

Розробка технічних засобів проектування технологічного і верстатного обладнання каркасних просторових компоновок

Д.О. Дмитрієв • С.А. Русанов • А.А. Омельчук • Д.Д. Федорчук

Херсонський національний технічний університет, м.Херсон, Україна

Received: 24 October 2017 / Accepted: 20 November 2017

Анотація. У статті проводиться аналіз пружно-напруженого стану каркасних просторових компоновок технологічного і оброблювального обладнання для стратегії обробки поверхонь другого порядку з найменшим відхиленням від запланованих траєкторій. Проведено аналіз поведінки обладнання з механізмами паралельної структури стосовно використання типових стратегій обробки в лінійці програмних продуктів Tools Glide і Tools Response. Можливість вибору стратегії обробки поверхонь другого порядку по розрахованим критеріям точності представлено як технічні засоби проектування та оцінки прогнозованої якості обладнання з механізмами паралельної структури. Отримані попередні рекомендації по розташуванню типових траєкторій по координаті z в робочому просторі верстата. Показано, що компоновання каркасного обладнання з механізмами паралельної структури з нахиленими напрямними в значній мірі підвищує сукупну жорсткість в порівнянні з паралельними напрямними в каркасі. За результатами серії розрахунків стверджується, що слід вибирати стратегії з найменшою кількістю гострокутних переходів. Описується, що підвищення точності в розглянутих каркасних компоновках обладнання з механізмами паралельної структури може бути забезпечено коригуванням вихідної траєкторії при зміні її кривизни і напрямки руху інструменту. Для такого завдання необхідно максимально ретельне визначення загальної залежності для силових факторів обробки.

Ключові слова: технічні засоби проектування, стратегії обробки поверхонь, каркасні просторові компоновки, механізми паралельної структури.

Вступ

Сучасною тенденцією розвитку багатофункціонального обладнання для обробки складних поверхонь різанням, багатокоординатного маніпулювання різними об'єктами та інструментом, або інших процесів виготовлення деталей, наприклад, "виросування" на 3d-принтерах, спостерігається застосування просторових шарнірно-стрижневих систем на основі механізмів паралельної структури (МПС) [1, 2, 3]. Найбільш розповсюджені структури "дельта", hexapod, tricept вже стали традиційними [4]. Однак, для застосування МПС в якості верстатного оброблювального обладнання необхідно заздалегідь уявляти собі вплив напружено-деформованого стану на точність позиціонування інструменту [5, 6]. Таким чином, застосування будь-яких кінематичних схем для обладнання з МПС може обмежуватися їх параметрами жорсткості, які безпосередньо впливають на точність виготовлення деталі, що оброблюється. Множина каркасних компоновок обладнання із напрямними і приводами рухомих кареток багатоваріантна і залежить від геометричних властивостей розташування елементів технологічного обладнання у просторі [7, 8]. Зокрема, такі компоновки побудовані за формою правильних багатогранників (призм, пірамід, октаєдрів) з симетрією, або включають навіть не симетричні фігури. Дане технологічне обладнання має анізотропію параметрів лінійної і крутильної жорсткості в робочому просторі відносно властивостей каркасу компоновки, тому, для визначення можливості використання тієї чи іншої компоновки обладнання, необхідне визначення пружних відтискань каркасної системи як рухомої просторової стрижневої системи з інструментом, яка змінює форму, так і елементів несучого каркасу під час реалізації складних стратегій 5-координатної обробки [9, 10]. як рухів під навантаженням. Таким чином завжди необхідно враховувати значний вплив не тільки питань компоновки каркасної конструкції на картину деформованого стану конструкцій, але й вплив взаємного орієнтування системи «каркас – деталь – інструмент» [11, 12, 13].

Мета дослідження

Метою даної роботи є аналіз поведінки технологічного і верстатного обладнання з МПС стосовно до використання типових стратегій обробки (що закладені у сучасні САМ-системи) і відповідності вихідних траєкторій (та, як наслідок, якості кінцевого продукту) критеріям точності об'єкту, що оброблюється, з врахуванням зворотного зв'язку з сукупною жорсткістю каркасів й стрижнів МПС і загального вигляду зовнішніх впливів (сил різання тощо), а також встановлення ієрархії стратегій за вибраними критеріями якості обробки.

Основна частина

Для аналізу відклику каркасної системи на зовнішні навантаження необхідно, з одного боку, виконати декомпозицію задачі з врахуванням властивостей деяких груп елементів або окремих ланок, що може бути реалізовано за методом скінчених елементів, з іншого ж боку необхідним є врахування складних режимів обробки, що може вносити значну нелінійність та/або зворотній зв'язок в задачу при завданні особливого вигляду для закону зміни зовнішнього навантаження.

Аналітичний розв'язок таких нелінійних задач практично завжди неможливий, з іншого боку, використання автоматизованих систем загального призначення (на кшталт ANSYS, COMSOL Multiphysics та ін.) також потребує значних часових затрат на формування геометричної моделі, аналіз і завдання зв'язків тощо, особливо з врахуванням достатньої гнучкості, та, як наслідок, варіативності компоновок каркасного обладнання [14]. Достатньо зручно проводити моделювання роботи обладнання з МПС в різних умовах з використанням спеціалізованих програмних пакетів, таких як лінійка програмних продуктів Tools Glide [15], Tools Response та Tools Apps [16, 17].

