

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Великодний Станіслав Сергійович

УДК 681.518.24:004.896

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ
СКЛАДНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ОБВОДІВ
ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ
ФОРМОУТВОРЕННЯ ДЕТАЛЕЙ**

05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Харків – 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор Невлюдов Ігор Шакирович, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри технології та автоматизації виробництва радіоелектронних та електронно-обчислювальних засобів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Хажмурадов Манап Ахмадович, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», начальник відділу математичного моделювання ядерно-фізичних процесів та систем;

кандидат технічних наук, доцент Становська Тетяна Павлівна, Одеська державна академія холоду, доцент кафедри інформаційних технологій.

Захист відбудеться «15» грудня 2009 р. о 14³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «11» листопада 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Безкоровайний В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У важких реаліях існування сучасної промисловості України, важливим напрямком науково-технічного розвитку є розробка нових технологій автоматизованого проектування із підвищеними вимогами відносно ступеня складності конструкцій, що проектуються, та скорочення термінів виконання замовлень. Незважаючи на суттєвий тиск кризових явищ в економіці та за умов підсилення конкурентної боротьби на ринку, ці складові примушують здійснювати роботи на найсучаснішому технічному рівні. Тому сьогодні конструювання, аналіз і технологічна підготовка виробництва виконуються з використанням інтегрованих систем автоматизованого проектування (САПР), вибір та організація роботи яких проходить у рамках єдиної концепції розвитку засобів проектування та технологічної підготовки виробництв, що спроможні вирішувати більш складні задачі, які були поставлені перед виконавцем.

У більшості випадків елементи, що проектуються, та для яких необхідно вирішувати задачу формоутворення – це конструкції, що складаються із великого набору криволінійних поверхонь, з'єднання яких повинно виконуватись за умов забезпечення гладкості першого ступеня та плавної зміни похідної. У місцях цих з'єднань доводиться вирішувати досить нетипові задачі сполучення за визначеним законом поверхонь, тому до процесу проектування та обробки висунуті найвищі вимоги відносно САПР.

Значні теоретичні досягнення та суттєві практичні результати, в галузі моделювання кривих ліній та складних геометричних поверхонь, отримані завдяки зусиллям провідних вітчизняних вчених: Ю.І. Бадаєва, С.М. Ковальова, Л.М. Куценка, В.Є. Михайленка, В.М. Найдиша, В.О. Надолинного, А.В. Павлова, О.Л. Підгірного, А.М. Подкоритова, М.М. Рижова, І.А. Скидана, П.В. Філіппова та їх наукових шкіл; а також закордонних вчених: І. Адамса (I. Adams), П. Без'є (P. Bézier), В. Гілоя (W. Gilloy), У. Ньюмена (W. Newmen), Д. Роджерса (D. Rogers), Р. Різенфорда (R. Rizenford), А. Сазерленда (I. Sutherland), І. Фергюссона (E. Fergusson), А. Фореста (A. Forest), Д. Швейкерта (J. Schweickert) та ін.

Розробці й дослідженню методів і засобів розв'язання задач формоутворення присвячені роботи А.А. Воронова, В.Д. Байкова, С.М. Вашкевича, І.А. Вульфсона, В.В. Карибського, А.А. Левіна, В.А. Ратмірова, В.Л. Сосонкіна, О.М. Калачьова, К.В. Филиповича та деяких інших вітчизняних та іноземних авторів.

Задача формоутворення складного геометричного обводу, яке виконується системами програмного відтворення рухів (СПВР) (серед яких верстати із числовим програмним керуванням (ЧПК); промислові роботи (ПР); автоматичні маніпулятори та інші гнучкі інтегровані системи (ГІС); складні динамічні об'єкти, що виконують зварювальні, фарбувальні, механообробні роботи, паяння, нанесення покриттів, розкрій та інші технологічні операції, які виконуються електричною дугою, лазерним променем, плазмою, пульверизатором, різцем тощо), передбачає проходження робочим органом (РО) заданої просторової (чи площинної) траєкторії з необхідною точністю. Досить часто виникає потреба у здійсненні програмного руху РО СПВР за складними обводами, що найдоцільніше описати пласкими дугами кривих другого порядку: колом, еліпсом, гіперболою чи параболою тому, що опис

традиційними засобами (лінійна та кругова інтерполяція) не витримує підвищених вимог щодо збільшення точності проведених розрахунків, уникнення значної кількості похибок різного роду, великої кількості розбивань на графічні примітиви та інших факторів, які не дають змогу точно виконувати конкретне технологічне завдання.

Для реалізації найвищої точності опису еліптичних, гіперболічних та параболічних профілів елементів, що проектуються, програмне забезпечення (ПЗб) сучасних СПВР повинно містити ефективні алгоритми автоматичної інтерполяції (сформовані на підставі відповідних методів), що легко сполучаються із пристроями керування ГІС, які реалізують просторовий рух РО за спроектованими програмними траєкторіями. Таким чином, тема, що передбачає розробку методів інтерполяції для САПР формоутворення деталей – є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до держбюджетних та госпдоговірних тем, які виконувалися у Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ), відповідно з планом науково-дослідних робіт кафедри технології та автоматизації виробництва радіоелектронних та електронно-обчислювальних засобів за напрямком «Розробка та впровадження прогресивних інформаційних, ресурсозберігаючих та екологічно безпечних технологій радіоелектронного приладобудування» у рамках теми № 224 «Конструкторсько-технологічні основи створення перспективних компонентів мікроелектромеханічних систем та технологій їх виробництва» (Наказ МОН України № 1044 від 27.11.2007 р., ДР № 0108U002216), у яких автор брав участь як виконавець. У процесі впровадження розв'язувалися задачі, які були визначені Державним випробувальним центром (ДВЦ) «Метрологія» Національного наукового центру (ННЦ) «Інститут метрології», а також ТОВ «Люкстройпроект», що підтверджено відповідними актами.

Мета роботи і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методу та створення моделей інтерполяції геометричних обводів, що описуються кривими другого порядку, а також вирішення на цій основі важливого науково-технічного завдання – підвищення точності проектування формоутворення різноманітних профілів, що виконується СПВР.

Для досягнення поставленої мети роботи необхідне вирішення таких *завдань*:

- створення математичних моделей (ММ), які адекватно описують в аналітичному вигляді просторове розміщення об'єктів, що досліджуються;
- розробка обчислювальних процедур побудови складних геометричних обводів;
- виконання програмної реалізації обчислювальних алгоритмів формоутворення;
- створення інтерактивної системи отримання та обробки графічної інформації, використання якої дозволило б вирішити широкий спектр задач, що пов'язані зі створенням за допомогою ПЕОМ різноманітних геометричних моделей, у тому числі тривимірних геометричних моделей плаского типу.

Об'єкт дослідження – системи автоматизованого проектування процесу формоутворення деталей.

Предмет дослідження – моделі та методи інтерполяції складних геометричних обводів.

Методи дослідження: методи інтерполяції, методи апроксимації, методи аналітичної геометрії та обчислювальної математики для моделювання обводів

складної просторової форми, методи і принципи автоматизованого проектування, методи організації графічного діалогу і побудови інтерфейсу користувача із використанням можливостей програмної системи MATLAB.

Наукова новизна отриманих результатів. Розроблено і сформовано нові методи інтерполяції та моделі проектування складних геометричних обводів рухів РО СПВР, які забезпечують високу швидкодію та надають простий аналітичний підхід до побудови програмних траєкторій у рамках цих методів.

Нові наукові результати, отримані автором, полягають у такому:

- вперше запропоновано метод інтерполяції кінчними перетинами за рахунок однокритеріального аналізу і встановлення конкретного вигляду кривої, яка найбільш точно відтворює задану форму оброблюваної ділянки, що відрізняється від існуючих зменшенням часу опису складних обводів обробки, завдяки скороченню декомпозиції профілю на графічні примітиви;

- вперше розроблено математичні моделі аналітичного подання сформованих обводів, які, на відміну від існуючих, дозволяють аналізувати конфігурацію всієї досліджуваної траєкторії із нульовою похибкою апроксимації, у складі допуску, встановленого на неточність обробки всієї деталі;

- набув подальшого розвитку метод формування вихідних даних для пристрою керування СПВР, що дозволило скоротити кількість кадрів керуючої програми та, відповідно, зменшити ймовірність виникнення помилок зчитування.

Практичне значення отриманих результатів. Результати досліджень реалізовано у вигляді розробленого програмно-методичного комплексу, який створює основу для розробки інструментальних засобів автоматизованого проектування та інтерполяції заданого технологічного процесу, що виконується СПВР разом із САПР.

Методи та моделі розв'язання завдань проектування реалізовані програмно. У процесі тестування та випробувань вони показали свою працездатність і ефективність на конкретних прикладах розв'язання завдань автоматизованого проектування та інтерполяції заданих складних геометричних обводів.

Створено інтерактивну графічну систему одержання зображення формоутворення, яка відрізняється від існуючих інтегрованих САПР-додатків побудови геометричних моделей обводів тим, що траєкторія руху РО інтерполюється відразу кривою (без наближень), що гарантує підвищену точність розрахунків та скорочення термінів проектування.

Розроблено інструкції та рекомендації щодо застосування необхідного математичного та програмного забезпечення. При практичному застосуванні програмних засобів (ПЗ), вихідні дані можуть бути задані в ході розв'язання зворотної задачі кінематики або визначені інженером-технологом аналітично. Додатково у ПЗ передбачено необхідні коментарі відносно їх роботи, перевірки коректності завдання вихідних даних та умов фізичної реалізації сформованої траєкторії руху РО СПВР.

