УДК 628.74

І.С.Лозовий, к.т.н., Р.В.Зінько, к.т.н.,(Національний університет „Львівська політехніка")

МОБІЛЬНИЙ РОБОТ ДЛЯ РОЗВІДКИ ПОЖЕЖ

Запропоновано конструкцію мобільного робота для гасіння пожеж. Розроблений метод формування рівнянь динаміки руху виконавчого маніпулятора за допомогою рівняння Лагранжа II роду.

Основним завданням при ліквідації надзвичайних ситуацій, таких як: пожежі, розлив отруйних речовин та інші техногенні аварії, є рятування людей. Вирішення цього завдання пов'язане з виконанням робіт з розвідки та уточнення газової і температурної картин в зоні аварії і на навколишній території; доставки рятувальників, необхідного обладнання, матеріалів; пощуку, виявлення і евакуації потерпілих; гасіння пожеж активними способами шляхом інертизації атмосфери парогазовими сумішами, порошковими засобами, повітряно-механічною піною, установкою загороджувальних (водяних) завіс, швидковивідних ізоляційних обладнань: розбирання завалів і проведення обхідних рятувальних маршрутів.

Реалізація рятувальних операцій позв'язана з виконанням значних об'ємів важких і небезпечних робіт. Необхідність використання індивідуальних засобів газового і теплового захисту і форсований характер робіт додатково ускладнює роботу рятувальників. Захисні дії протитеплових засобів обмежуються температурами навколишнього середовища 60-160°С і часом перебування 45-120хв, яке скорочується при виконанні інтенсивної роботи. Тому рятувальні роботи повинні бути забезпечені високоефективною спеціалізованою технікою. Застосування роботів і маніпуляторів в цьому випадку є доцільним і необхідним рішенням.

На даному етапі важливим є визначення основних параметрів мобільних роботів.

Можна виділити три принципово різних типи мобільних роботів [1]: наземні, повітроплавні і підземні. Теорія і практика мобільних роботів двох останніх типів ще не досягнули того рівня розвитку, щоб говорити про них як про самостійні напрямки робототехніки. Тому надалі мова буде йти тільки про мобільні роботи першого типу, тобто роботи, які здатні будь-яким чином переміщатися по поверхні землі.Наземні мобільні роботи, як правило, поділяються на три великі класи: колісні наземні мобільні роботи, крокуючі наземні мобільні роботи (табл. 1) і гібридні мобільні роботи. Останні, залежності від обставин, можуть або крокувати, або котитися, або одночасно і крокувати, і котитися, тобто користуватися і колесами, і ногами. Крім цих трьох найбільш численних класів мобільних роботів існує велика кількість спеціалізованих мобільних роботів, орієнтованих на обмежене застосування. До їх числа відносяться рейкові роботи, адсорбційні роботи (здатні переміщатися по крутих ділянках, чіпляючись за поверхню за допомогою вакуумних присмоктувачів), роботи на магнітній або повітряній подушці, а також роботи, що не належать до жодної з перечислених груп - повзучі роботи.

Серед різноманітних типів мобільних роботів в теперішній час найбільший практичний інтерес викликають колісні наземні мобільні роботи.

Таблиця 1

Класи мобільних роботів

Тип мобільних апаратів	Спосіб реалізації (спосіб керування)
Колісні	Автомобілі; апарати з незалежним керуванням поворотом коліс вліво або вправо (крісло-гойдалка); апарати з довільним вибором напрямку руху
Крокуючі	Багатоногові апарати ; апарати з 8,6,5,3,2, або 1 кінцівками
Гібридні	Апарати, здатні переміщатися як при допомозі коліс, так і при допомозі кінцівок
Спеціалізовані	Адсорбційні (вакуумні) апарати; мобільні апарати на магнітній або повітряній подушці, рейкові апарати. змієподібні, апарати, які звиваються при русі.

Запропоновано велику кількість принципів класифікації колісних наземних мобільних роботів [2]. Якщо скористатися класифікацією за способом керування робочих коліс, то можна виділити такі три групи колісних роботів: автомобільна група (поворот здійснюється тільки завдяки переднім колесам); група з довільним незалежним керуванням поворотом кожного колеса ліворуч або праворуч (наприклад, крісло-гойдалка); група роботів, здатних переміщатися в усіх можливих напрямках. Більшість застосовуваних на практиці колісних мобільних роботів відноситься до другої групи, тобто даний метод керування виявляється найбільш важливим. Що стосується роботів, колеса яких можуть повертатися в будь-яку сторону (здатних переміщатися в усіх можливих напрямках), то вони поки що знаходяться на стадії експериментальних досліджень.

