

РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ У РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ ВИРОБНИЦТВА

УДК 62-231:621.9.04

В.Б. Струтинський, д.т.н. *, **А.М. Кириченко**, к.т.н. **

* Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

** Кіровоградський національний технічний університет

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕХАНІЗМІВ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ З ЛАНКАМИ ЗМІННОЇ ДОВЖИНИ

Опрацьовано методику ідентифікації геометричних параметрів базових механізму паралельної структури «гексапод» з ланками змінної довжини. Встановлено чутливість положення робочого органа до похибок виготовлення та складання

Механізм паралельної структури, гексапод, ідентифікація, похибка, калібрування.

Вступ. Сучасна промисловість потребує нових підходів до створення верстатного обладнання для високошвидкісної обробки, одним з найбільш перспективних серед яких є побудова верстатів на основі механізмів паралельної структури. Протягом останніх років таке обладнання поступово набуває розповсюдження для високошвидкісної обробки, дозволяючи зменшити масу рухомих вузлів та потужність приводів порівняно з обладнанням традиційної структури.

Важливою задачею при розробці верстатного обладнання з механізмами паралельної структури є досягнення високої точності положення робочого органа, яка залежить не лише від дискретності і точності приводів, але й від геометричної точності виготовлення шарнірних опор та інших компонентів.

Постановка задачі. Для багатокоординатної обробки є доцільним використання верстатів на основі механізму «гексапод» (платформа Стюарта-Гауфа) з шістьма ступенями вільності робочого органа [1]. Кінематичні залежності подібних механізмів розглянуті багатьма дослідниками [2, 3, 4]. Згідно з розрахунковою схемою механізму паралельної структури «гексапод» (рис. 1) довжина ланок дорівнює

$$\rho_i = |A_i B_i| = |R \mathbf{r}_i + \mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_a|, \quad (1)$$

де \mathbf{r}_i – радіус-вектор центра шарніра в системі координат рухомої платформи; \mathbf{r}_0 – радіус-вектор початку координат рухомої платформи в системі координат основи, R – матриця повороту платформи відносно основи.

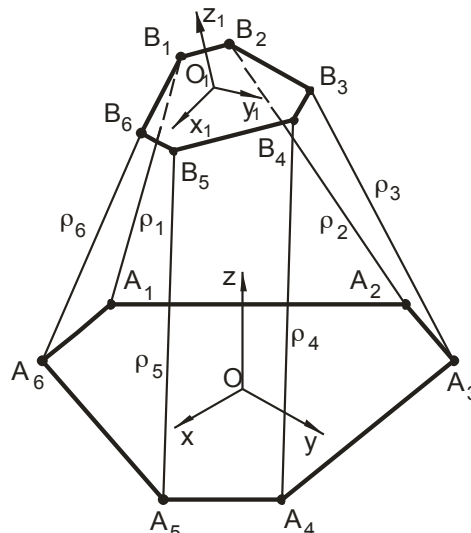


Рис. 1. Розрахункова схема механізму паралельної структури «гексапод»

Проте, на відміну від розрахункових кінематичних моделей, у реальному обладнанні з механізмами паралельної структури наявні похибки виготовлення та монтажу, що спричиняють відхилення геометричних параметрів, зокрема координат центрів опорних шарнірів, що негативним чином позначається на точності положення робочого органа.

Оскільки пряме вимірювання координат центрів шарнірів (особливо основи, яка має значні габарити) є досить складною задачею, постає проблема ідентифікації реальних геометричних параметрів механізму паралельної структури та внесення їх до системи управління для усунення впливу неточностей виготовлення. Така процедура звичайно зветься калібруванням [5].

Найбільш просте калібрування механізмів паралельної структури у випадку, коли є можливість безпосередньо виміряти просторове положення робочого органа. Оскільки таке вимірювання потребує досить складних технічних засобів (лазерні вимірювальні пристрої тощо), найчастіше використовуються непрямі методи: точне вимірювання окремих кутів орієнтації робочого органа [6], додаткова вимірювальна штанга [7], обмеження рухомості пасивних опор [8] або центру інструмента [9], вимірювання відхилень від заданої траєкторії при колових рухах за допомогою вимірювальної ланки [10]. Але для більшості згаданих методів або потрібне дороге вимірювальне обладнання, або ж точність ідентифікації окремих параметрів недостатня.