Практичні результати спеціальної частини дисертаційної роботи використовуються при викладанні у ВНЗ 3 – 4 рівнів акредитації, зокрема, на факультеті комп'ютерної інженерії та управління (КІУ) ХНУРЕ при проведенні лабораторних, практичних та окремих курсових робіт за дисциплінами, що відповідають тематиці дисертаційного дослідження. Практичне значення

дисертаційної роботи підтверджується актами впровадження, а саме: результати використовуються при підготовці керуючих програм для машин термічного різання металу, а також для автоматизації розрахунків параметрів сферичних та еліптичних елементів у ТОВ «Люкстройпроект», а розроблені ПЗ використовуються у ДВЦ «Метрологія» ННЦ «Інститут метрології», у рамках робіт із сертифікації ПЗб і окремих пристроїв СПВР.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи виконані безпосередньо автором та опубліковані в роботах [1 – 21]. У друкованих наукових працях, опублікованих у співавторстві, авторові належить: у [1] – теоретичне і практичне обґрунтування важливості розробки алгоритмів програмного керування рухом РО маніпулятора; у [4] – визначення математичного апарату для виконання інтерполяції дуги кола; у [5] – формування алгоритму інтерполяції; у [6] – систематизація існуючих методів інтерполяції; у [7] – організація графічного інтерфейсу користувача ПЗ; у [8] – розробка методу інтерполяції та складання ММ подання складних профілів обробки; у [11] – формування ММ інтерполяції за допомогою кривих другого порядку; у [12] – розробка інструкції користувача ПЗ; у [13] – проведення порівняльного аналізу ефективності різноманітних видів інтерполяції; у [14] – складання характеристик СПВР та розрахунок матеріалів додатків; у [17] – характеристика методів та засобів розв’язання траєкторних задач; а у [18] – розробка методу інтерполяції складних геометричних поверхонь.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи докладались на: 2-ій Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, КДПУ, 2004 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Інтегровані комп’ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ’2007» (м. Харків, НАУ «ХАІ», 2007 р.); 9-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп’ютерної інженерії TCSET’2008» (м. Славське, 2008 р.); I Міжнародній науково-технічній конференції «Електронна компонентна база. Стан та перспективи розвитку», в рамках 3-го Міжнародного радіоелектронного форуму (м. Судак, 2008 р.); 8-ій Міжнародній конференції «Математичне моделювання та інформаційні технології» (м. Одеса, ОДАХ, 2008 р.); 41-ій науково-практичній конференції науково-педагогічних працівників, науковців, аспірантів та співробітників Української інженерно-педагогічної академії (м. Харків, УІПА, 2008 р.); 12-му та 13-му Міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті» (м. Харків, ХНУРЕ, 2008, 2009 рр.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 21 роботі, з яких: 8 статей у фахових наукових виданнях, що входять до переліків, затверджених ВАК України, для публікації матеріалів дисертаційних досліджень; 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права; 1 навчальний посібник; 10 публікацій у збірниках тез Міжнародних наукових конференцій, семінарів та форумів.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, п’яти додатків та переліку використаних джерел. Повний обсяг роботи 244 с. Робота містить: 34 рисунки (на 13 сторінках), 3 таблиці (на 5 сторінках), перелік використаних джерел із 177 найменувань (на 18 сторінках) та 4 додатки (на 28 сторінках).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить загальну характеристику роботи, включаючи відомості про дисертаційну роботу, згідно з існуючими вимогами: актуальність теми; зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; формулювання мети роботи та завдань дослідження; перелік використаних у роботі математичних методів; отримані наукові результати; практичне значення отриманих результатів; особистий внесок здобувача; відомості про апробацію результатів та публікації за темою дисертації.

У першому розділі проведено аналіз предметної галузі дослідження, яка включає огляд існуючих методів розв'язання траєкторних задач та розгляд різноманітних систем автоматизованого проектування і підготовки даних для створення складних геометричних поверхонь. Із проведеного аналізу видно, що сучасні ГС дозволяють реалізувати будь-які закони керування, однак, властивий цифровим обчислювальним пристроям послідовний характер реалізації алгоритмів, ставить вимоги розробки проблемно-орієнтованого математичного забезпечення, заснованого на ефективних обчислювальних методах, при застосуванні яких забезпечуються висока швидкодія і найвища точність опису траєкторій.

Однією з головних умов, що ставиться перед САПР формоутворення деталей – це вирішення проблеми якості векторизації. Інакше кажучи, відчувається потреба у використанні інтерактивних методів одержання векторної моделі, при застосуванні яких користувач задає на екрані монітора набір точок зображення і ряд інших параметрів, що дозволяють керувати процесом інтерполяції одержуваного геометричного обводу і, як наслідок цього, впливати на точність результату.

При розгляді САПР з цієї позиції очевидний висновок, що найбільш складні проблеми при створенні САПР пов'язані саме з тими питаннями, які було сформульовано як завдання дисертаційного дослідження.

Слід зазначити, що найбільшими труднощами при реалізації інтерактивних систем є:

- використання методів аналітичної геометрії для опису поверхонь;
- застосування сучасних комп'ютерних бібліотек, що дозволяють маніпулювати із зображенням;
- розробка методів організації архітектури програм і графічного діалогу;
- реалізація спеціальних вимог, запропонованих для інтерфейсу.

На підставі виконаного аналізу сформульовано мету роботи, досягненню якої присвячені подані дисертаційні дослідження.

Другий розділ роботи присвячено доопрацюванню методу кругової інтерполяції дуги кола, на основі якого розвинуто концепцію створення методу інтерполяції кривими другого порядку, що може бути поширено на значно ширші різновиди профілів обробки.

Однією з основних функцій СПВР, що повинні бути реалізовані в процесі відпрацювання завдання, є перетворення впливів, що задають, які сформовані для окремих осей, з однієї системи координат (СК) в іншу. Для багатокординатних верстатів із ЧПК – це перетворення заданих рухів із СК, пов'язаної з деталлю, до СК верстата; для ПР – з абсолютної СК (АСК) робота, жорстко прив'язаної до земної СК, у відносну (ВСК), пов'язану із суглобами робота і РО. На цій же стадії процесу

відтворення рухів пристрій керування повинен сформувати координати проміжних точок траєкторії заданої точки об'єкта керування або проміжних положень вектора, що відповідає орієнтації РО або деталі. Ця задача вирішується на підставі інформації про координати початкової і кінцевої точок та у вигляді траєкторії або інформації про початковий і кінцевий напрямки вектора, що орієнтує. Це – процедура так званої інтерполяції в СПВР.

На другому етапі, тобто в процесі відпрацьовування впливів, що задають, мають бути реалізовані такі основні функції: знімання інформації про лінійне або кутове переміщення за окремими координатами виконавчих і РО об'єкта; формування керуючих впливів на виконавчі органи за окремими координатами руху об'єкта. Вирішення останньої задачі ґрунтується на інформації про завдане і реальне положення об'єкта за окремими координатами; при цьому враховуються динамічні характеристики відтвореного руху, а також виконавчих і РО об'єкта.

Види впливів, що задають, залежать від призначення і режимів роботи СПВР.

Через різноманіття режимів роботи СПВР вимоги до них різні. В одних випадках, наприклад, необхідно точне відпрацьовування сигналів, що задають, за окремими координатами руху РО, в інших – точне відтворення самої траєкторії, причому не тільки при русі з постійною контурною швидкістю, але і з постійним контурним прискоренням.

Відомо, що для завдання руху твердого тіла у просторі, необхідно вибрати систему відліку, стосовно якої розглядається рух досліджуваного тіла. Для СПВР, насамперед, для ПР та маніпуляторів, що містять багатоланкові маніпуляційні системи, характерна наявність декількох систем відліку (більш ніж дві). З кожною системою відліку жорстко пов'язують яку-небудь СК, так що положення кожної точки тіла, яке рухається, щодо обраної системи відліку можна однозначно визначити трьома координатами цієї точки.

Розглянемо рух РО СПВР за дугою кола, заданою трьома точками із координатами $\vec{r}_1 = \{x_1, y_1, z_1\}$, $\vec{r}_2 = \{x_2, y_2, z_2\}$ та $\vec{r}_3 = \{x_3, y_3, z_3\}$ у деякій нерухомій СК $OXYZ$, пов'язаною, наприклад, з основою робота, тобто АСК робота, тоді отримаємо три радіус-вектори в АСК $OXYZ$ (рис. 1).

Для розкриття методу організуємо рух за дугою кола стосовно до двох постановок задач (ПЗд).

ПЗд 1. Сформувати траєкторію руху РО за дугою кола із заданої початкової точки r_1 у задану кінцеву точку r_3 , через задану точку r_2 , з постійною кутовою (або лінійною) траєкторною швидкістю $\omega_{\text{зад}}$ (або $V_{\text{зад}}$). Визначити необхідний час $t_{\text{розр}}$ переміщення РО за розрахованою траєкторією із точки r_1 у точку r_3 .

ПЗд 2. Сформувати траєкторію руху РО за дугою кола із заданої початкової точки r_1 у задану кінцеву точку r_3 , через задану точку r_2 , за час $t_{\text{зад}}$. Визначити необхідну траєкторну кутову (або лінійну) швидкість $\omega_{\text{розр}}$ (або $V_{\text{розр}}$) переміщення РО за розрахованою траєкторією із початкової точки в кінцеву.

Обидві ПЗд припускають попередній розрахунок довжини l дуги кола і визначення поточних координат положення кінця РО на кривій, у кожний заданий дискретний момент часу t_i ($i = \overline{0, N}$) у процесі руху. Тут N – кількість інтервалів дискретизації, $t_0 = 0$.

Для реалізації руху, відповідно до постановок завдання «ПЗд 1» або «ПЗд 2», пов'яжемо із вихідними точками r_1, r_2 і r_3 пласку декартову прямокутну СК $\hat{\hat{\hat{O}}}\hat{\hat{X}}\hat{\hat{Y}}$, що лежить у площині кола, яке проходить через ці точки. З'єднаємо початок СК $\hat{\hat{\hat{O}}}\hat{\hat{X}}\hat{\hat{Y}}$ із центром кола $r_0(x_0, y_0, z_0)$ (рис. 2).

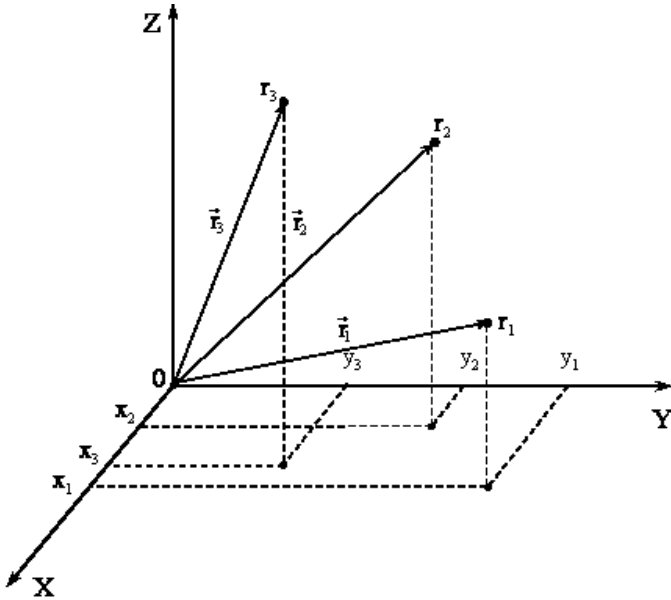


Рис. 1. Вихідні точки r_1, r_2 та r_3 , задані в прямокутній СК $OXYZ$ СПВР. Загальний вигляд

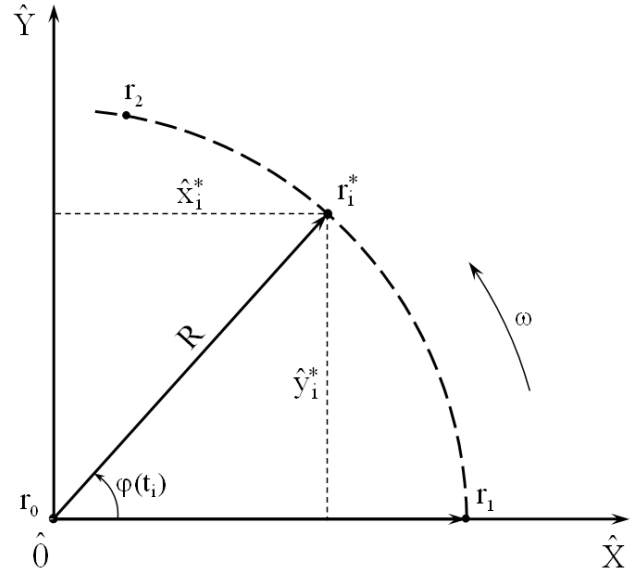


Рис. 2. Визначення відносних координат рухомої точки r_i^* у пласкій СК $\hat{\hat{O}}\hat{\hat{X}}\hat{\hat{Y}}$

Тоді визначимо наступну послідовність формування поточних координат рухомої точки r_i^* (кінця PO), що належить дузі кола (рис. 2).