Серед крокуючих мобільних наземних роботів практичний інтерес викликають конструкції з різним числом кінцівок – від багатоногих крокуючих апаратів, які нагадують сороканіжку, до роботів з 8, 6, 5, 4, 3 і 2 кінцівками. Крім цього, в дослідних центрах і наукових лабораторіях вивчаються принципи створення безногих мобільних апаратів, здатних переміщатися подібно до змій або морських молюсків. На практиці потреба в крокуючих апаратах виникає у зв'язку з необхідністю використання роботів для переміщення по місцевості з великою кількістю прешкод або нерівностей, а також там, де необхідне вміння підніматися чи опускатися звичайними сходами або по драбині.

Зауважимо, що способи переміщення на 2, 4, 6 і 8 ногах не були винайдені спеціально в ході розробки мобільних роботів. Їх запропонувала сама природа: адже так переміщаються люди і інші живі істоти.

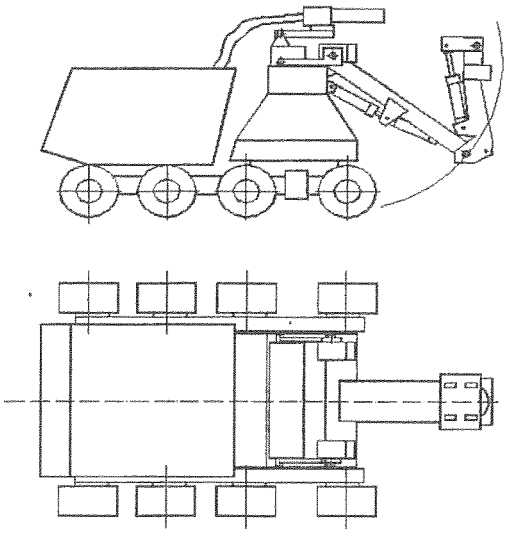

Рис. 1. Схематичне зображення пожежного робота

На основі проведеного огляду та аналізу можливих конструкцій мобільних роботів була запропонована компоновка робота для проведення розвідки пожежі (рис.1). В деяких випадках, коли пожежа становить велику небезпеку для вогнеборців, забезпечення інформацією про реальний її стан можна доручити мобільному роботу. Робот-розвідник має набір різних сенсорів і датчиків, призначених для збору, накопичення і попередньої обробки інформації про газовий склад атмосфери, швидкість руху повітряного потоку, температуру атмосфери, візуальну картину обстеження приміщень для пошуку і діагностики вогнища пожежі, визначення напрямку і швидкості руху продуктів вибухів, фронту пожежі, ступеня задимленості і т.д. Він може бути обладнаний маніпулятором для відбирання проб атсмосфери і заміру параметрів вентиляції в різних точках приміщення, а також для розбирання невеликих завалів, розчищування шляхів евакуації.

Тому для подальшого вдосконалення конструкції та ефективності використання робота доцільно дослідити динаміку руху виконавчого маніпулятора з перпендикулярними або паралельними осями сусідніх шарнірів. При виведенні рівняння динаміки руху маніпулятора використовуватимемо опис кінематики за допомогою матриць поворотів, векторів перенесення і рівняння Лагранжа II роду [2, 3]:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = \tau_{до} \qquad (1)$$

де L = (K - P) - функція Лагранжа, K і P - кінетична і потенційна енергія маніпулятора;
$\tau_{до}$ - момент узагальнених сил в к-ому шарнірі, обумовлений роботою приводу і дією зовнішніх навантажень.

Щоб скористатися рівняннями Лагранжа, необхідно обчислити кінетичну і потенційну енергію маніпулятора

Для визначення кінетичної енергії скористаємося формулою:

$$K = K_i, \qquad K_i = \int_{T_i} dK_i \qquad (2)$$

де Ki - кінетична енергія i-ої ланки маніпулятора; *dKi* - кінетична енергія елемента маси *dmi* i-ої ланки:

$$dKi = 1/2\ Vi^2\ dmi \qquad (3)$$

Перетворимо вираз для **Vi**:

$$\mathbf{V}_i = \sum_{p=1}^{i-1} (Vps\ qs')\ \mathbf{lp} + \sum_{s=1}^{i} Vis\ qs'\ \mathbf{ri} = \sum_{p=1}^{i} (Vps\ qs')\ \mathbf{rp}$$

де $\mathbf{rp} = \begin{cases} \mathbf{l}_p \text{ при } p<i \\ \mathbf{r}_i \text{ при } p=i \end{cases}$ (i=1..,n)