В той же час на матеріалообробних верстатах для пошуку центрів отворів, прив'язки до заготовки, визначення довжини інструмента досить широко використовується вимірювальні контактні датчики [11, 12], яким властива висока точність (розкид спрацювання складає 1-2 мкм). Подібні контактні датчики оснащені вимірювальним наконечником з високоточною рубіновою кулькою відомого діаметру, при торканні якої до поверхні деталі розмикається електричне коло і датчик подає сигнал до системи ЧПУ.

В зв'язку з цим метою роботи є визначення впливу відхилень геометричних параметрів на точність положення робочого органа та розробка математичного обґрунтування ідентифікації дійсних геометричних параметрів верстатів з паралельною кінематикою за допомогою контактної датчика.

Основна частина. Якщо вважати шарнірні опори механізму ідеальними, похибки відносяться до таких параметрів:

- координати розміщення центрів шарнірних опор основи;
- координати розміщення центрів шарнірних опор робочого органа;
- довжина ланок.

При наявності вказаних похибок рівняння (1) можна записати у вигляді

$$\rho_i + \Delta\rho_i = |R(\mathbf{r}\mathbf{b}_i + \Delta\mathbf{r}\mathbf{b}_i) + \mathbf{r}_0 - (\mathbf{r}\mathbf{a}_i + \Delta\mathbf{r}\mathbf{a}_i)|, \quad (2)$$

де $\Delta\mathbf{r}\mathbf{a}_i$, $\Delta\mathbf{r}\mathbf{b}_i$ – вектори похибок положення центрів шарнірних опор основи та робочого органа відповідно.

Тоді якобіан зворотної кінематичної залежності представлятиме собою функцію поточного положення з врахуванням похибок

$$J^{-1} = J^{-1}(\mathbf{X}_k, \mathbf{r}\mathbf{a}_i + \Delta\mathbf{r}\mathbf{a}_i, \mathbf{r}\mathbf{b}_i + \Delta\mathbf{r}\mathbf{b}_i), \quad (3)$$

де \mathbf{X}_k – вектор шостого порядку координат поточного положення робочого органа.

Пряма кінематична залежність матиме вигляд

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + J(\mathbf{X}_k) \cdot (\Theta + \Delta\Theta - G(\mathbf{X}_k)), \quad (4)$$

де \mathbf{X}_{k+1} – вектор шостого порядку наступного розрахункового положення робочого органа; Θ – вектор шостого порядку похибок довжини ланок; $G(\mathbf{X}_k)$ – результати розрахунку довжини ланок згідно (1) для поточного положення робочого органа; $J(\mathbf{X}_k)$ – якобіан прямої кінематичної залежності у поточному положенні, $J(\mathbf{X}_k) = [\mathbf{u}'_1 \cdots \mathbf{u}'_6]^T$ (\mathbf{u}_i – нормалізовані вектори плюкерових координат ліній штанг в поточному положенні робочого органа).

Використовуючи пряму кінематичну залежність, коефіцієнт впливу кожного з параметрів на положення робочого органа (чутливість до похибки) можна оцінити наступним чином

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{H}_i} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\mathbf{X}(\mathbf{H}_i + \Delta) - \mathbf{X}(\mathbf{H}_i)}{\Delta} \quad (5)$$

За умови, що шарнірні опори і гвинтові передачі є абсолютно точними, положення робочого органа визначається параметрами, зосередженими у рівнянні (1): початковими довжинами штанг l_i , векторами центрів шарнірних опор основи \mathbf{ra}_i і робочого органа \mathbf{rb}_i (усього $m = 42$ параметри).

Для отримання інформації про дійсне положення робочого органа та його різницю з розрахунковим положенням пропонується провести обмірювання бокових та верхньої поверхонь встановленої на столі 1 верстата еталонної оправки 2 за допомогою вимірювального контактного датчика 3, встановленого в шпинделі 4 верстата (рис. 2) з подальшим обчисленням дійсної геометрії верстата на основі отриманих даних.