Крок 1. Задати відносну (рухому) прямокутну СК $\hat{\hat{\hat{O}}}\hat{\hat{X}}\hat{\hat{Y}}\hat{\hat{Z}}$, пов'язану з положенням PO в просторі АСК, з тією ж орієнтацією, що й АСК $OXYZ$ (рис. 3).

Крок 2. Визначити матриці \bar{T} й \bar{T}^{-1} перетворення декартових прямокутних СК $OXYZ$ і $\hat{\hat{\hat{O}}}\hat{\hat{X}}\hat{\hat{Y}}\hat{\hat{Z}}$.

Крок 3. Вибрати напрямок руху PO за дугою і розрахувати довжину l дуги.

Крок 4. Визначити поточні координати x_i^*, y_i^*, z_i^* рухомої точки дуги кола $r_i^* = r_i^*(t_i)$ у ВСК $\hat{\hat{\hat{O}}}\hat{\hat{X}}\hat{\hat{Y}}\hat{\hat{Z}}, \forall i = \overline{0, N}$.

Крок 5. За допомогою матриці зворотного перетворення СК \bar{T} розрахувати поточні координати x_i^*, y_i^* та z_i^* рухомої точки дуги кола $r_i^* = r_i^*(t_i)$ в АСК $OXYZ, \forall i = \overline{0, N}$.

Таким чином, виходячи із загальних завдань дослідження, сформовано метод інтерполяції дуги кола для СПВР багатокординатного погодженого руху одного або декількох PO , причому сама дуга – визначена мінімальною кількістю точок в АСК.

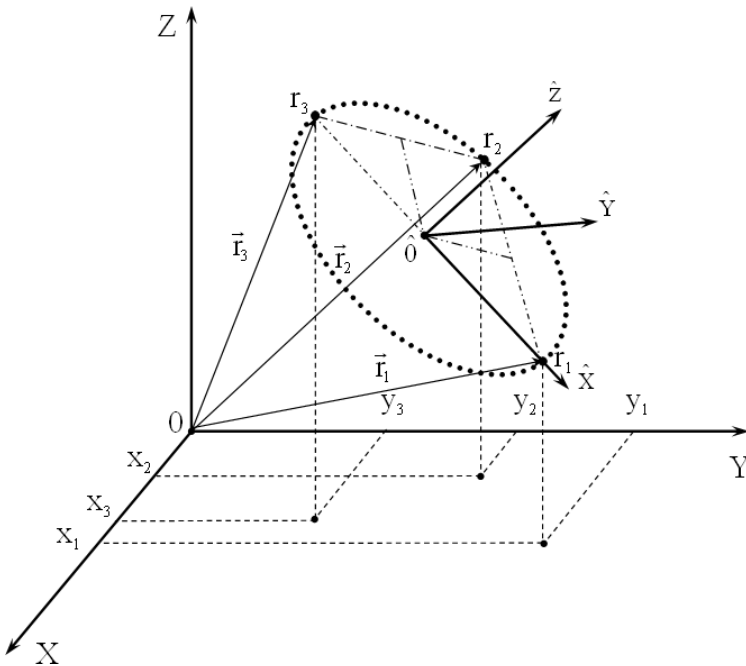


Рис. 3. Взаємне розташування АСК $OXYZ$ і заданої ВСК $O^{\wedge}X^{\wedge}Y^{\wedge}Z^{\wedge}$. Загальний вигляд

Третій розділ присвячено розробці нового методу інтерполяції кривими другого порядку для СПВР. При здійсненні всебічного аналізу можливостей застосування методу інтерполяції кривими другого порядку в СПВР, як ефективного способу скорочення витрат на проектування й виготовлення деталей зі складним геометричним профілем, були розкриті такі питання:

– розглянуто методи інтерполяції, що застосовуються, на предмет виявлення недоліків і задоволення технологічних вимог сучасного виробництва;

– розглянуто здатності пристроїв, що зчитують, з метою

встановлення статистичної залежності виникаючих помилок зчитування;

– обґрунтовано доцільність застосування інтерполяції кривими другого порядку, ґрунтуючись на перевагах подібної апроксимації відповідних обводів обробки.

Кількість прямих відрізків, необхідних для опису кривої, визначаються тією вимогою, що похибка апроксимації не повинна перевищувати 15 – 20 % усього допуску, встановленого на неточність обробки деталі. Знаходячи шляхи реалізації поставленої умови, розроблювачами систем ЧПК була висунута ідея щодо можливості застосування параболічної інтерполяції для опису складних геометричних обводів.

Для роботи зчитувального пристрою ЧПК характерна наявність однієї помилки на 1 млн. біт інформації. Наприклад, при допуску на точність 3,18 нм для обробки дуги кола радіусом 0,254 м (10 дюймів) при апроксимації прямими необхідно задати на носії 4500 кадрів, у той же час, при використанні параболічної інтерполяції – досить 90 кадрів, що в 50 разів менше. Крім того, параболічний інтерполятор дозволяє виконувати обробку прямолінійних і кругових обводів без зміни в апаратурних засобах СПВР, тобто відбувається автоматичне перемикання, в процесі підбору, найбільш оптимального вигляду інтерполяції, стосовно до конкретної ділянки.

При параболічній інтерполяції заданих гладких обводів деталей, що функціонують в умовах обтікання, виникає задача забезпечення у вузлових точках гладкості першого ступеня, тобто наявності загальних перших похідних. Деталі такої складної конфігурації, що оброблюються СПВР, описуються досить складними аналітичними рівняннями. Крім аналітичного опису профілю деталі або його окремих ділянок, звичайно, задаються координати граничних точок, а самі аналітичні рівняння можуть бути задані як у явній $y = f(x)$, так і в неявній формі $\varphi(y) = f(x)$.

Останнім часом все більше поширення знаходять методи інтерполяції за допомогою сплайнів та парабол третього ступеня. Однак, вони можуть дати

непотрібні флуктуації обводу, тобто умови, коли знак кривизни на ділянці змінюється, що не завжди дає можливість їх застосування. Метод інтерполяції параболою другого ступеня досить точний і менш складний, ніж метод парабол більш високого ступеня. У ряді робіт пропонуються такі алгоритми, однак вони мають той недолік, що необхідно визначати аналітичні рівняння апроксимуючих парабол, що ускладнює формування обчислювальних алгоритмів.

Переваги використання інтерполяції кривими другого порядку проілюстровані нижче поданими рисунками. Так, якщо при круговій інтерполяції профілю кулачка (рис. 4) необхідні чотири кола, то при еліптичній – досить лише одного еліпса (рис. 5), у той час як при лінійній – взагалі, число точок розрахункової траєкторії є функцією від довжини кривої та її конфігурації (рис. 6).

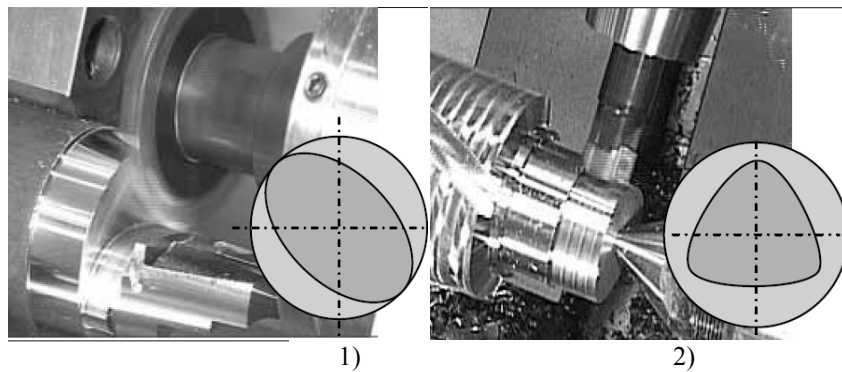


Рис. 4. Фрезерна обробка кулачків, профіль яких представляє: 1) – еліпс; 2) – набір парабол

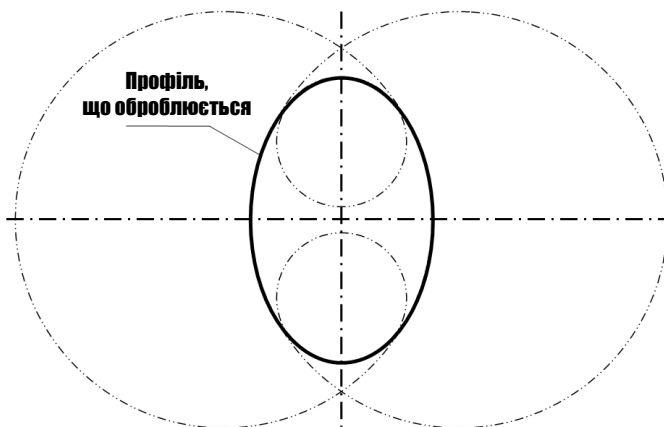


Рис. 5. Кругова інтерполяція еліптичного профілю

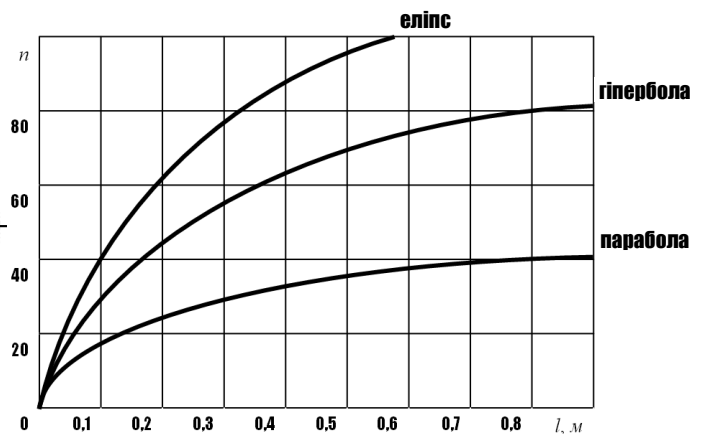


Рис. 6. Залежність кількості точок n від довжини кривої l та її конфігурації при лінійній інтерполяції

Пласкі криві другого порядку (або конічні перетини) визначаються рівнянням другого ступеня відносно декартових прямокутних координат x і y . Загальне рівняння другого ступеня відносно x і y має вигляд

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0, \quad (1)$$

де A, B, C, D, E, F – задані коефіцієнти, причому передбачається, що $B \neq 0$.

