

УДК 62-932:62.532

КІНЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОЧОГО ОБЛАДНАННЯ ФРОНТАЛЬНОГО НАВАНТАЖУВАЧА

Гурко В.О.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Активні дослідження вчених та провідних виробників дорожньо-будівельної техніки щодо автоматизації фронтальних навантажувачів обумовлені необхідністю підвищення безпеки та ефективності виконуваних цими популярними машинами робіт. Одним з напрямків автоматизації навантажувачів є забезпечення автоматичного руху ковша за певною траєкторією, під якою розуміється зміна положення та орієнтації певної точки на кромці ковша з часом [1]. Рух ковша за заданою траєкторією дозволяє оптимізувати параметри робочого процесу та уникнути зіткнень з перешкодами, наприклад, під час розвантажування ковша у самоскид. Синтез відповідної системи керування вимагає, у першу чергу, знання кінематичної моделі робочого обладнання навантажувача. Для побудови цієї модулі використовуватимемо метод Денавіта-Хартенберга [2], що широко застосовується у робототехніці при описі кінематичного ланцюга ланок.

Сутність методу полягає у формуванні однорідної матриці перетворення A розмірністю 4×4 та описує положення системи координат кожної наступної ланки $i+1$ щодо системи координат попередньої i -ї ланки:

$${}^i A_{i+1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{i+1} & -\sin \theta_{i+1} \cos \alpha_{i+1} & \sin \theta_{i+1} \sin \alpha_{i+1} & a_{i+1} \cos \theta_{i+1} \\ \sin \theta_{i+1} & \cos \theta_{i+1} \cos \alpha_{i+1} & -\cos \theta_{i+1} \sin \alpha_{i+1} & a_{i+1} \sin \theta_{i+1} \\ 0 & \sin \alpha_{i+1} & \sin \alpha_{i+1} & d_{i+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де: θ_{i+1} – кут повороту навколо осі, що з'єднує дві системи координат;

α_i – кут між двома сусідніми осями z_i ;

a_{i+1} – лінійний зсув, що є найкоротшою відстанню між осями z_i та z_{i+1} ;

d_i – відстань між перетином осі z_i з віссю x_{i+1} початком i -ї системи координат, що відлічується вздовж осі z_i ;

Кожна i -та ланка має власну систему координат. Нульову систему координат розмістимо у центрі мас C навантажувача (рис. 1), а інші системи координат починаються у точках, навколо яких повертаються відповідні ланки (у залежності від типу руху, що розглядається): точці O_1 з'єднання рами навантажувача та гідроциліндру підйому ківшу; точці O_2 з'єднання рами навантажувача та стріли; точка O_3 з'єднання рами та гідроциліндра, що здійснює поворот ковша, а також у точках A, B, D, H, K, M, N . Кінцем кінематичного ланцюга вважатиме точку P на ріжучій кромці ковша навантажувача.

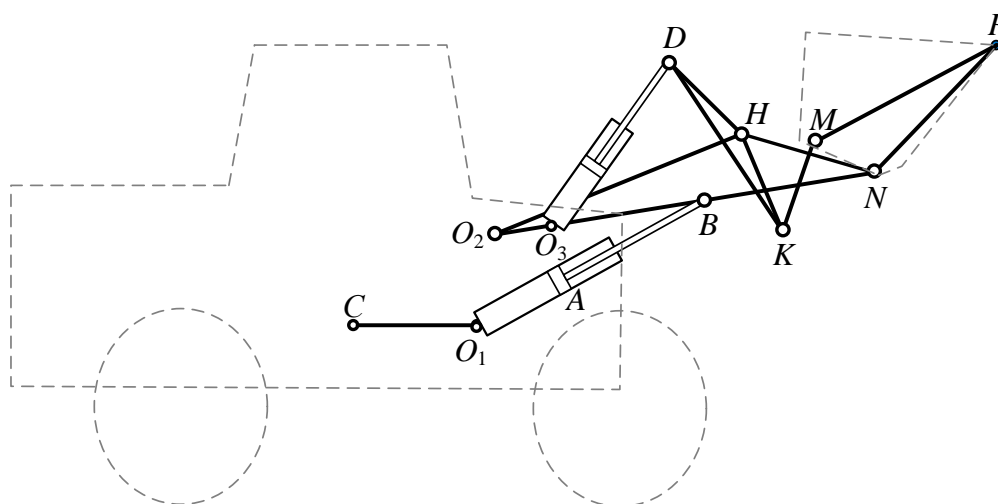


Рисунок 1 – Кінематична схема робочого обладнання навантажувача

Рисунок 2, наприклад, відображує системи координат робочого обладнання від центра мас C до точки P на ріжучій кромці ковша для механізму його піднімання. Кожна з систем координат сформована згідно з наступними правилами:

- вісь z_i спрямована вздовж осі $i+1$ -го зчленування;
- вісь x_{i+1} перпендикулярна осі z_i та спрямована від неї;
- вісь y_i доповнює осі x_i та z_i до правої декартової системи координат.