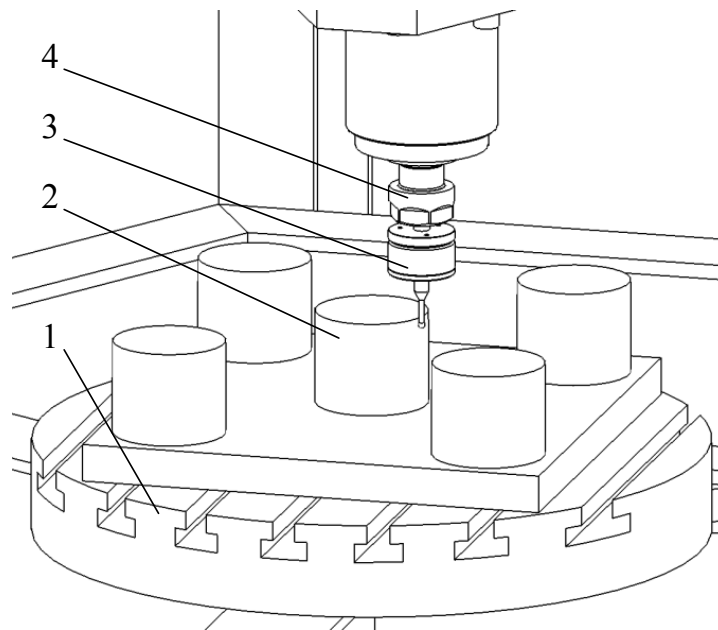


Рис. 2. Вимірювання еталонної деталі

У якості еталонної оправки можна використовувати калібрувальну плиту з одною або кількома циліндричними оправками або отворами, розміщеними рівномірно по робочій зоні. Таким чином, в якості дійсного розміру буде виступати відомий розмір еталонної оправки, а в якості виміряного – інформація від системи ЧПУ про положення робочого органа верстата у момент, коли щуп торкається оправки. Виміри проводяться за програмою ЧПУ, яка використовує команду G38 і зберігає результати вимірювання у файл на диску. По координатам точок дотику з урахуванням діаметра кульки вимірювального наконечника обчислюється виміряний розмір і його відхилення від відомого розміру оправки.

Виміряний розмір d_j ($j = 1 \dots n$) можна виразити як функцію кінематичних параметрів

$$d_j = F(d_{0j}, \mathbf{H}), \quad (6)$$

де \mathbf{H} представляє собою вектор розмірності m параметрів, що підлягають калібруванню, а F описує пряму кінематичну залежність для заданого розміру d_{0j} .

Відхилення $d_j - d_{0j}$ від заданого розміру можна визначити як суму частинних похідних кінематичної функції, що визначають вплив кожного параметра на відхилення

$$\Delta d_j = \sum_k \frac{\partial F(d_{0j}, \mathbf{H})}{\partial h_k} \Delta h_k. \quad (7)$$

де $\Delta \mathbf{H}$ – вектор розмірності m відхилень параметрів калібрування з елементами Δh_k .

Об'єднавши дані про всі вимірних відхилення Δd_j у один вектор $\Delta \mathbf{D}$ розмірності з n елементами, можна представити (13) у вигляді

$$\Delta \mathbf{D} = \Psi \cdot \Delta \mathbf{H}, \quad (8)$$

де Ψ – матриця розмірності $n \times m$, елементи якої являють собою часткові похідні кінематичної функції $\frac{\partial F(d_{0j}, \mathbf{H})}{\partial h_k}$.