Позначимо wp = Vps qs'; тоді (3) можна представити у вигляді:
dKi =1/2 (wp **rp**, wl **rl**) *dmi* = 1/2 Tr (wp **rp rl Twl** ^{T}) *dmi*;
тут Tr(A) - слід матриці A.

$$\text{Тоді } K_i = 1/2\ Tr\ (wp\ \Xi_{pl}\ wl^T), \text{ де } \Xi_{pl} = \int_{Ti} \mathbf{rp}\ \mathbf{r}_l^T\, dmi \qquad (4)$$

$$\text{причому } \Xi_{pl} = \begin{cases} \mathbf{r}_{C,i}\mathbf{r}_l^T, \text{ при } p=i,\ l<i \\ J_i, \quad \text{при } p=l=i \\ \mathbf{r}_p\mathbf{r}_{C,i}^T, \text{ при } p<i,\ l=i \end{cases} \qquad (5)$$

(тут $\mathbf{r}_{C,i}$ - центр мас i-ої ланки;
Ji - матриця інерції i-ої ланки маніпулятора:

$$Ji = \int_{Ti} \mathbf{r}_i\ \mathbf{r}_i^T\, dm_i$$

Компоненти цієї матриці можна виразити через компоненти $(Ii)_{ps}$ тензора інерції i-тої ланки [4]:

$(Ji)_{ps} = (Ii)_{ps}$, при p≠s
$(Ji)_{11} = 1/2\ [-(Ii)_{11} + (Ii)_{22} + (Ii)_{33}]$
$(Ji)_{22} = 1/2\ [\ (Ii)_{11} - (Ii)_{22} + (Ii)_{33}]$
$(Ji)_{33} = 1/2\ [\ (Ii)_{11} + (Ii)_{22} - (Ii)_{33}]$

З врахуванням (4) вираз для кінетичної енергії маніпулятора набуде вигляду:

$K = Ki = 1/2\ \mathrm{Tr}\ (wp\ \Xi_{pl}\ wl^{T})$.

Тепер визначимо потенційну енергію маніпулятора як суму потенційних енергій його ланок:

$P = Pi;\ Pi = -\ m_i\ (\mathbf{g},\ \mathbf{r}_{C,i0}) = -\ m_i\ (\mathbf{g},\ C_{1p}\ \mathbf{lp} + C_{1i}\ \mathbf{r}_{C,i});$

Знайдемо вираз для частини рівнянь (1), в які входить кінетична енергія маніпулятора:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_k}\right) - \frac{\partial K}{\partial q_k} = \sum_{i=1}^{n}\ \sum_{p,l=1}^{i} [\mathrm{Tr}\ (\frac{d}{dt}\frac{\partial w^{p}}{\partial \dot{q}_k}\Xi_{pl} w^{lT}) + \mathrm{Tr}\ (\frac{\partial w^{p}}{\partial \dot{q}_k}\Xi_{pl}\frac{d}{dt} w^{lT}) -$$

$$\mathrm{Tr}\ (\frac{\partial w^{p}}{\partial q_k}\Xi_{pl} w^{lT})]$$

Відзначимо, що перший і третій складові вирази в квадратних дужках рівні між собою. Дійсно

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial w^{p}}{\partial \dot{q}_k} = \frac{d}{dt}\frac{\partial}{\partial \dot{q}_k}\left(\sum_{s=1}^{p} V_{ps}\dot{q}_s\right) = \frac{d}{dt} V_{pk} = \sum_{s=1}^{p} V_{pks}\dot{q}_s \qquad (6)$$

де позначено $V_{pks} = \frac{\partial}{\partial q_s} V_{pk}$.

$$\frac{\partial w^{p}}{\partial q_k} = \frac{\partial}{\partial q_s}\sum_{s=1}^{p} V_{ps}\ \dot{q}_s = \sum_{s=1}^{p} V_{psk}\ \dot{q}_s \qquad (7)$$

Оскільки з визначення величин *Vpk* і *Vpks* витікає, що *Vpks* = *Vpsk*, то формули (6) і (7) збігаються.