Вказана лінійка призначена для рішення зворотної задачі кінематики та аналізу статичного та динамічного відкликів верстатного обладнання з МПС без обмежень на форму зовнішніх навантажень, що можуть бути задані як довільні функції часу та внутрішніх параметрів системи з підтримкою зворотного зв'язку.

Блок Tools Glide в лінійці призначено для вирішення зворотної задачі кінематики для вибраної компоновки, яка реалізується в CAD-модулі Tools Glide. Для генерування розв'язку та створення візуалізації система потребує імпорту MPN-файлу (m-файл, point, normal), що містить інформацію по сценарію обробки та оброблюваній деталі (нормалі та дотичні до кожного вузла деталі уздовж траєкторії, маркери холостого ходу тощо). MPN-файл може бути отриманий із безпосередньо САМ-середовища (наприклад, як переопрацьований CLData), або ж з застосуванням CAD-систем. Для рішення зворотної задачі розроблено два алгоритмічних варіанта: Simple Matrix Scenario та Virtual Potential Scenario [18]. Перший (більш швидкий) варіант реалізує просту трансляцію з поворотом на кут ϕ навколо осі \mathbf{v} , перпендикулярній площині, що містить вектори \mathbf{n} – нормалі до поверхні деталі в поточній точці (що зчитується з MPN-файлу) та деяку попередню нормаль \mathbf{n}_{old} :

$$\begin{aligned} \mathbf{r}^r &= [\text{Rot}] \cdot \Delta \mathbf{r}_{old}^r + \mathbf{T}, \\ \mathbf{v} &= \frac{\mathbf{n} \times \mathbf{n}_{old}}{|\mathbf{n} \times \mathbf{n}_{old}|}, \\ \cos \phi &= \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_{old}, \end{aligned} \quad (1)$$

де $[\text{Rot}]$ – матриця повороту навколо осі \mathbf{v} на кут ϕ , \mathbf{T} – вектор трансляції.

Вказаний варіант не враховує обмеження, що можуть бути накладені шарнірами в кінематичних парах, тому передбачає адекватне врахування цих обмежень ще на стадії формування MPN-файлу. Другий варіант може враховувати вказані обмеження за рахунок введення віртуального потенціалу V , що для голономних в'язей повинен мати мінімум (більш загально – приймати стаціонарне значення) у дозволених в'язях точках простору, а при відхиленні від них дельтоподібно зростати [19]:

$$V(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\delta(f(\mathbf{r}, t))},$$

де $f(\mathbf{r}, t)$ – ліва частина рівняння для допустимої поверхні $f(\mathbf{r}_s, t) = 0$, $\delta(x)$ – дельта-функція. Таким чином вводячи замість геометричного енергетичний опис в'язів, вони включаються їх безпосередньо у функцію Лагранжа, яка буде визначатися як

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2) - (V(x, y, z, t) + U(x, y, z, t)) \quad (2)$$

де $U(x, y, z, t)$ являє собою сумарну потенціальну енергію системи в полі потенціальних сил, а кінцева система диференціальних рівнянь, що описує кінематику просторового механізму, отримується підстановкою функції Лагранжа у рівняння Лагранжа 2-го роду, що складені по всім N ступеням вільності:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{r}}_j} - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{r}_j} = 0, \quad j = 1, \dots, N \quad (3)$$

У якості об'єкта для оцінки типових стратегій обробки була обрана деталь, що обмежена поверхнею другого порядку з подвійною кривизною (еліпсоїд) з застосуванням типових стратегій обробки (зигзаг, контурна петля). Для стратегії зигзаг обирається декілька варіантів: довільний, по меридіанам і по паралелям. На отриманих траєкторіях обираються опорні точки з визначенням нормалей та дотичних до них (рис. 1).