Тоді мета ідентифікації – визначити з рівняння (8) вектор відхилень $\Delta \mathbf{H}$ параметрів калібрування за вектором вимірних відхилень $\Delta \mathbf{D}$. Використовуючи метод найменших квадратів [13], можна визначити вектор $\Delta \mathbf{H}$, який мінімізує похибку калібрування $\|\Delta \mathbf{D} - \Psi \Delta \mathbf{H}\|$, наступним чином

$$\Delta \mathbf{H} = (\Psi^T \Psi)^{-1} \Psi^T \Delta \mathbf{D}. \quad (9)$$

За обчисленими відхилень визначаються наближення параметрів калібрування, які вводяться до модуля кінематики верстата, після чого вимірювання відхилень повторюють. При досягненні заданої абсолютної величини вектора вимірних відхилень $\Delta \mathbf{D}$ процес ідентифікації припиняється (рис. 3).

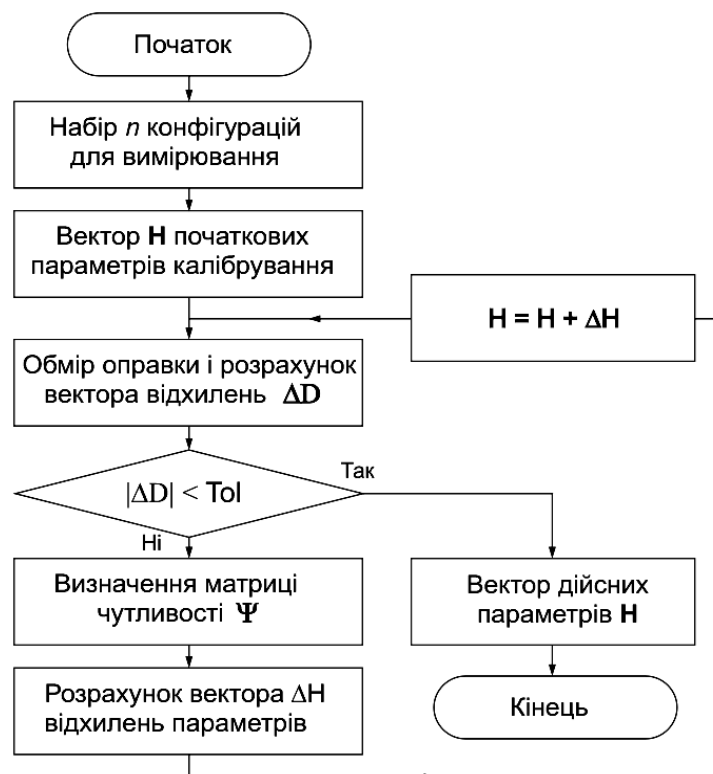


Рис. 3. Алгоритм ідентифікації геометричних параметрів

Компоненти матриці Ψ розраховуються на основі прямої кінематичної залежності як часткові похідні від вимірюваного розміру по параметру калібрування і визначаються як проекція вектора $\frac{\partial \mathbf{X}_j}{\partial \mathbf{H}_i}$ відхилення робочого органа внаслідок зміни параметру калібрування \mathbf{H}_i на нормаль \mathbf{u}_j до поверхні еталонної оправки у j -й точці вимірювання

$$\Psi_{i,j} = \frac{\partial \mathbf{X}_j}{\partial \mathbf{H}_i} \cdot \mathbf{u}_j. \quad (10)$$

Візуалізація матриці чутливості, розрахованої для 42 параметрів калібрування та 72 точок калібрування, наведена на рис. 4. В даному випадку для більшості параметрів калібрування абсолютна величина чутливості не перевищує 1.

Чим більша чутливість механізму паралельної структури до похибок параметрів калібрування, тим більшою буде точність їх ідентифікації. Тому конфігурації механізму паралельної структури, у яких проводяться вимірювання, повинні підбиратися для максимальної чутливості. При цьому для забезпечення збіжності ідентифікації матриця Ψ повинна бути добре обумовленою.