Крива другого порядку цілком визначається п'ятьма своїми незалежними точками, чотири з яких не повинні лежати на одній прямій. Крім того, крива другого порядку (1) вироджується в тому і тільки в тому випадку, коли три із заданих точок лежать на одній прямій.

Тоді, стосовно до просторової зони обслуговування СПВР, крива другого порядку задана п'ятьма різними послідовно нумерованими точками

$$r_1 = (x_1, y_1, z_1), r_2 = (x_2, y_2, z_2), r_3 = (x_3, y_3, z_3), r_4 = (x_4, y_4, z_4), r_5 = (x_5, y_5, z_5) \quad (2)$$

у деякій абсолютній (нерухомій) правобічній декартовій прямокутній СК OXYZ, пов'язаній, наприклад, із основою СПВР (рис. 7).

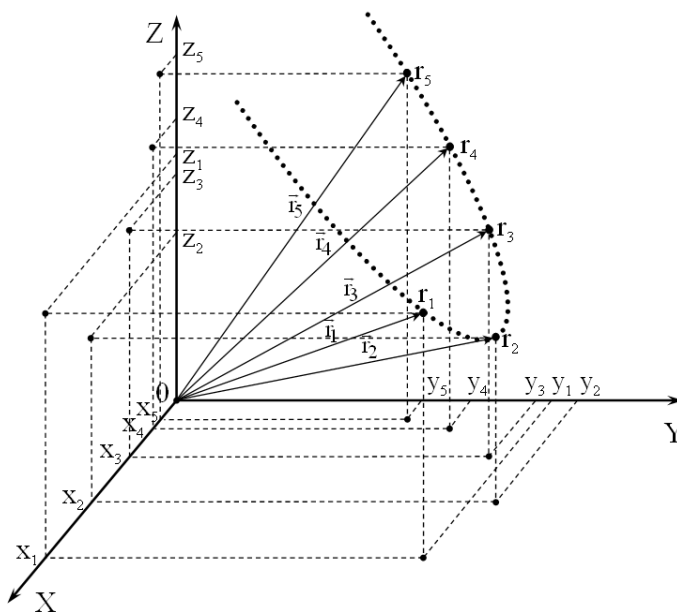


Рис. 7. Вихідні точки r_1, r_2, r_3, r_4 та r_5 , що задані в АСК СПВР. Загальний вигляд

У результаті одержимо п'ять радіусів-векторів у абсолютній СК OXYZ (див. рис. 7):

$$\vec{r}_1 = \{x_1, y_1, z_1\}, \vec{r}_2 = \{x_2, y_2, z_2\}, \vec{r}_3 = \{x_3, y_3, z_3\}, \vec{r}_4 = \{x_4, y_4, z_4\}, \vec{r}_5 = \{x_5, y_5, z_5\}. \quad (3)$$

Сформуємо рух РО СПВР за кривою другого порядку, описуваною рівнянням вигляду (1), стосовно до двох ПЗд.

ПЗд 1. Сформувати рух РО із заданої початкової точки r_1 в задану кінцеву точку r_5 , проходячи послідовно задані проміжні точки r_2, r_3 та r_4 , із середньої кутовою (або лінійною) швидкістю $\omega_{cp,зад}$ (або $V_{cp,зад}$). Визначити необхідний час $t_{розр}$ переміщення РО за розрахованою траєкторією: із точки r_1 в r_5 .

ПЗд 2. Сформувати такий же маршрут руху РО, але за заданий час $t_{зад}$. Визначити $\omega_{cp,розр}$ (або $V_{cp,розр}$) переміщення РО за розрахованою траєкторією: із початкової точки в кінцеву.

Для реалізації руху РО відповідно до «ПЗд 1» або «ПЗд 2», зв'яжемо із вихідними точками r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 (2) прямокутну ВСК $\hat{\hat{X}}\hat{\hat{O}}\hat{\hat{Y}}$, що лежить у площині кривої другого порядку, яка проходить через ці точки. Для визначеності сполучимо початок $\hat{\hat{O}}$ СК $\hat{\hat{X}}\hat{\hat{O}}\hat{\hat{Y}}$ з однією із заданих точок, наприклад, із точкою $r_1 = (x_1, y_1, z_1)$ (рис. 8).

Тоді визначимо наступну послідовність формування поточних координат рухомої точки r_i^* (кінця РО), що належить кривій другого порядку (рис. 7, 8).

Крок 1. Задати відносну (рухому) прямокутну СК $\hat{\hat{O}}\hat{\hat{X}}\hat{\hat{Y}}\hat{\hat{Z}}$, пов'язану з положенням РО в просторі АСК, з тією ж орієнтацією, що й АСК OXYZ.

Задамо рухому СК $\hat{\hat{O}}\hat{\hat{X}}\hat{\hat{Y}}\hat{\hat{Z}}$ у такий спосіб: початок СК $\hat{\hat{O}}\hat{\hat{X}}\hat{\hat{Y}}\hat{\hat{Z}}$ помістимо в точку $r_1 = (x_1, y_1, z_1)$. Вісь $\hat{\hat{O}}\hat{\hat{X}}$ проведемо через r_2 ; тоді для базисного вектора \vec{e}_1 знайдемо:

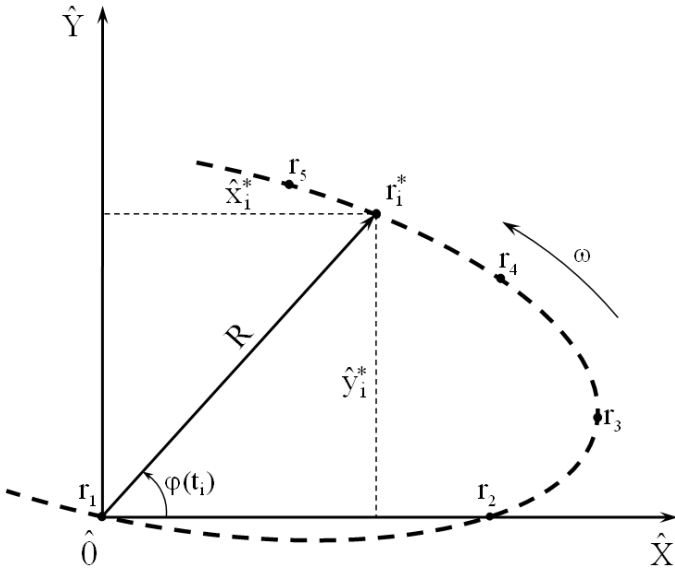


Рис. 8. Визначення відносних координат кінця РО СПВР на кривій другого порядку у ВСК

довільну точку $r_x(r_{x,x}, r_{x,y}, r_{x,z})$ й з'єднаємо її з r_1 вектором $\overrightarrow{r_1 r_x}$. Тоді маємо:

$$\overrightarrow{r_1 r_x} = \rho \bar{e}_1, \quad (5)$$

де ρ – довільно заданий скаляр.

З умови (5) колінеарності двох векторів \bar{e}_1 і $\overrightarrow{r_1 r_x}$, запишемо, з урахуванням (4), канонічне рівняння осі $\hat{O}\hat{X}$, що проходить через точку r_1 :

$$\frac{r_{x,x} - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{r_{x,y} - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{r_{x,z} - z_1}{z_2 - z_1} = \rho, \quad \rho \geq 0. \quad (6)$$

Оскільки усі п'ять точок r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 , що належать кривій другого порядку, лежать в одній площині $\hat{X}\hat{O}\hat{Y}$, то сама площина може бути задана будь-якими трьома з них, наприклад: r_1, r_2 і r_3 . Рівняння цієї площини, що проходить через три надані точки: r_1, r_2 і r_3 з однорідними координатами $r_1(x_1, y_1, z_1, 1)$, $r_2(x_2, y_2, z_2, 1)$ і $r_3(x_3, y_3, z_3, 1)$, має вигляд:

$$\begin{vmatrix} x & y & z & 1 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix} = 0. \quad (7)$$

Розкладаючи визначник за елементами першого рядка, надамо рівнянню (7) більш зручний вигляд (8) або (9):

$$\mathbf{A}_1 x + \mathbf{B}_1 y + \mathbf{C}_1 z + \mathbf{D}_1 = 0, \quad (8)$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{vmatrix} y_1 & z_1 & 1 \\ y_2 & z_2 & 1 \\ y_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix}, \quad \mathbf{B}_1 = \begin{vmatrix} z_1 & x_1 & 1 \\ z_2 & x_2 & 1 \\ z_3 & x_3 & 1 \end{vmatrix}, \quad \mathbf{C}_1 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix}, \quad \mathbf{D}_1 = - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}, \quad (9)$$

$$\bar{e}_1 = \{e_{1,x}, e_{1,y}, e_{1,z}\} = \overrightarrow{r_1 r_2} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1. \quad (4)$$

Вісь $\hat{O}\hat{Y}$ задамо, використовуючи значення координат будь-яких трьох заданих точок, наприклад: координати r_1, r_2 і r_3 . Вісь $\hat{O}\hat{Z}$ проведемо через r_1 , перпендикулярно площині $\hat{X}\hat{O}\hat{Y}$, що проходить через п'ять вихідних точок r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 . При цьому необхідно стежити, щоб орієнтація прямокутної ВСК $\hat{O}\hat{X}\hat{Y}\hat{Z}$, так само, як і АСК $OXYZ$, була правобічною, що визначається вибором напрямку осі $\hat{O}\hat{Z}$.

Для одержання рівняння осі $\hat{O}\hat{X}$, позитивний напрямок якої збігається із напрямком \bar{e}_1 , виберемо на цій осі деяку

причому, визначники $\mathbf{A}_1, \mathbf{B}_1$ і \mathbf{C}_1 не дорівнюють нулю одночасно.