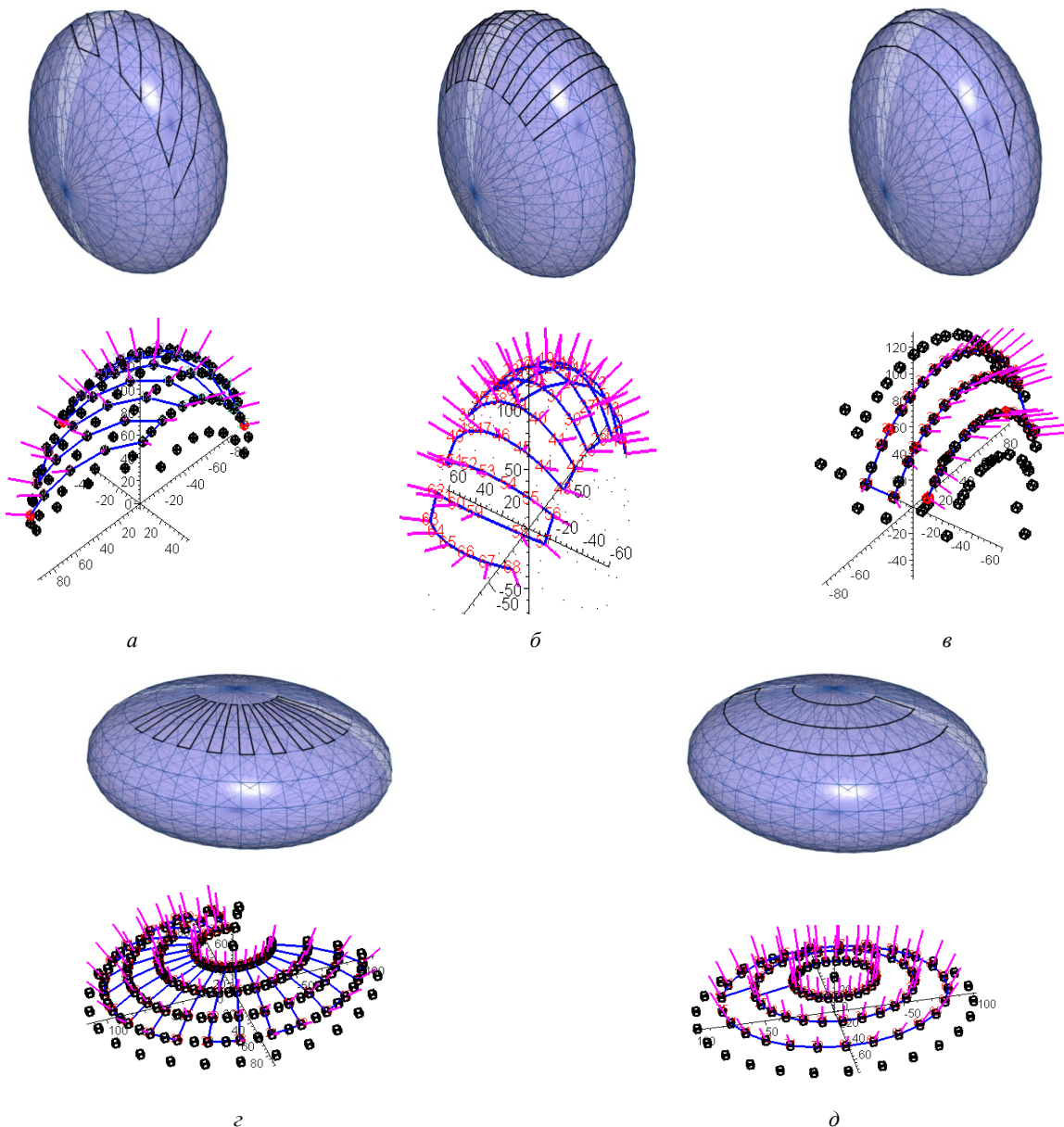


Рис. 1. Варіанти стратегій обробки поверхонь другого порядку, опорні точки та нормалі для траєкторій: «зигзаг» – довільний (а), по меридіанам (б), по паралелям (в), контурний (г); петля контурна (д)

Побудування проводились на базі скрипту програми в середовищі 3D Studio MAX для віртуального управління ієрархічно зв'язаною кінематичною моделлю верстату СФВПК-4 для складання MPN-файлу (рис. 2,

в) та проведення попередньої перевірки робочих рухів обладнання. Для побудови траєкторії обиралася відносно велика кількість опорних точок (не менше 60 точок).

Для аналізу деформаційного відклику конструкції на робочі зовнішні навантаження в усьому діапазоні технологічного процесу обробки блок Tools Response відокремлює статичні та динамічні навантаження – проходить наскрізний обмін даними між відповідними модулями: кінематика (пряма або зворотня задачі – Tools Glide) – статичний відклик (формування тензорів коефіцієнтів жорсткості) – динамічний відклик. Для визначення локацій та напрямків з заданою жорсткістю модуль Tools Response дозволяє отримувати в автоматичному режимі форми тензорних еліпсоїдів та еліпсоїдів податливостей для всього циклу обробки, при цьому проводиться визначення змінної динамічної величини пружного переміщення робочого органу стрижневої системи в місці навантаження з отриманням компонентів тензору приведених коефіцієнтів жорсткості (лінійної та крутильної) [20, 21]. Для аналізу напружено-деформованого стану каркасних компонок в Tools Response використано скінчено-елементні моделі для множини структурних об'єктів (консольних, балочних, полігональних тощо). Наприклад, модель консольних елементів має вигляд:

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix}^{\{CONS\}} = \begin{bmatrix} \frac{L^3}{3EI_y} & 0 & 0 & 0 & \frac{L^2}{2EI_y} & 0 \\ 0 & \frac{L^3}{3EI_x} & 0 & -\frac{L^2}{2EI_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L}{EF} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{L^2}{2EI_x} & 0 & \frac{L}{EI_x} & 0 & 0 \\ \frac{L^2}{2EI_y} & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{EI_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{GI_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}^{\{CONS\}} \quad (4)$$