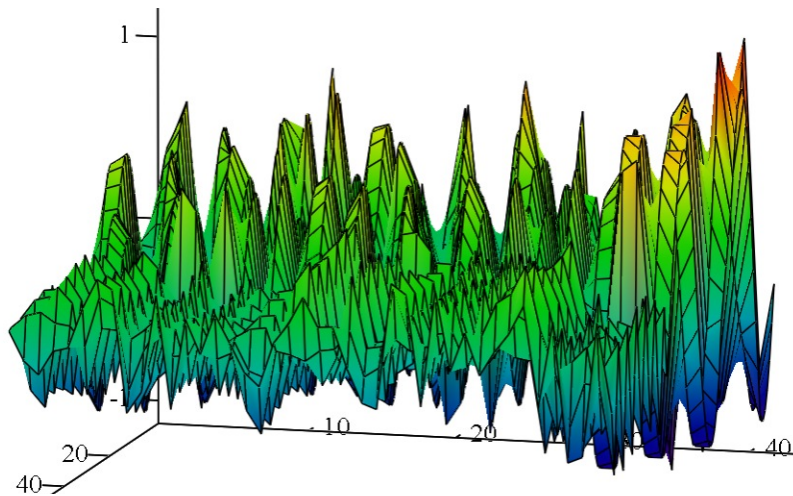


Рис. 4. Візуалізація матриці чутливості

Розглянемо чутливість до параметрів калібрування в залежності від положення та орієнтації робочого органа. Якщо зобразити вектор у вигляді лінії на графіку, можна візуально порівнювати між собою чутливість у різних положеннях та напрямках вимірювання. Як показує рис. 5, чутливість у центрі робочого простору значно більша у напрямках осей X та Y, ніж у напрямку осі Z.

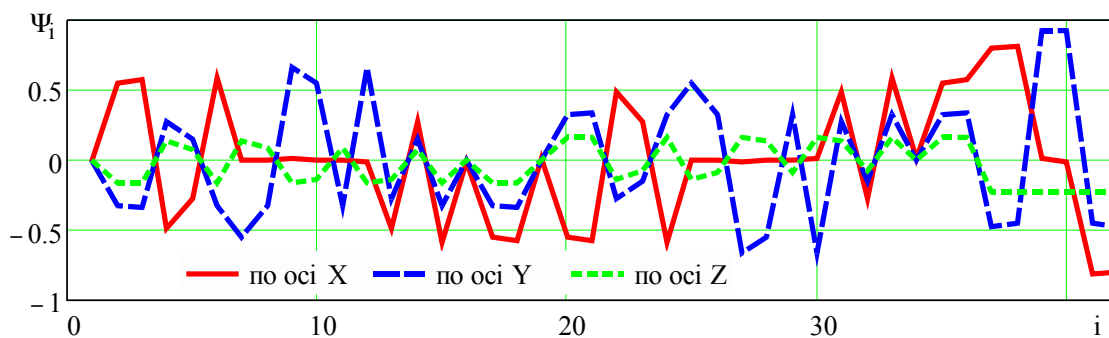


Рис. 5. Компоненти чутливості у напрямках координатних осей

Чутливість у поточній позиції можна оцінити абсолютною величиною вектора, складеного з усіх 42 коефіцієнтів чутливості. Загальну чутливість можна оцінити абсолютною величиною вектора \mathbf{P} , компоненти якого визначаються як

$$P_k = \frac{|\partial \mathbf{X}|}{\partial \mathbf{H}_k}. \quad (11)$$

Залежності на рис. 6 показують, що загальна чутливість збільшується у 1,5-2 рази при наближенні до границь робочого простору і особливо при нахилі робочого органа відносно осей координат.

Висновки

Розроблене математичне обґрунтування та алгоритм ідентифікації дійсних геометричних параметрів механізму паралельної структури «гексапод» за допомогою вимірювання еталонної оправки контактним датчиком. Встановлено вплив положення та орієнтації робочого органа на чутливість до відхилень геометричних параметрів. Для підвищення точності ідентифікації параметрів механізму паралельної структури необхідно

намагатися обирати конфігурації з поворотом робочого органа та відхиленням від центральної осі, що дозволяє підвищити чутливість до похибок.

