегрується система рівнянь (14).

### Висновки

Система навігації є необхідною частиною системи управління мобільним роботом. У роботах на сьогодні застосовують практично всі відомі у транспорті та в інших областях техніки способи пересування. Особливий розділ робототехніки складають крокуючі системи пересування і засновані на них транспортні машини. Особливістю завдань управління мобільним роботом, який представляє собою неголономну електромеханічну систему, є обмеження, що виникають при завданні програмних траєкторій.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Невлюдов, І. Ш., Цымбал, А. М., & Милютіна, С. С. (2010). *Интеллектуальное проектирование технологии роботизированной сборки*. ИИШ Невлюдов, АМ Цимбал, СС Милютіна–Х.: НТМТ.
2. Nevliudov, Igor, Oleksandr Tsybmal, and Artem Bronnikov. "Intelligent means in the system of managing a manufacturing agent." *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries 1* (3) (2018): 33-47.
3. *Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипченко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. – 366 с.*
4. Філімоніхін, Г. Б., & Гончаров, В. В. (2009). *Методика складання диференціальних рівнянь руху роторних систем з автобалансирами і її застосування до системи ротор-масивний корпус-автобалансир*. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*, (22), 357-363.
5. Невлюдов, І. Ш., Євсєєв, В. В., Демська, Н. П., & Салієва, В. Е. (2018). *Моделювання та дослідження зносу циліндричного редуктора для мобільного робота*. *Проблеми тертя та зношування*, 2(2) (79), 63-71.
6. Невлюдов І.Ш. *Автоматичне управління технологічними об'єктами / І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарева. – Київ: НАУ, 2018. – 200 с.*
7. Nevlydov, I., Filipenko, O., Volkova, M., & Ponomaryova, G. (2018, August). *MEMS-Based Inertial Sensor Signals and Machine Learning Methods for Classifying Robot Motion*. In *2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)* (pp. 13-16). IEEE.