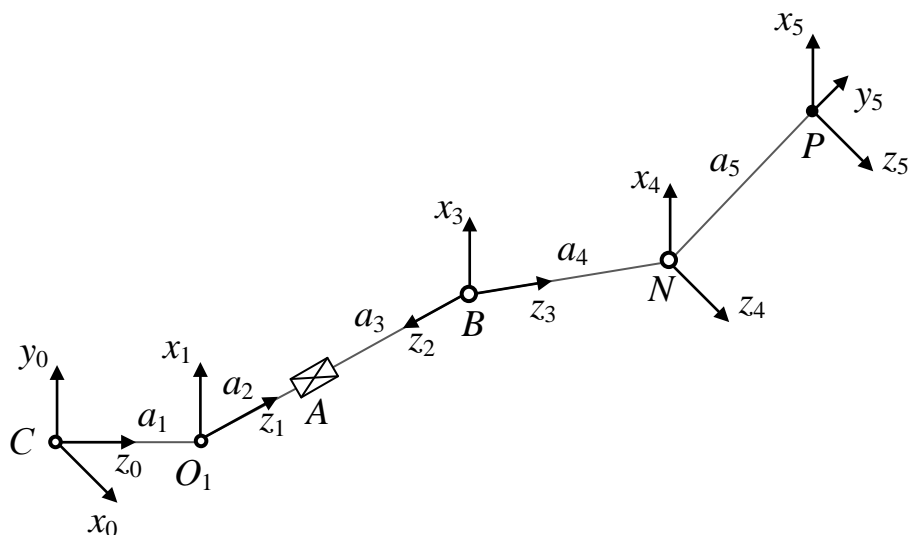


Рисунок 2 – Системи координат механізму підйому ковша навантажувача

Згідно з координатною діаграмою, визначимо параметри перетворення Денавіта-Хартенберга для отриманих п'яти систем координат робочого обладнання навантажувача (Таблиця 1). Підставивши ці параметри до (1) отримаємо матриці $\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_5$:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & \sin \theta_2 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & a_4 \cos \theta_4 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & a_4 \sin \theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & a_5 \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & a_5 \sin \theta_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

з яких знайдемо загальну матрицю перетворень:

$$\begin{aligned}
 {}^P \mathbf{A}_1 &= \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_3 \mathbf{A}_4 \mathbf{A}_5 = \\
 &= \begin{bmatrix} c_5(c_2c_4 - s_2s_4) - & -c_5(c_2s_4 + c_4s_2) - & a_1 + a_2c_2 + a_3c_2 + a_4c_2c_4 - \\ -s_5(c_2s_4 + c_4s_2) & -s_5(c_2c_4 - s_2s_4) & -s_2 - a_4s_2s_4 + a_5c_5(c_2c_4 - s_2s_4) - \\ & & -a_5s_5(c_2s_4 + c_4s_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -c_5(c_2s_4 - c_4s_2) - & s_5(c_2s_4 - c_4s_2) - & a_2s_2 + a_3s_2 - a_4c_2s_4 + a_4c_4s_2 - \\ -s_5(c_2c_4 + s_2s_4) & -c_5(c_2c_4 + s_2s_4) & 0 - a_5c_5(c_2s_4 - c_4s_2) - \\ & & -a_5s_5(c_2c_4 + s_2s_4) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

У формулі (2) s_i – скорочення від $\sin(\theta_i)$ та c_i – скорочення від $\cos(\theta_i)$.

Таблиця 1 – Параметри систем координат механізму підйому ковша навантажувача

№ ланки	Змінна	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	a_1	0	0	a_1	$\pi/2$
2	θ_2	θ_2	0	a_2	$\pi/2$
3	a_3	0	0	a_3	$-\pi/2$
4	θ_4	θ_4	0	a_4	0
5	θ_5	θ_5	0	a_5	0

Слід мати на увазі, що якщо розглядатиметься інший кінематичний ланцюг (наприклад, $C-O_2-P$ або $C-O_3-P$) то іншими будуть й матриці однорідних перетворень.

З отриманої кінематичної моделі видно, що для забезпечення руху точки P за заданою траєкторією з певною орієнтацією, так само як й для отримання певного її положення P , необхідно знати миттєві значення параметрів a та α . Ці значення можна отримати на підставі геометричних співвідношень та інформації від датчиків переміщення штоків гідроциліндрів, на зразок того, як це зроблено для екскаватора в [3].

Література:

1. Гурко О. Г., Гурко В. О., Кучеренко А. Ю. Керування рухом фронтального навантажувача за заданою траєкторією. // Вісник ХНАДУ, 2023, вип. 101, т. 1. С. 26–34. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.0.26>
2. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control / J.J. Craig. Pearson Prentice Hall, 2005. 406 p.
3. Koivo A. J. Kinematics of Excavators (Backhoes) for Transferring Surface Material. Journal of Aerospace Engineering. 1994. Vol. 7, no. 1. P. 17–32. URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0893-1321\(1994\)7:1\(17\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0893-1321(1994)7:1(17))