Отже, необхідно обчислити значення:

$$\sum_{i=1}^{n}\ \sum_{\substack{p,l=1 \\ p\geq k}}^{i} [\ \mathrm{Tr}\ (V_{pk}\ \Xi_{pl} \sum_{s=1}^{l} V_{ls}^{T}\ \ddot{q}_s) + \mathrm{Tr}\ (V_{pk}\ \Xi_{pl} \sum_{s,t=1}^{l} V_{lst}^{T}\ \dot{q}_s\ \dot{q}_t)]$$

Підставивши значення Ξ_{pl} з формул (5) і зробивши, де це необхідно, перехід від функції Tr до скалярного добутку, отримаємо:

$$\sum_{i=k}^{n}(m_i\left(\sum_{p=k}^{i} V_{pk}\mathbf{r}_p, \sum_{l=1}^{i}\sum_{s=1}^{l} V_{ls}\mathbf{r}_l\right)\ddot{q}_s + Tr\sum_{s=1}^{i}\left(V_{ik}\tilde{J}_i\ V_{is}^{T}\right)\ddot{q}_s +$$

$$+ m_i\left(\sum_{p=k}^{i} V_{pk}\mathbf{r}_p, \sum_{l=1}^{i}\sum_{\substack{s=1 \\ t=1}}^{l} V_{lst}\mathbf{r}_l\right)\dot{q}_s\ \dot{q}_t + Tr\sum_{s,t=1}^{i}\left(V_{ik}\tilde{J}_i\ V_{ist}^{T}\right)\dot{q}_s\ \dot{q}_t) \qquad (8)$$

де $\mathrm{rp} = \begin{cases} \mathbf{l}_p \text{ при } p<i \\ \mathbf{r}_{C,i} \text{ при } p=i \end{cases}$ (i=1..,n)

Потенційна енергія маніпулятора входить в рівняння динаміки (1) у вигляді:

$$\frac{\partial P}{\partial q_k}=\frac{\partial}{\partial q_k}\sum_{i=1}^{n}-m_i\left(\mathbf{g},\sum_{p=1}^{i-1}C_{1p}\mathbf{l}_p+C_{1i}\mathbf{r}_{C,i}\right)=\sum_{i=k}^{n}-m_i\left(\mathbf{g},\sum_{p=k}^{i}V_{pk}\mathbf{r}_p\right) \tag{9}$$

Перегрупувавши компоненти у формулах (8)-(9), можна отримати рівняння динаміки у вигляді:

$$\sum_{s=1}^{n}d_{ks}\ddot{q}_s+\sum_{s,t=1}^{n}h_{kst}\dot{q}_s\dot{q}_t+p_k=\tau_k$$

або в матричній формі:

$$D(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}+\mathbf{h}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})+\mathbf{p}(\mathbf{q})=\boldsymbol{\tau} \tag{10}$$

В рівняннях (10) $D(\mathbf{q})$ - симетрична, позитивно визначена матриця інерції маніпулятора [3] з елементами:

$$dks=\sum_{i=\max(k,s)}^{n}\left[m_i\left(\sum_{p=k}^{i}V_{pk}\mathbf{r}_p,\sum_{l=s}^{i}V_{ls}\mathbf{r}_l\right)+Tr\left(V_{ik}\tilde{J}_i V_{is}^T\right)\right] \tag{11}$$

$\mathbf{h}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})$ - вектор коріолісових і відцентрових сил:

$$h_k=\sum_{s,t=1}^{n}h_{kst}\dot{q}_s\dot{q}_t,\quad h_{kst}=\sum_{i=\max(k,s,t)}^{n}m_i\left(\sum_{p=k}^{i}V_{pk}\mathbf{r}_p,\sum_{l=\max(s,t)}^{i}V_{lst}\mathbf{r}_l\right)+Tr\left(V_{ik}\tilde{J}_i V_{ist}^T\right) \tag{12}$$

$\mathbf{p}$ - вектор гравітаційних сил з компонентами:

$$p_k=\sum_{i=k}^{n}-m_i\left(\mathbf{g},\sum_{p=k}^{i}V_{pk}\mathbf{r}_p\right) \tag{13}$$

Отримані рівняння динаміки руху маніпулятора у формі Лагранжа дозволяють вирішувати пряму і зворотну задачі динаміки. Система динамічних рівнянь замкнута і представлена в аналітичному вигляді. З врахуванням параметрів мобільного робота (вага, габаритні розміри, енергозабезпеченість) рівняння динаміки руху дозволяють підібрати найоптимальніші параметри маніпулятора.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Накано Э. Введение в робототехнику: Пер. с япон. – М.: Мир, 1988. – 334 с.*

2. *Юревич Е.И. Основы робототехники. 2-е изд. – СПб: БХВ-Петербург, 200.– 416 с.*

3. *Механика промышленных роботов: Учеб. пособие для втузов: В 3 кн./ Под ред К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. Кн. 1: Кинематика и динамика/ Е.И. Воробьев, С.А.Попов, Г.И. Шевелева. – М.: Высш.шк., 1988. 304 с.*

4. *Li C.G. A new method for dynamic analysis robot manipulators . IEEE Trans. on Syst., Man and Cybern., 1988, 18, N 1, c.105-114.*