При виконанні (9) передбачається, що три точки r_1, r_2 і r_3 не лежать на одній прямій, тобто для них виконується:

$$\frac{x_3 - x_1}{x_2 - x_1} \neq \frac{y_3 - y_1}{y_2 - y_1} \neq \frac{z_3 - z_1}{z_2 - z_1} \quad \text{або} \quad [\overrightarrow{r_1 r_3}, \overrightarrow{r_1 r_2}] \equiv (\overrightarrow{r_3} - \overrightarrow{r_1}) \times (\overrightarrow{r_2} - \overrightarrow{r_1}) \neq 0. \quad (10)$$

Площина $\hat{X}\hat{O}\hat{Y}$ визначається рівнянням першого ступеня (8), тому нормальний вектор цієї площини має координати

$$\vec{N}_{\hat{X}\hat{O}\hat{Y}} = \left\{ N_{\hat{X},x}, N_{\hat{X},y}, N_{\hat{X},z} \right\} = \{ \mathbf{A}_1, \mathbf{B}_1, \mathbf{C}_1 \} \quad (11)$$

і канонічне рівняння осі $\hat{O}\hat{Z}$, що проходить через точку r_1 для якої цей вектор є базисним, тобто $\vec{e}_3 = \{ e_{3,x}, e_{3,y}, e_{3,z} \} = \vec{N}_{\hat{X}\hat{O}\hat{Y}}$, може бути записане як

$$\frac{r_{z,x} - x_1}{\mathbf{A}_1} = \frac{r_{z,y} - y_1}{\mathbf{B}_1} = \frac{r_{z,z} - z_1}{\mathbf{C}_1} = \rho, \quad \rho > 0, \quad (12)$$

де $r_{z,x}, r_{z,y}, r_{z,z}$ – координати в АСК $OXYZ$ довільної точки r_z на осі $\hat{O}\hat{Z}$.

Для визначення базисного вектора \vec{e}_2 , з'єднаємо r_1 і r_3 вектором $\overrightarrow{r_1 r_3}$. Тоді, зважаючи на те, що r_1, r_2 і r_3 площини $\hat{X}\hat{O}\hat{Y}$ не лежать на одній прямій та вектор $\overrightarrow{r_1 r_2} = \vec{e}_1$, для вектора \vec{e}_2 можна записати

$$\vec{e}_2 = \{ e_{2,x}, e_{2,y}, e_{2,z} \} = \overrightarrow{r_1 r_3} + \lambda \cdot \overrightarrow{r_1 r_2} = \overrightarrow{r_1 r_3} + \lambda \cdot \vec{e}_1, \quad (13)$$

де λ – дійсне число. Виберемо λ так, щоб для \vec{e}_1 й \vec{e}_2 виконувалася умова

$$(\overrightarrow{r_1 r_3} + \lambda \vec{e}_1, \vec{e}_1) = (\overrightarrow{r_1 r_3}, \vec{e}_1) + \lambda(\vec{e}_1, \vec{e}_1) = 0,$$

звідки з урахуванням (4):

$$\lambda = -\frac{(\overrightarrow{r_1 r_3}, \vec{e}_1)}{(\vec{e}_1, \vec{e}_1)} = -\frac{(\vec{r}_3 - \vec{r}_1)(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)}{(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)} = -\frac{(x_3 - x_1)(x_2 - x_1) + (y_3 - y_1)(y_2 - y_1) + (z_3 - z_1)(z_2 - z_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}. \quad (14)$$

І тоді канонічне рівняння осі, що проходить через точку r_1 для якої вектор \vec{e}_2 (13) є базисним, набуде вигляду:

$$\frac{r_{y,x} - x_1}{e_{2,x}} = \frac{r_{y,y} - y_1}{e_{2,y}} = \frac{r_{y,z} - z_1}{e_{2,z}} = \rho, \quad \rho > 0, \quad (15)$$

де $r_{y,x}, r_{y,y}, r_{y,z}$ – декартові прямокутні координати в АСК $OXYZ$ довільної точки r_y осі $\hat{O}\hat{Y}$.

З (4), (11) і (13) для системи базисних векторів \vec{e}_1, \vec{e}_2 і \vec{e}_3 , знайдемо

$$\begin{aligned} \vec{e}_1 &= \{ x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1 \}, \\ \vec{e}_2 &= \{ (x_3 - x_1) + \lambda(x_2 - x_1), (y_3 - y_1) + \lambda(y_2 - y_1), (z_3 - z_1) + \lambda(z_2 - z_1) \}, \\ \vec{e}_3 &= \{ \mathbf{A}_1, \mathbf{B}_1, \mathbf{C}_1 \}. \end{aligned} \quad (16)$$

Для повного завдання просторового положення $\hat{O}\hat{X}\hat{Y}\hat{Z}$ із центром у точці $\hat{O} = r_1(x_1, y_1, z_1)$ необхідно визначити значення косинусів, що орієнтують її вісі координат щодо вісей координат $OXYZ$.

Крок 2. Визначити матриці $\bar{\mathbf{T}}$ і $\bar{\mathbf{T}}^{-1}$ перетворення декартових СК $OXYZ$ та $O'X'Y'Z'$.

Оскільки передбачається, що обидві СК АСК та ВСК – правобічні, то щодо системи ВСК, вісь OX має косинуси, що спрямовують, $\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}$, вісь OY – $\tau_{21}, \tau_{22}, \tau_{23}$, вісь OZ – $\tau_{31}, \tau_{32}, \tau_{33}$. Тоді формули перетворення СК, що пов'язують абсолютні $x^*, y^*, z^*, 1$ і відносні $\hat{x}^*, \hat{y}^*, \hat{z}^*, 1$ однорідні координати рухомої точки r^* , мають вигляд у матричній формі:

$$\bar{r}^* = \bar{\mathbf{T}}^{-1} \overline{r^*} \quad \text{і} \quad \overline{r^*} = \bar{\mathbf{T}} \hat{r}^*, \quad (17)$$

де

$$\bar{\mathbf{T}} = \left\| \begin{array}{c|ccc} \mathbf{T} & & & \bar{\mathbf{r}}_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right\|, \quad \bar{\mathbf{T}}^{-1} = \left\| \begin{array}{c|ccc} \mathbf{T}^T & & & -\mathbf{T}^T \bar{\mathbf{r}}_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right\|, \quad \mathbf{T} = \begin{pmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} \end{pmatrix}, \quad \bar{\mathbf{r}}_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}; \quad (18)$$

а $\overline{r^*}$ і \hat{r}^* – радіуси-вектори рухомої точки r^* в АСК $OXYZ$ та ВСК $\hat{O}\hat{X}\hat{Y}\hat{Z}$.

ВСК зберігає правобічну орієнтацію тоді, коли $\det \mathbf{T}^T = 1$,

Застосовуючи матрицю $\bar{\mathbf{T}}^{-1}$ (18) аналогічно перетворенню (17), можна визначити відносні координати всіх п'яти вихідних точок r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 :

$$r_1(\hat{x}_1, \hat{y}_1, \hat{z}_1) \equiv r_1(0, 0, 0), r_2(\hat{x}_2, \hat{y}_2, \hat{z}_2) \equiv r_2(\hat{x}_2, 0, 0), r_3(\hat{x}_3, \hat{y}_3, \hat{z}_3) \equiv r_3(\hat{x}_3, \hat{y}_3, 0), \dots, r_5(\hat{x}_5, \hat{y}_5, \hat{z}_5) \equiv r_5(\hat{x}_5, \hat{y}_5, 0). \quad (19)$$

В результаті запишемо чотири радіуси-вектори у ВСК:

$$\bar{r}_2\{\hat{x}_2, 0, 0\} = \left\{ \hat{r}_2(\hat{x}_2, 0, 0) - \hat{r}_1(0, 0, 0) \right\}; \bar{r}_3\{\hat{x}_3, \hat{y}_3, 0\}; \bar{r}_4\{\hat{x}_4, \hat{y}_4, 0\}; \bar{r}_5\{\hat{x}_5, \hat{y}_5, 0\}. \quad (20)$$

З огляду на те, що крива другого порядку проходить через початок координат ВСК, тобто через точку $\hat{O} = \hat{r}_1$, вважаючи, як і раніше, що $B \neq 0$ і беручи до уваги (19), знайдемо, що коефіцієнт $F = 0$. Тоді загальне рівняння другого ступеня (1) щодо координат \hat{x} і \hat{y} ВСК $\hat{O}\hat{X}\hat{Y}\hat{Z}$ набуде вигляду:

$$A\hat{x}^2 + B\hat{x}\hat{y} + C\hat{y}^2 + D\hat{x} + E\hat{y} = 0. \quad (21)$$

Рівняння (21) кривої другого порядку, що проходить через п'ять точок $\hat{r}_1, \hat{r}_2, \hat{r}_3, \hat{r}_4$ та \hat{r}_5 , може бути задано і в іншому вигляді:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \hat{x}_1^2 & \hat{x}_1\hat{y}_1 & \hat{y}_1^2 & \hat{x}_1 & \hat{y}_1 \\ \hat{x}_2^2 & \hat{x}_2\hat{y}_2 & \hat{y}_2^2 & \hat{x}_2 & \hat{y}_2 \\ \hat{x}_3^2 & \hat{x}_3\hat{y}_3 & \hat{y}_3^2 & \hat{x}_3 & \hat{y}_3 \\ \hat{x}_4^2 & \hat{x}_4\hat{y}_4 & \hat{y}_4^2 & \hat{x}_4 & \hat{y}_4 \\ \hat{x}_5^2 & \hat{x}_5\hat{y}_5 & \hat{y}_5^2 & \hat{x}_5 & \hat{y}_5 \end{vmatrix} = 0. \quad (22)$$

Розкладаючи визначник Δ за елементами першого рядка, запишемо (22) у вигляді:

$$\Delta = M_{11} \hat{x}^2 - M_{12} \hat{x} \hat{y} + M_{13} \hat{y}^2 - M_{14} \hat{x} + M_{15} \hat{y} = 0, \quad (23)$$

де $M_{11}, M_{12}, M_{13}, M_{14}$ та M_{15} – мінори визначника Δ , що відповідають елементам його першого рядка: $\hat{x}^2, \hat{x} \hat{y}, \hat{y}^2, \hat{x}$ та \hat{y} .

Крок 3. Визначити заданий вигляд кривої другого порядку.

Розглянемо загальне рівняння другого ступеня (21), що описує криву другого порядку, яка проходить через початок координат ВСК. Покажемо, насамперед, що за допомогою повороту координатних осей рівняння (21) можна привести до вигляду, що не містить члена з добутком змінних. Повернемо координатні вісі ОСК $\hat{O}\hat{X}\hat{Y}\hat{Z}$ навколо осі $\hat{O}\hat{Z}$ на деякий кут θ , який виберемо потім. Нехай \bar{x}, \bar{y} – координати деякої точки r кривої другого порядку, щодо нової декартової прямокутної СК $\bar{O}\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ із віссю $\bar{O}\bar{Z} \equiv \hat{O}\hat{Z}$, розташованої щодо системи $\hat{O}\hat{X}\hat{Y}\hat{Z}$ таким чином, що кут $\hat{X}\hat{O}\bar{X}$ між віссю $\hat{O}\hat{X}$ і віссю $\hat{O}\bar{X}$ дорівнює θ (рис. 9).