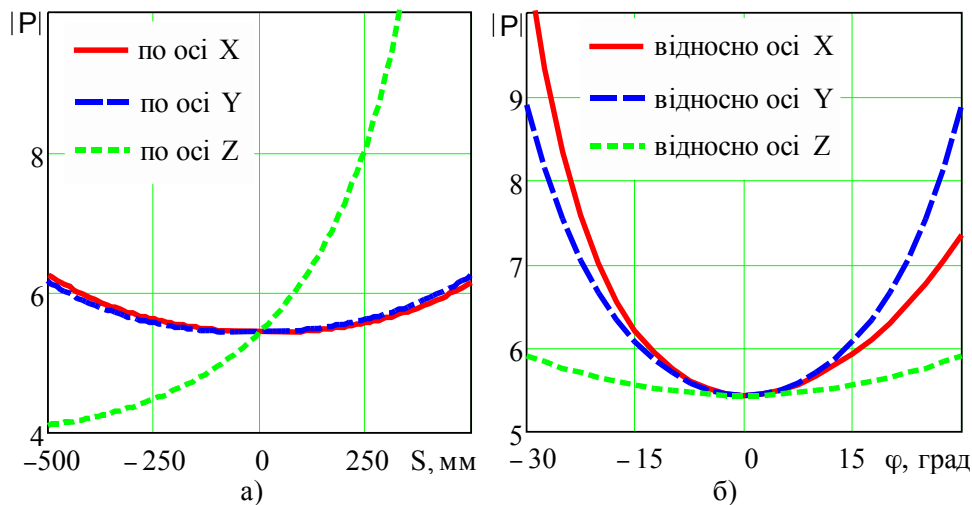


Рис. 6. Загальна чутливість в залежності від а) положення, б) орієнтації робочого органа

Вибір набору конфігурацій для ідентифікації представляє собою складну задачу, оскільки матриця чутливості повинна бути добре обумовленою для нормальної збіжності процесу ідентифікації. В подальшому необхідно дослідити вплив похибок вимірювання на точність ідентифікації параметрів, встановити кількісні критерії вибору конфігурацій та провести ідентифікацію параметрів верстата-гексапода за результатами експериментальних вимірювань.

1. Stewart, D. A Platform with Six Degrees of Freedom // *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering*. – 1965. – Vol. 180, part 1, No. 15. – P. 371-386.
2. Griffis, M. A forward displacement analysis of a class of Stewart platforms / M. Griffis, J. Duffy // *Journal of Robotic Systems*. – 1989. – Vol. 6, Issue 6. – P. 703-720.
3. Wang, G. Forward displacement analysis of a class of the 6-6 Stewart platforms // *Robotics, Spatial Mechanisms and Mechanical Systems*. – 1992. – Vol. 45. – P. 113-117.
4. Подленко, О.Н. Параметрический синтез формообразующих систем станков на базе механизмов с параллельной кинематикой : диссертация ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Хабаровск, 2005. – 145 с.
5. Merlet J.-P. *Parallel Robots* / J.-P. Merlet. – Springer-Verlag New York Inc., 2006. – 394 p.
6. Besnard, S. Calibration of parallel robots using two inclinometers / S. Besnard, W. Khalil // *Robotics and Automation*. – 1999. – Vol. 3. – P. 1758-1763.
7. Patel, A. Calibration of a hexapod machine tool using a redundant leg / A. Patel, K. Ehmam // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2000. – Vol. 40, Issue: 4. – P. 489-512.
8. Khalil, W. Self calibration of Stewart-Gough parallel robots without extra sensors // W. Khalil, S. Besnard // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. – 1999. – Vol. 15. – P. 1116-1121.
9. Calibration of parallel kinematic machine tools using mobility constraint on the tool center point / M. Abtahi, H. Pendar, A. Alasty, G.H. Vossough // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2009. – Vol. 45(5-6). – P. 531-539.
10. Ibaraki, S. Kinematic calibration on a parallel kinematic machine tool of the Stewart platform by circular tests / S. Ibaraki, T. Yokawa, Y. Kakino, M. Nakagawa, T. Matsushita // *Proceedings of the American Control Conference*. – 2004. – Vol.2. – P. 1394-1399.
11. <http://www.renishaw.ru/>
12. <http://www.heidenhain.ru/>
13. Стренг Г. *Линейная алгебра и ее применения*. – М.: Мир, 1980. – 459 с.