Модель деформування балочних елементів:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{\{BEAM\}}_1 &= \hat{\mathbf{C}}_Q^u \mathbf{Q}_1^{\{BEAM\}} + \hat{\mathbf{C}}_M^u \mathbf{M}_1^{\{BEAM\}} + (\mathbf{\Theta}_0 \times \mathbf{L})^{\{BEAM\}} + \mathbf{u}_0^{\{BEAM\}}, \\ \mathbf{\Theta}^{\{BEAM\}}_1 &= \hat{\mathbf{C}}_Q^\phi \mathbf{Q}_1^{\{BEAM\}} + \hat{\mathbf{C}}_M^\phi \mathbf{M}_1^{\{BEAM\}} + \mathbf{\Theta}_0^{\{BEAM\}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Модель жорсткої платформи:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{PLG} &= \mathbf{\Theta} \times \mathbf{r}^{\{PLG\}} + \mathbf{u}_C; \\ \theta_x^{\{PLG\}} &= -\frac{1}{\Delta} [(x_{J2} - x_{J3})u_{Jz1} - (x_{J1} - x_{J3})u_{Jz2} + (x_{J1} - x_{J2})u_{Jz3}]^{\{PLG\}}; \\ \theta_y^{\{PLG\}} &= -\frac{1}{\Delta} [(y_{J2} - y_{J3})u_{Jz1} - (y_{J1} - y_{J3})u_{Jz2} + (y_{J1} - y_{J2})u_{Jz3}]^{\{PLG\}}; \\ \theta_z^{\{PLG\}} &= -\frac{u_{Jx2}^{\{PLG\}} - u_{Jx1}^{\{PLG\}}}{y_{J2} - y_{J1}}; \\ u_{cx}^{\{PLG\}} &= u_{Jx1}^{\{PLG\}} + \theta_z^{\{PLG\}} y_{J1}^{\{PLG\}}; \\ u_{cy}^{\{PLG\}} &= u_{Jy1}^{\{PLG\}} - \theta_z^{\{PLG\}} x_{J1}^{\{PLG\}}; \\ u_{cz}^{\{PLG\}} &= \frac{1}{\Delta} [(x_{J2}y_{J3} - x_{J3}y_{J2})u_{Jz1} - (x_{J1}y_{J3} - x_{J3}y_{J1})u_{Jz2} + (x_{J2}y_{J2} - y_{J1}x_{J2})u_{Jz3}]^{\{PLG\}}; \\ \Delta &= [x_{J1}y_{J2} - x_{J1}y_{J3} - y_{J1}x_{J2} - x_{J2}y_{J3} + x_{J3}y_{J1} - x_{J3}y_{J3}]^{\{PLG\}}. \end{aligned} \quad (6)$$

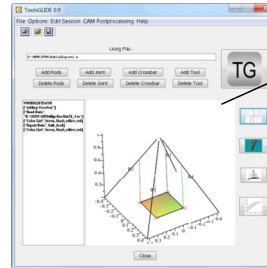
В формулах (4-6) \mathbf{u} – вектор переміщення (деформації) вузла, $\mathbf{\Theta}$ – відносний (малий) кут повороту (закручування) вузла, L – довжина консольного і балочного елемента, E – модуль пружності, G – модуль зсуву, I – статичні моменти інерції перетинів елементів, \mathbf{Q} , \mathbf{M} – поперечні зусилля і моменти в перетинах консольних

та балочних елементів, \hat{C}_Q^u, \hat{C}_M^u – блоки матриці жорсткості, $\mathbf{r}_{ji} = [x_{ji}, y_{ji}, z_{ji}]^T$ – радіус-вектор i -го вузла в системі координат рухомої платформи.

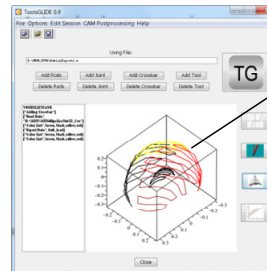
В якості базової компоновки обрано верстат з паралельною кінематикою СФВПК-4 пірамідальної форми по патенту України № 86533 (рис. 2, а), для якої проведено відповідне генерування зворотної задачі кінематики в Tools Glide з отриманням відповідних L -координат та зон обробки (рис. 2, б).



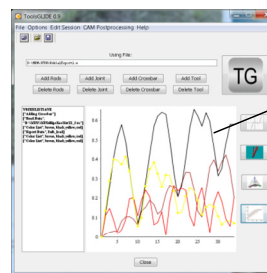
а



Згенерована
каркасна
компоновка з
МПС

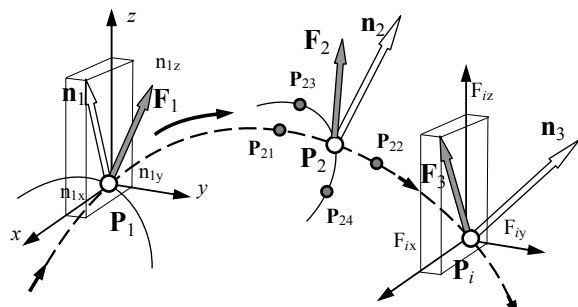
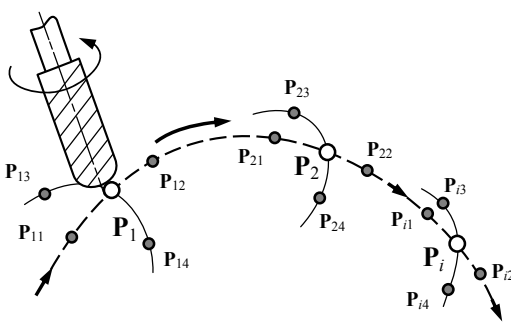


Отримані
траєкторії
руху ланок і
інструменту



L-координати
руху кареток
(діаграми
роботи
приводів)

б



$P_1(x_{p1}, y_{p1}, z_{p1})$ $P_{i1}(x_{pi1}, y_{pi1}, z_{pi1})$ $P_{i2}(x_{pi2}, y_{pi2}, z_{pi2})$ $P_{i3}(x_{pi3}, y_{pi3}, z_{pi3})$ $P_{i4}(x_{pi4}, y_{pi4}, z_{pi4})$
 1,1, -15.13, 72.16], ([65.3, -0.3, 74.71], [56.61, -28.91, 64.70]), ([56.87, -15.13, 80.78], [70.11, -15.13, 59.65]),
 1,11, -15.13, 59.65], ([76.72, 0, 50.98], [72.57, -28.57, 20.86]), ([70.11, -15.13, 59.65], [74.69, -15.13, 49.25]),
 ...