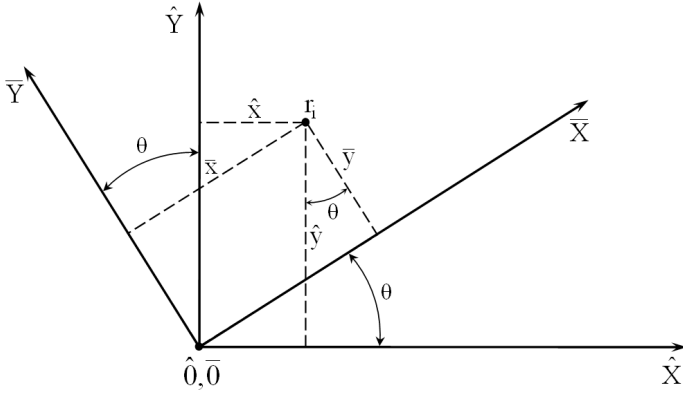


Рис. 9. Поворот координатних осей ВСК на деякий кут θ

При однакових одиницях масштабу на осях (див. рис. 9), координати \bar{x}, \bar{y} пов'язані з координатами \hat{x}, \hat{y} наступними формулами перетворення:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \hat{x} \cos \theta + \hat{y} \sin \theta, & \bar{y} &= -\hat{x} \sin \theta + \hat{y} \cos \theta; \\ \hat{x} &= \bar{x} \cos \theta - \bar{y} \sin \theta, & \hat{y} &= \bar{x} \sin \theta + \bar{y} \cos \theta. \end{aligned} \quad (24)$$

Підставляючи (24) в (21) і виконуючи необхідні перетворення, одержимо загальне рівняння кривої другого порядку в нових координатах \bar{x}, \bar{y} у такому вигляді:

$$\bar{A} \bar{x}^2 + \bar{B} \bar{x} \bar{y} + \bar{C} \bar{y}^2 + \bar{D} \bar{x} + \bar{E} \bar{y} = 0, \quad (25)$$

де:

$$\begin{aligned} \bar{A} &= A \cos^2 \theta + B \sin \theta \cos \theta + C \sin^2 \theta; & \bar{B} &= 2(C - A) \sin \theta \cos \theta + B(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta); \\ \bar{C} &= A \sin^2 \theta - B \sin \theta \cos \theta + C \cos^2 \theta; & \bar{D} &= D \cos \theta + E \sin \theta; & \bar{E} &= -D \sin \theta + E \cos \theta. \end{aligned} \quad (26)$$

Виберемо кут θ так, щоб коефіцієнт \bar{B} обернувся в нуль, тобто щоб виконувалось рівняння

$$(C - A) \sin 2\theta + B \cos 2\theta = 0. \quad (27)$$

Відзначимо, що $\sin 2\theta \neq 0$, тому що в іншому випадку дорівнював би нулю B , що суперечить умові. Після ділення на $\sin 2\theta$ рівняння (27), знайдемо

$$\operatorname{ctg} 2\theta = \frac{A - C}{B}. \quad (28)$$

Із (28) видно, що завжди можна вибрати кут θ так, що після повороту координатних осей ВСК навколо вісі на цей кут, у рівнянні кривої другого порядку (21) зникне член з добутком змінних. Кут θ необхідно вибирати так, щоб $\frac{\pi}{2} > \theta > 0$.

Після обчислення $\operatorname{ctg} 2\theta$, використовуючи формулу $\cos 2\theta = \frac{\operatorname{ctg} 2\theta}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 2\theta}}$, а далі:

$$\sin \theta = \sqrt{\frac{1 - \cos 2\theta}{2}}; \quad \cos \theta = \sqrt{\frac{1 + \cos 2\theta}{2}}, \quad (29)$$

знайдемо $\sin \theta$ і $\cos \theta$, що дозволить обчислити за (26) нові коефіцієнти \bar{A} , \bar{C} , \bar{D} та \bar{E} .

У результаті, загальне рівняння кривої другого порядку (25) набуде вигляду:

$$\bar{A}\bar{x}^2 + \bar{C}\bar{y}^2 + \bar{D}\bar{x} + \bar{E}\bar{y} = 0, \quad (30)$$

де всі коефіцієнти відомі.

Крок 4. Вибрати напрямок руху РО за дугою кривої другого порядку через розрахунок та наступне порівняння центральних фокусних кутів $\theta_{01}, \theta_{02}, \theta_{05}$ дуги кривої.

Крок 5. Одержати рівняння дуги конічного перетину у полярних координатах.

Крок 6. Визначити необхідні співвідношення для розрахунку довжини l_{15} відрізка кривої другого порядку, укладеного між заданими точками r_1 і r_5 .

Крок 7. Визначити поточні координати $(x')_i^*, (y')_i^*$ та $(z')_i^*$ рухомої точки $r_i^* = r^*(t_i)$ кривої другого порядку у ВСК $O'X'Y'Z'$ $\forall i = \overline{0, N}$.

Крок 8. За допомогою формул і матриці \bar{T} зворотного перетворення СК розрахувати x_i^*, y_i^*, z_i^* рухомої точки $r_i^* = r^*(t_i)$ кривої другого порядку в АСК $OXYZ$ $\forall i = \overline{0, N}$.

Таким чином, крім існуючих переваг, що забезпечуються параболічною інтерполяцією, запропонований метод інтерполяції кривими другого порядку, при якому визначення конкретного вигляду кривої відбувається в процесі аналізу коефіцієнтів її аналітичного рівняння, задовольняє ряду додатково висунутих вимог:

- скорочення числа вхідних даних;
- можливість відпрацьовування кривих на площині й у просторі;
- криві, що інтерполюються, можуть бути зміщені й довільно повернені щодо осей координат;
- наявність проміжного контролю відпрацьованої траєкторії у точках, що цікавлять.

Четвертий розділ дисертації присвячено практичним дослідженням методу інтерполяції кривими другого порядку для СПВР, що включає алгоритмізацію та програмну реалізацію методу, яка передбачає додавання до вже існуючого ПЗБ СПВР, засобу тривимірного проектування, інтерполяції та аналізу, здатного функціонувати у розподіленій комп'ютерній мережі та задовольняти основним вимогам, котрі висовуються при розв'язанні траєкторних задач.

Наведений у розд. 2 метод інтерполяції реалізовано у вигляді ПЗ автоматизованого проектування та інтерполяції дуги кола для СПВР (ПЗ «ARC»); розроблений у розд. 3 метод інтерполяції дуги кривої другого порядку – реалізовано у вигляді ПЗ «SOCADI». Усі створені ПЗ повністю пройшли відповідні процедури реєстрації, як об'єкти авторського права, у Державному Департаменті інтелектуальної власності та по кожному отримано свідоцтво про реєстрацію авторських прав.

ПЗ доповнено необхідним сервісним математичним забезпеченням і реалізовано у вигляді інтерактивних ПЗ для ПК, що працюють в діалоговому

режимі. ПЗ розроблено стосовно до реальних задач інтерполяції кривих другого порядку на різних ділянках зони обслуговування СПВР, що працюють у прямокутній СК. Дані ПЗ точно розраховують і наочно відображають у просторі траєкторію руху РО та її проєкції на кожну робочу площину. Інтерфейс ПЗ повністю відповідає сучасним пристроям уведення інформації у СПВР: обвід руху РО відображається за чотирма основними проєкціями, надаючи усі загальноприйняті точки огляду, до яких звикли конструктори і технологи, а елементи керування виконані згідно з діючими стандартами.

Одним з підходів до вирішення поставлених завдань – є використання інтерактивних методів одержання векторної моделі, при яких технолог задає п'ять точок, що належать досліджуваній дузі кривої другого порядку, та ряд інших параметрів, котрі дозволяють керувати процесом інтерполяції одержуваного геометричного обводу, а, отже, і впливати на точність результату.

Апроксимація обводу дугами кривих другого порядку знадобиться у випадку, коли геометрична модель містить велику кількість округлених ділянок. Виникаюча необхідність у такій делінеаризації викликана особливостями технологій (наприклад, різання металу) та проблемами із керуванням рухом інструмента на коротких відрізках, при яких вирізка складних обводів, що інтерполюються тільки відрізками прямих та дугами кіл, призводила до істотного погіршення якості фактичної траєкторії руху, внаслідок великої кількості ділянок розгону-гальмування РО, викликаних декомпозицією профілю на графічні примітиви.

Алгоритм інтерполяції дуги кривої другого порядку (сформований на основі відповідного методу і по суті написаний «поверх» ПЗ «ARC»), однак, з істотно більш гнучкою процедурою аналізу геометрії обводу), зведений до вигляду ПЗ «SOCADI». Скрипти програм написані із використанням компіляції текстового режиму програмної системи MATLAB. Програми повністю готові до використання, вони дозволяють виконувати інтерполяцію дуг кривих другого порядку і практично реалізувати програмне керування рухом за кожною прямокутною координатою переміщення РО СПВР.

За допомогою убудованого в MATLAB редактора графічних інтерфейсів «GUI», була виконана графічна обробка розрахованих результатів роботи ПЗ «ARC» і «SOCADI». При створенні графічних вікон відображення результатів були сформовані (за допомогою внутрішніх функцій «GUI»), вікна уведення початкових даних (рис. 10).

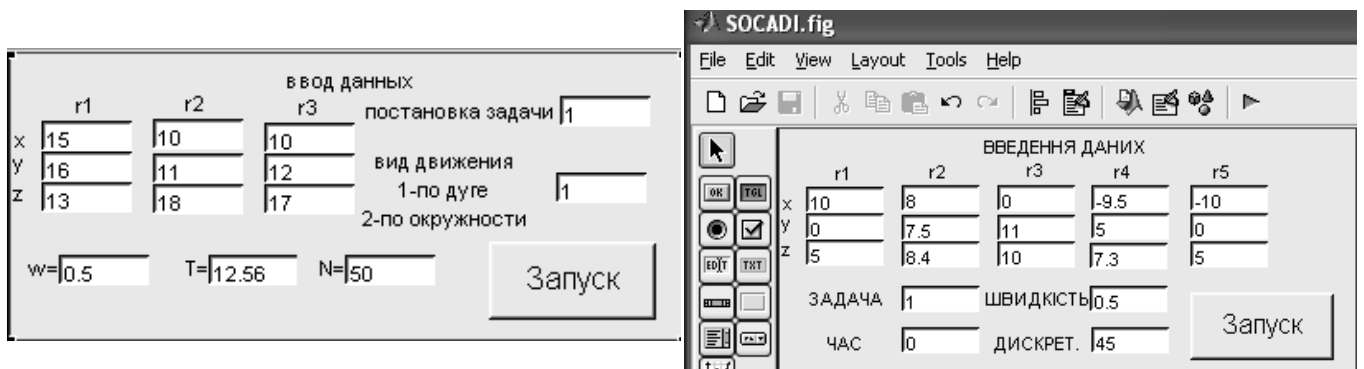


Рис. 10. Сформовані вікна уводу початкових даних ПЗ «ARC» та ПЗ «SOCADI»

Після заповнення усіх необхідних полів уводу технологічних даних, відбувається побудова аксонометричної проекції дуги кривої другого порядку, що інтерполюється, в АСК (для неї сформоване основне вікно); проекцій дуги на три декартових площини та вигляду дуги у ВСК. Наведену структуру інтерфейсу, з усіма необхідними зв'язками між вікнами і командами побудови зображень необхідних проекцій, зведено, відповідно, у файли *Arc.fig* і *Socadi.fig*, що запускаються у режимі командного рядка.

На рис. 11 наведено наочні приклади графічної побудови траєкторії руху РО СПВР у вікні відображення графічних результатів роботи ПЗ «ARC» і ПЗ «SOCADI».

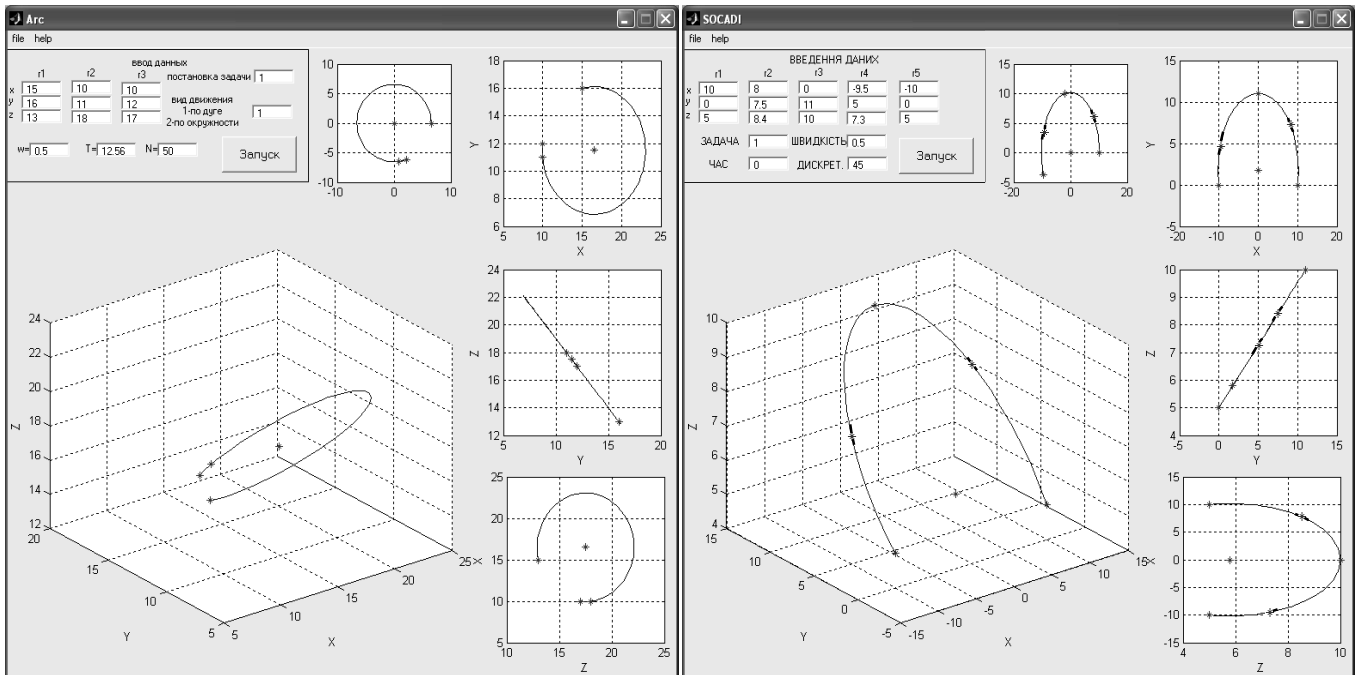


Рис. 11. Наочні приклади побудови траєкторії руху РО СПВР у вікні відображення графічних результатів роботи ПЗ «ARC» та ПЗ «SOCADI»

Слід зазначити, що під час перевірки та у процесі тестування даних програмних продуктів було розраховано й проаналізоване на вірність побудови: більш 80 різноманітних варіантів розташування вихідних точок – для ПЗ «ARC» і більш 240 – для ПЗ «SOCADI».

Таким чином, при вирішенні практичних задач дослідження, були розроблені зручні інтерактивні ПЗ, за допомогою яких СПВР виконуються інтерполяції дуг кривих другого порядку, стосовно до завдань автоматизації проектування формоутворення складних геометричних обводів.

У додатках наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи (додаток А); копії свідоцтв про реєстрацію авторських прав (додаток Б); фрагменти вихідних текстів комп'ютерних програм ПЗ «ARC» (додаток В) та ПЗ «SOCADI» (додаток Г).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання розробки методів та створення моделей інтерполяції тих геометричних обводів, які найбільш

доцільно описати пласкими дугами кривих другого порядку, а також вирішення на цій основі важливої науково-технічної задачі – підвищення точності проектування формоутворення різноманітних профілів, що виконується СПВР.

Проведено дослідження, результати яких дозволяють зробити наступні висновки.

1. Розроблено новий метод інтерполяції конічними перетинами за рахунок однокритеріального аналізу та встановлення конкретного вигляду кривої, що найбільш точно відтворює задану форму оброблюваної ділянки, при використанні якого на 20 – 60% зменшується час опису складних обводів обробки, завдяки скороченню декомпозиції профілю на графічні примітиви. Сформовано проблемно-орієнтовані алгоритми застосування досліджуваного методу інтерполяції; виконано їх програмну реалізацію та обчислювальну оптимізацію.

2. Розроблено математичні моделі аналітичного подання просторового розміщення сформованих обводів за допомогою геометричного й аналітичного апарату опису, що дозволяє, шляхом завдання 5 вихідних точок, підібрати задовольняючу криву та проаналізувати конфігурацію всієї досліджуваної траєкторії із нульовою похибкою апроксимації, у складі допуску, встановленого на неточність обробки всієї деталі.

3. Набув подальшого розвитку метод формування вихідних даних для пристрою керування СПВР, що дозволило скоротити кількість кадрів керуючої програми (кількість яких обумовлюється конкретно заданими технологічними допусками, але мінімум – в 4 рази) та, відповідно, зменшити ймовірності виникнення помилок зчитування із програмоносія.

4. Розроблено інтерактивну графічну систему одержання зображення формоутворення, інтерфейс якої цілком відповідає сучасним пристроям вводу інформації в СПВР. За допомогою цієї системи побудови геометричних моделей обводів, траєкторія руху РО інтерполюється відразу кривою (без наближень), саме це гарантує підвищену точність розрахунків та скорочення термінів проектування. Розроблено інструкції із застосування необхідного математичного і програмного забезпечення, які доповнені коментарями щодо роботи ПЗ.

5. Проведено практичні дослідження, що дозволили апробувати розв'язання широкого спектру задач, пов'язаних зі створенням (за допомогою ПК), проектуванням та інтерполяцією еліптичних, гіперболічних і параболічних профілів і поверхонь різних геометричних обводів, у тому числі тривимірних геометричних моделей площинного типу. Результатом апробації стала можливість 15%-го скорочення терміну технологічної підготовки виробництва через відхід від необхідності виготовлення шаблонів для контролю оснащення, позбавлення від 80% ручної праці при доведенні отриманих форм. Крім того, відзначене поліпшення динамічних характеристик приводів СПВР, внаслідок зменшення ділянок розгону-гальмування на початку і наприкінці кожного кадру керуючої програми, а також підвищення якості поверхні розрізу.

6. Результати дисертаційної роботи впроваджено в цехах із ЧПК-верстатами і промисловими маніпуляторами ТОВ «Люкстройпроект», економічний ефект від впровадження яких підтверджується відповідними актами. Розроблені ПЗ використовуються у ДВЦ «Метрологія» ННЦ «Інститут метрології», у рамках робіт із сертифікації ПЗБ і тестування компонентів СПВР. Також результати роботи

використовуються при викладанні у ВНЗ 3 – 4 рівнів акредитації, зокрема, на факультеті КІУ ХНУРЕ, при проведенні лабораторних, практичних і окремих курсових робіт із дисциплін, що відповідають тематиці дисертаційного дослідження.

7. Дослідження складних геометричних обводів, які утворюють профіль обробки деталі, виявили ряд нових завдань інтерполяції у СПВР, за рахунок виділення властивостей гнучкості кривих, шляхом варіювання параметрів, що цікавлять.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Худяев А.А. Алгоритм формирования траектории движения рабочего органа манипулятора по дуге окружности / А.А. Худяев, А.Е. Чебытько, С.С. Великодний // «Нові рішення в сучасних технологіях» Вісник національного технічного університету “ХПІ”: зб. наук. пр. – №39. – Харків, 2004. – С. 28 – 46.

2. Великодний С.С. Аналіз динамічної точності дволанкового маніпулятора промислового робота / С.С. Великодний // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Вып. 130. – Харьков, 2005. – С. 82 – 85.

3. Великодний С.С. Исследование устойчивости систем автоматического управления промышленными роботами по критерию Михайлова / С.С. Великодний // Науч.-техн. журнал «Прикладная радиоэлектроника». – 2005. – Т. 4, № 4. – С. 462 – 465.

4. Невлюдов І.Ш. Метод інтерполяції дуги кола для систем програмного відтворення рухів / І.Ш. Невлюдов, С.С. Великодний // Науч.-техн. журн. «Радиоэлектроника и информатика». – 2007. – №3. – С. 31 – 37.

5. Невлюдов І.Ш. Алгоритм інтерполяції дуги кола для систем програмного відтворення рухів / І.Ш. Невлюдов, С.С. Великодний // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Вып. 142. – Харьков, 2007. – С. 90 – 95.

6. Невлюдов И.Ш. Обзор методов интерполяции геометрических контуров в составе автоматизированного проектирования сложных обрабатываемых профилей / И.Ш. Невлюдов, С.С. Великодний // Науч.-техн. журн. «Технологии приборостроения». – 2008. – №1. – С. 3 – 9.

7. Невлюдов І.Ш. Створення програмного засобу автоматизованого проектування та інтерполяції дуги кола для систем програмного відтворення рухів / І.Ш. Невлюдов, С.С. Великодний // Наук.-техн. журн. «Радиоэлектронні і комп'ютерні системи». – 2008. – №2. – С. 73 – 79.

8. Невлюдов И.Ш. Метод интерполяции геометрических контуров кривыми второго порядка в составе автоматизированного проектирования сложных профилей обработки / И.Ш. Невлюдов, С.С. Великодний // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Вып. 156. – Харьков, 2009. – С. 268 – 278.