$P_i(x_{pi}, y_{pi}, z_{pi})$, $\mathbf{n}_i(x_{pi}, y_{pi}, z_{pi})$, $\mathbf{F}_i(x_{pi}, y_{pi}, z_{pi})$
 MPN[1]= [63.1, -15.13, 72.16], [0.77472, -0.40515, 0.48543], [202.353, 64.498, -71.127],
 MPN[2]= [70.11, -15.13, 59.65], [0.75523, -0.64648, 0.10804], [221.118, 43.358, -82.467],
 ...

6

Рис. 2. Загальний вигляд верстата з МПС СФВПК-4 (а), елементи інтерфейсу та розрахунки L -координат в Tools Glide (б), структура вхідного MPN-файлу, що описує траєкторію і режими обробки, та використовується для імпорту в Tools Glide (в)

Масив даних, що описує геометрію та результати рішення задачі зворотної кінематики надалі було імпортовано в блок Tools Response. Сила різання задавалась уздовж вектору дотичної для всієї довжини

обробки (орієнтація осі інструменту – по нормалі до поверхні в опорних точках траєкторії). В результаті було отримано анімацію обробки для всіх сценаріїв з накладанням деформованого та недеформованого станів, висвітленням зусиль у вузлах елементів та прорисовкою заданої та істинної траєкторії інструменту (рис. 3, а-д).

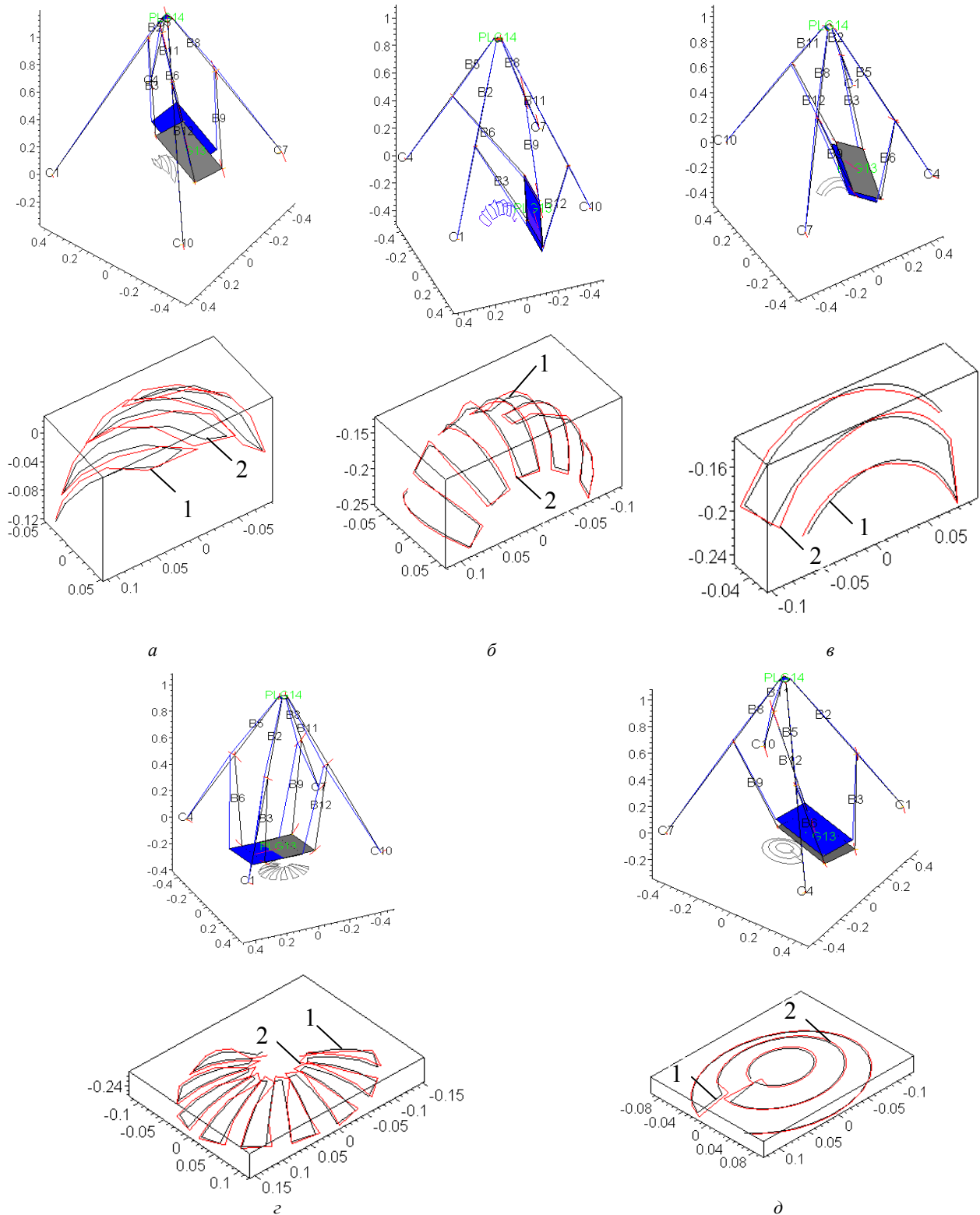


Рис. 3. Відклики каркасної конструкції на робочі та зовнішні навантаження (кадр анімації та траєкторії інструменту Tools Response) при різних стратегіях обробки області еліпсоїду для різних траєкторій відповідно до рис. 1: «зигзаг» – довільний (а), по меридіанам (б), по паралелям (в), контурний (г); петля контурна (д); 1 – запланована траєкторія інструменту; 2 – прогнозована траєкторія інструменту після моделювання пружних відтискань каркасного компонента

Взаємодія оброблювальної деталі та каркасної системи задається силовими факторами, що можуть бути задані як в аналітичному вигляді (пріоритетно) так і у вигляді сплайну уздовж траєкторії. Загальним чином, система підтримує завдання силового навантаження в робочому процесі як складну функцію багатьох параметрів, наприклад, для оброблювальних процесів, вигляду

$$\mathbf{f}(\mathbf{F}, \mathbf{s}, v, \dots) = \mathbf{0} \quad (7)$$

де \mathbf{s} – просторова подача інструмента, v – швидкість обробки, \mathbf{F} – оброблювальне навантаження (що дорівнює за модулем та протилежно за напрямом силі відтискання системи).

Система «Tools App» виконує функції по розрахунку величин складових зусилля різання за технологічними режимами обробки, величини переміщення платформи супорту та визначення динамічних характеристик (віброхарактеристик) за ортогональними осями, визначення величини загального переміщення супортної платформи у часі. Також є можливість знаходження часу стабілізації системи при дії змінного навантаження, моделювання спектрограм та розрахунків динамічних параметрів системи. Характеристики податливості отримуються системою з блоку «Tools Response» у вигляді тензору розмірністю 6×6 .

На рис. 4 висвітлено порівняння величин відтискання разом з фіксацією максимальних значень.

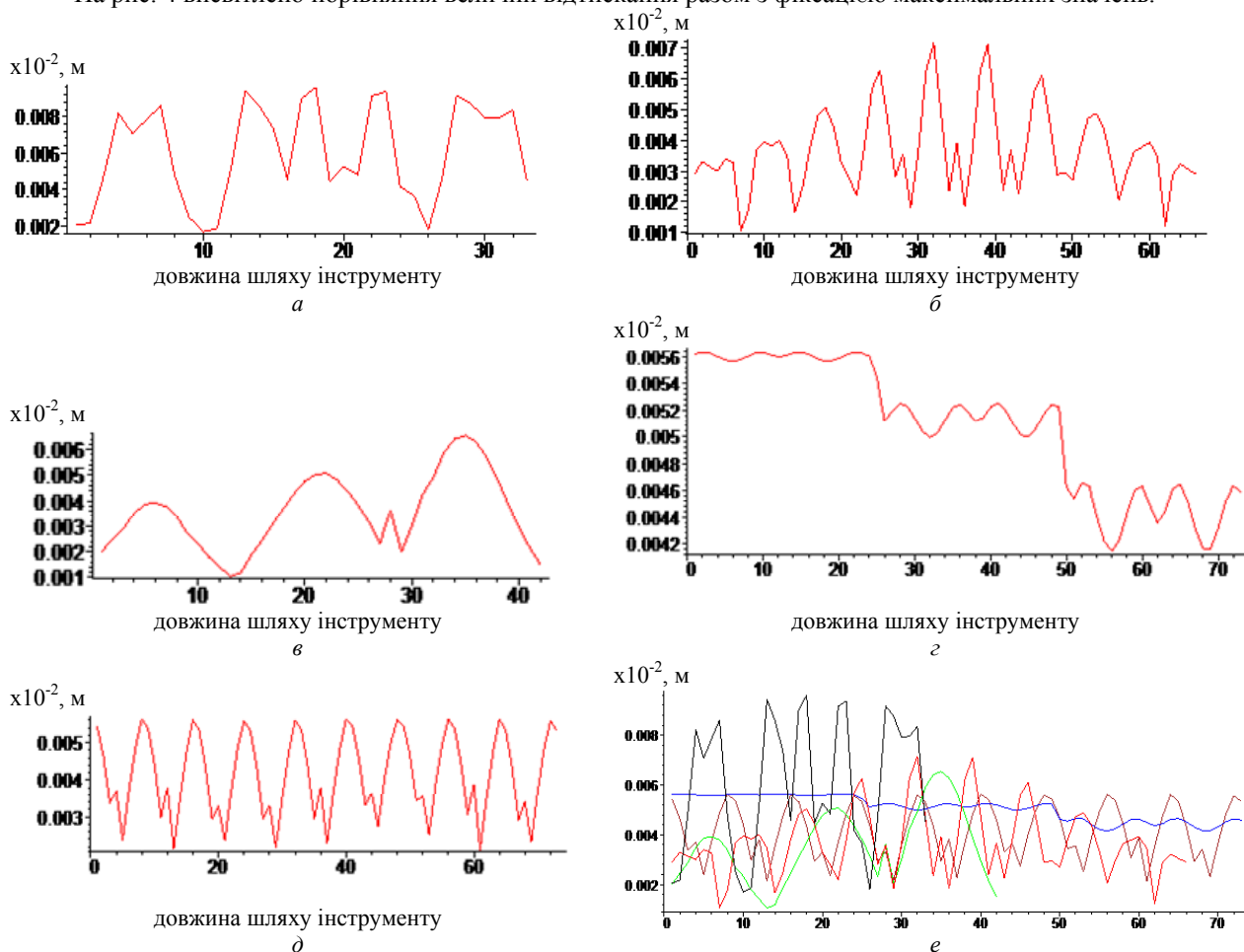


Рис. 4. Відхилення від траєкторії рухомої платформи внаслідок пружних переміщень для стратегій обробки наведених на рис. 1 і рис. 2 траєкторій: «зигзаг» – довільний (а), по меридіанам (б), по паралелям (в), контурний (д); петля контурна (г); порівняння відхилень (е)