9. Свід. про реєстр. авт. пр. на тв. № 25341 / Програмний засіб автоматизованого проектування та інтерполяції дуги кола для систем програмного відтворення рухів (ПЗ «ARC») / С.С. Великодний (Україна); заявл. у Держ. Деп. інт. власн. 06.05.2008 р. заява № 25792; зареєстр. 15.08.2008 р.

10. Свід. про реєстр. авт. пр. на тв. № 27746 / Програмний засіб автоматизованого проектування та інтерполяції дуги кривої другого порядку для

систем програмного відтворення рухів (ПЗ «SOCADI») / С.С. Великодний (Україна); заявл. у Держ. Деп. інт. власн. 25.11.2009 р. заява № 27815; зареєстр. 20.02.2009 р.

11. Невлюдов И.Ш. Метод интерполяции сложных профилей обработки при помощи кривых второго порядка / И.Ш. Невлюдов, С.С. Великодний // Вісті Академії інженерних наук України. Машинобудування та прогресивні технології: Наук.-техн. та громад. часопис. – Спец. вип. 1(38). – Харьков, 2009. – С. 93 – 98.

12. Худяев А.А. Методические аспекты разработки лабораторной работы по дисциплине «Алгоритмические и программные средства АСУ» для бакалавров инженерно-педагогической специальности 6.010100.29 / А.А. Худяев, С.С. Великодний // XXXVII наук.-практ. конф. „Радіоелектроніка, інформатика і кібернетика”: зб. наук. пр. УПА, 4 – 5 лют. 2004 р. – Т. 4. – Харків, 2004. – С. 60 – 63.

13. Невлюдов И.Ш. Параболическая интерполяция в системах автоматизированной подготовки управляющих программ для УЧПУ / И.Ш. Невлюдов, С.С. Великодний, А.А. Андрусевич // Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития: сб. науч. тр. I Межд. науч. конф., Судак, 30 сент. – 3 окт. 2008 г. – Харьков, 2008. – С. 191 – 194.

14. Худяев О.А. Застосування програмних засобів «IDENTIFICATION» і «ROBOT2»: навч. посіб. / О.А. Худяев, О.О. Прокопенко, С.С. Великодний; Українська інженерно-педагогічна академія. – Харків: УПА, 2006. – 120 с.

15. Великодний С.С. Формирование алгоритма движения рабочего органа манипулятора по заданным траекториям / С.С. Великодний // Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації: тези доп. 2-ї Всеукр. наук.-техніч. конф. молодих вчених і спеціалістів, 21 – 23 квіт. 2004 р. – Кременчук, 2004. – С. 12.

16. Великодний С.С. Синтез алгоритма интерполяции кривыми второго порядка в задачах автоматизированного проектирования / С.С. Великодний // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ'2007: Міжн. наук.-техн. конф., 13 – 15 лист. 2007 р. – Харків, 2007. – С. 298 – 300.

17. Великодний С.С. Обзор существующих методов интерполяции, используемых в системах ЧПУ / С.С. Великодний, В.М. Озерский // ХLI наук.-практ. конф. наук.-пед. працівників, науковців, аспірантів та співробітників УПА: зб. тез доп., 28 – 31 січ. 2008 р. – Ч. 6. – Харків, 2008. – С. 10.

18. Nevlyudov I. Development of an interpolation method for complicated geometric surfaces in problems of an automated designing / I. Nevlyudov, S. Velykodniy // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: proc. of the Int. Conf., Slavsko, 19 – 23 feb. 2008. – Lviv, 2008. – P. 505 – 506.

19. Великодний С.С. Анализ применяемых САПР для создания моделей сложных геометрических поверхностей / С.С. Великодний // Радиоелектроника и молодёжь в XXI веке: матер. XII Межд. молод. форума 1 – 3 апр. 2008 г. – Ч. 2. – Харьков, 2008. – С. 141.

20. Великодний С.С. Створення програмного засобу автоматизованого проектування та інтерполяції / С.С. Великодний // Математическое моделирование и информационные технологии: сб. тез. 8-й Межд. конф., 20 – 21 нояб. 2008 г. – Одеса, 2008. – С. 58.

21. Великодний С.С. Использование визуализатора траекторий в системах ЧПУ WL 4.x / С.С. Великодний // Радиоелектроника и молодёжь в XXI веке: матер. XIII Межд. молод. форума 30 мар. – 1 апр. 2009 г. – Ч. 1. – Харьков, 2009. – С. 122.

АНОТАЦІЯ

Великодний С.С. Моделі та методи інтерполяції складних геометричних обводів для систем автоматизованого проектування формоутворення деталей. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2009 р.

Дисертація присвячена розв'язанню завдання реалізації найвищої точності проектування та наступної обробки складних криволінійних профілів, що найдоцільніше описати кривими другого порядку: еліптичними, гіперболічними та параболічними обводами. Для успішного вирішення цієї задачі, програмне забезпечення сучасних САПР необхідно створювати на підставі ефективних алгоритмів автоматичної інтерполяції, що легко сполучаються із пристроями керування систем програмного відтворення рухів, які, відповідно, реалізують просторовий рух робочих органів за заданими площинними траєкторіями. Це призводить до необхідності розробки нових методів інтерполяції та формування моделей проектування складних геометричних обводів рухів робочих органів, які б забезпечили високу швидкодію та надали простий аналітичний підхід до побудови програмних траєкторій у рамках цих методів.

Ключові слова: інтерполяція, крива другого порядку, площина, обробка, профіль, робочий орган, система координат, програмний засіб, керуюча програма.

АННОТАЦИЯ

Великодний С.С. Модели и методы интерполяции сложных геометрических контуров для систем автоматизированного проектирования формообразования деталей. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – системы автоматизации проектных работ. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2009 г.

Диссертация посвящена решению задания реализации высокой точности проектирования и последующей обработки сложных криволинейных профилей, которые целесообразно описать кривыми второго порядка: эллиптическими, гиперболическими и параболическими контурами. Для успешного решения этой задачи, программное обеспечение современных САПР необходимо создавать на основе эффективных алгоритмов автоматической интерполяции, легко сопрягающихся с устройствами управления систем программного воспроизведения движений (СПВД), которые, соответственно, реализуют пространственное движение рабочих органов по заданным плоскостным траекториям. Это ведёт к необходимости разработки новых методов интерполяции и формирования моделей проектирования сложных геометрических контуров движений рабочих органов, которые бы обеспечили высокое быстродействие и предоставили простой аналитический подход к построению программных траекторий в рамках этих методов.

Разработан новый метод интерполяции коническими пересечениями за счет однокритериального анализа и установления конкретного вида кривой, наиболее точно воспроизводящей заданную форму обрабатываемого участка, при применении которого на 20 – 60% уменьшается время описания сложных контуров обработки, благодаря сокращению декомпозиции профиля на графические примитивы. Сформированы проблемно-ориентированные алгоритмы применения исследуемого метода интерполяции; выполнена их программная реализация и вычислительная оптимизация.

Разработаны математические модели, аналитического представления пространственного размещения исследуемых объектов при помощи геометрического и аналитического аппарата описания, позволяющего, путём задания 5 исходных точек сравнительно легко подобрать удовлетворяющую кривую и анализировать конфигурацию всей исследуемой траектории с нулевой погрешностью аппроксимации, в составе допуска, установленного на неточность обработки всей детали.

Разработана интерактивная графическая система получения и обработки изображения формообразования, интерфейс которой полностью отвечает современным устройствам ввода информации в СПВД. С помощью этой системы построения геометрических моделей контуров траектория движения РО интерполируется сразу кривой (без приближений), что гарантирует повышенную точность расчетов и сокращение сроков проектирования. Разработаны инструкции по применению необходимого математического и программного обеспечения, дополненные комментариями относительно работы программного средства.

Получил дальнейшее развитие метод формирования исходных данных для устройства управления СПВД, что позволило сократить количество кадров управляющей программы (количество которых обусловлено конкретно заданными технологическими допусками, но минимум – в 4 раза) и, соответственно, снизить вероятности возникновения ошибок считывания с программоносителя.

Проведены практические исследования, позволившие апробировать решение широкого спектра задач, связанных с созданием (при помощи ПК), проектированием и интерполяцией эллиптических, гиперболических и параболических профилей и поверхностей различных геометрических контуров, в том числе трёхмерных геометрических моделей плоскостного типа. Результатом апробации стала возможность 15%-го сокращения срока технологической подготовки производства благодаря уходу от необходимости изготовления шаблонов для контроля оснастки, избавления от 80% ручного труда при доводке полученных форм. Кроме того, отмечено улучшение динамических характеристик приводов СПВД, вследствие уменьшения участков разгона-торможения в начале и в конце каждого кадра управляющей программы, а также повышение качества поверхности реза.

Результаты диссертационной работы внедрены в цехах со станками ЧПУ и промышленными манипуляторами ООО «Люксстройпроект», экономический эффект от внедрения которых подтверждается соответствующими актами.

Разработанные ПС используются в ГИЦ «Метрология» ННЦ «Институт метрологии», в рамках работ по сертификации ПО и тестировании компонентов СПВД. Также результаты работы используются при преподавании в вузах 3 – 4 уровней аккредитации, в частности, на факультете компьютерной инженерии и управления ХНУРЭ, при проведении лабораторных, практических и отдельных курсовых работ по дисциплинам, отвечающим тематике диссертационного исследования.

Исследования сложных геометрических контуров, образующих профиль обработки детали, выявили ряд новых задач интерполяции в СПВД, за счёт выделения свойств гибкости кривых, путём варьирования интересующих параметров.

Ключевые слова: интерполяция, кривая второго порядка, плоскость, обработка, профиль, рабочий орган, система координат, программное средство, управляющая программа.

ABSTRACT

Velykodniy S.S. The interpolation models and methods of complicated geometric outlines for automated design systems of form formation details. – Manuscript.

Thesis for candidate of technical sciences degree on the specialty 05.13.12 – computer aided design works systems. – Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2009.

The thesis is devoted to a solution of problem realization of high exactitude projection and consequent handling complicated curvilinear profiles, which are expedient for describing by the second order curves: elliptic, hyperbolic and parabolic outlines. For a successful solution of this task, the software modern CAD/CAM-systems should contain effective automatic interpolation algorithms, whose it is easy integrated with control systems CNC-units, which, accordingly, realize space driving of working organs on the given planar trajectories. It carries on to necessity of development new interpolation methods and shaping projection models an complicated geometric movements of working organs outlines, whose have ensured high speed and have submitted the simple analytical approach to a construction of program trajectories within the these methods framework.

Key words: interpolation, second order curve, plane, handling, profile, working organ, frame, software, control program.

Підписано до друку 05.11.2009 р. Формат 60x84 1/16. Спосіб друку – різнографія.
Умов. друк. арк. 1,25. Облік. вид. арк. 1,0. Тираж 100 прим.
Зам. № Ціна договірна.

ХНУРЕ, 61166, Харків, пр. Леніна, 14

Віддруковано в навчально-науковому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ
61166, м. Харків, пр. Леніна, 14