Параметри точності обробки можна оцінювати як відхилення від заданої траєкторії та порівняти стратегії за нормами:

$$\Delta_1 = \sqrt{\sum_i (\mathbf{r}_i^* - \mathbf{r}_i)^2 / n}; \quad (8)$$

$$\Delta_2 = \max(\mathbf{r}_i^* - \mathbf{r}_i)^2, \quad (9)$$

де \mathbf{r}_i^* та \mathbf{r}_i – вектор поточної координати інструмента з врахуванням відклику та цільової відповідно. За необхідністю таку ж оцінку можна провести щодо відхилення напрямків орієнтації інструмента.

Виходячи з отриманих даних можна припустити, що найбільш доцільними є стратегія обробки зигзаг по паралелям (рис. 4, в) якщо виходити з формули (8), або контурною петлею у відповідності з (9).

Висновки

Проведено аналіз пружних відтискань обладнання каркасних компоновок з механізмами паралельної структури стосовно до використання типових стратегій обробки в лінійці авторських програмних продуктів Tools Glide та Tools Response. Показано можливість вибору стратегій обробки поверхонь другого порядку обробки за критеріями точності, що розраховуються за формулами (8) та (9). За результатами серії розрахунків можна висунути попередні рекомендації: бажане найнижче розташування типових траєкторій по координаті z в робочому просторі верстату, компоновки з нахиленими напрямними в значній мірі підвищує жорсткість компоновки в порівнянні з паралельними напрямними, слід вибирати стратегії з найменшою кількістю гострокутних переходів. Підвищення точності в розглянутих каркасних компоновках обладнання з механізмами паралельної структури може бути забезпечено корегуванням вихідної траєкторії при зміні її кривизни та напрямку руху інструменту, але для такої задачі необхідно максимально ретельне визначення загальної залежності для силових факторів обробки (7).

Разработка технических средств проектирования технологического и станочного оборудования каркасных пространственных компоновок

Д.А. Дмитриев, С.А. Русанов, А.А. Омельчук, Д.Д. Федорчук

Аннотация. В статье проводится анализ упруго-напряженного состояния каркасных пространственных компоновок технологического и обрабатывающего оборудования для стратегии обработки поверхностей второго порядка с наименьшим отклонением от запланированных траекторий. Проведен анализ поведения оборудования с механизмами параллельной структуры касательно использования типовых стратегий обработки в линейке программных продуктов Tools Glide и Tools Response. Возможность выбора стратегий обработки поверхностей второго порядка по рассчитанным критериям точности представлены как технические средства проектирования и оценки прогнозируемого качества оборудования с механизмами параллельной структуры. Полученные предварительные рекомендации по расположению типовых траекторий по координате z в рабочем пространстве станка. Показано, что компоновка каркасного оборудования с механизмами параллельной структуры с наклонными направляющими в значительной степени повышает совокупную жесткость по сравнению с параллельными направляющими в каркасе. По результатам серии расчетов утверждается, что следует выбирать стратегии с наименьшим количеством остроугольных переходов. Описывается, что повышение точности в рассмотренных каркасных компоновках оборудования с механизмами параллельной структуры может быть обеспечено корректировкой исходной траектории при изменении ее кривизны и направления движения инструмента. Для такой задачи необходимо максимально тщательное определение общей зависимости для силовых факторов обработки.

Ключевые слова: технические средства проектирования, стратегии обработки поверхностей, каркасные пространственные компоновки, механизмы параллельной структуры.

Development of technical means for designing technological and machine equipment for frame layout

D.A. Dmitriev, S.A. Rusanov, A.A. Omelchuk, D.D. Fedorchuk

Abstract. The article analyzes the elastic-stressed state of frame spatial arrangements of technological and processing equipment for the second-order surface treatment strategy with the smallest deviation from the planned trajectories. The analysis of the behavior of equipment with mechanisms of parallel structure is carried out concerning the use of typical processing strategies in the line of software products Tools Glide and Tools Response. The choice of second-order surface treatment strategies according to the calculated accuracy criteria is presented as a technical means of designing and evaluating the predicted quality of equipment with parallel structure mechanisms. Received preliminary recommendations on the location of typical trajectories along the z coordinate in the working space of the machine. It is shown that the arrangement of frame equipment with mechanisms of parallel structure with inclined guides greatly increases the overall rigidity in comparison with parallel guides in the frame. Based on the results of the series of calculations it is stated that it is necessary to choose strategies with the least amount of acute-angle transitions. It is described that the increase in accuracy in the examined frame assemblies of equipment with mechanisms of parallel structure can be provided by adjusting the original trajectory with a change in its curvature and the direction of movement of the tool. For such a task, it is necessary to determine as thoroughly as possible the general relationship for the force factors of processing.

Keywords: technical design tools, surface treatment strategies, frame-based spatial layouts, mechanisms of parallel structure.

References

1. Афонин В.Л., Крайнев А.Ф., Ковалев В.Е. и др. Обработка нового поколения. Концепция проектирования / Под ред. В.Л. Афонина. – М.: Машиностроение, 2001.-256 с., ил.
2. Кузнецов Ю.М. Компонирование верстаков с механизмами параллельной структуры: Монография / Ю.М. Кузнецов, Д.О. Дмитриев, Г.Ю. Діневич; під ред. Ю.М. Кузнецова. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2009. – 456 с.
3. Kuznetsov Y.N. Realization of frame-configurations conception of machine-tools with mechanisms parallel structure / Y.N. Kuznetsov, D.O. Dmitriev // Journal of the Technical University of Gabrovo, Vol. 54. – 2017, P. 27-31
4. Hennes N. ECOSPEED – An Innovative Machinery Concept for High-Performance Components in Aircraft Engineering // 3-rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar: Development Methods and Application Experience of Parallel Kinematics. Chemnitz, 2002. – P. 763-774
5. Zhang, D. (2000). Kinetostatic Analysis and Optimization of Parallel and hybrid Architectures for Machine Tools, Ph.D. Thesis, Laval University, Canada, 156 p.
6. Yuriy Nickolayevich Kuznetsov, Ibrahim Farhan Salman AL-Refo, Dmitriy Alekseyevich Dmitriev Construction and Research of Pyramidal Arrangement Milling Machine-Tool of "Triglide" Type // International Journals of Engineering & Sciences - International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering (IJMME-IJENS), Vol: 13 Issue: 04, ISSN: 2077-124X (Online) 2227-2771 (Print), Pages: 24-28, Published: August, 2013 <http://www.ijens.org/IJMME%20Vol%2013%20Issue%2004.html>
7. Dmitriev D. New layout and kinematic drill-milling machines with parallel structure mechanisms // Technological Complexes №1 (11), 2015. – P. 25-29
8. Dmitriev D.O. Description configurations of machine-tools with the mechanisms of parallel structure / D.O. Dmitriev // Scientific journal "Technological Complexes". №3. – 2011, P. 18-30
9. Гуржій А.А. Формоутворення криволінійних поверхонь на верстатах з паралельними кінематичними структурами: автореф. дис. на здобуття канд. наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.03.01 – "Процеси механічної обробки" / А.А. Гуржій. – Київ, 2015. – 20 с.
10. Kuznetsov Y.N., Dmitriev D.A., Keба P.V. Kinetic-Static analysis and inflexibility of drilling-milling machine-tool of pyramidal arrangement (DMMPA) with mechanisms of parallel structure (MPS). /12-th Anniversary International scientific Conference "UNITECH -12". 19-20 November 2012. Gabrovo, Bulgaria. Vol.2, 2012
11. Упруго-напряженное состояние несущей системы станка пирамидальной компоновки / Кузнецов Ю.Н., Кеба П., Неделчева П.М. // Международная научно-практическая конференция UNITECH'13, г.Габрово, (Болгария), 2013, с. 66-69.
12. Исследование влияния угла наклона граней каркаса на его упруго-напряженное состояние / Кузнецов Ю.Н., Неделчева П.М., Степаненко А.А., Манжола М.Ю. // Международная научно-практическая конференция UNITECH'13, г.Габрово, (Болгария), 2013, с. 82-87.
13. The development of the design theory of new machine-tools configurations based on system analysis and synthesis of mechanisms of parallel structure // Research report №2267-F, Research director. professor Yu.M. Kuznetsov, NTUU "KPI", Kyiv.-2011.-284 p.
14. Dmitriev D.O. New Layout and Kinematic Drill-Milling Machines with Parallel Structure Mechanisms / D.O. Dmitriev // Scientific journal "Technological Complexes". №11. – 2015, P. 25-30
15. Комп'ютерна програма "ToolsGLIDE". Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 66227. / С.А. Русанов, Д.О. Дмитрієв, П.В.Кеба, Ю.М. Кузнецов. Заявл. 03.11.2016; Опубл. 21.06.2016.
16. Комп'ютерна програма "ToolsApp". Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №57913. / С.А. Русанов, Д.О. Дмитрієв, М.І. Подольський, Ю.М. Кузнецов. Заявл. 03.11.2014; Опубл. 29.12.2014.
17. Русанов С.А. Комплексний аналіз механізмів паралельної структури засобами цільових систем автоматизованого моделювання / С.А. Русанов, Д.О. Дмитрієв // Тези доповідей VII міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», Київ – Херсон, 2016, с. 152-155.
18. Дмитрієв Д.О. Зовнішні модулі для прогнозування та управління складними рухами ланок механізмів паралельної структури / Д.О. Дмитрієв, С.А. Русанов, П.В. Кеба, С.М. Півень // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016): матеріали тез доповідей VI міжнародної науково-практичної конференції. – Чернігів: ЧНТУ, 2016.– С. 44-47.
19. Баганов С.О. Застосування віртуального потенціалу для моделювання просторових механізмів із в'язями / Баганов С.О., Бардачов Ю.М., Русанов С.А. // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2016. – № 1(56). – С. 25—31.
20. Русанов С.А., Рачинський В.В., Дмитрієв Д.О. Просторовий аналіз шарнірно-стрижневих механізмів для механічної обробки поверхневим зміцненням складно профільних деталей. // Матеріали II-ї всеукраїнської конференції «Приладобудування і метрологія. Сучасні проблеми, тенденції розвитку». Луцьк: ЛНТУ, 2016, С. 81-83.
21. Русанов С.А., Дмитрієв Д.О., Рачинський В.В. Працездатність обладнання каркасних компоновок в умовах силового навантаження при обробці складних деталей поверхневим пластичним деформуванням // Вісник ХНТУ, №4 (59), 2016, С. 43-49.