

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 697.85, 004.4

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-5-15

УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ОБ'ЄКТІВ У ПЛОЩИНІ З ВИКОРИСТАННЯМ СКАНЛАЙН-МЕТОДУ

С. Ю. Плєснецов, К. Д. Вірченко, А. О. Колєсниченко, Ю. О. Плєснецов
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;
вул. Курпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна; e-mail: serhii.pliesnetsov@khpі.edu.ua

Об'єктом дослідження в роботі є сплайн-аналіз сканлайну. Метою роботи є розробка удосконаленого алгоритму сканлайн-пошуку контуру та визначення геометричних параметрів зразків у площині з використанням засобів сплайн-інтерполяції. Наведено огляд ряду існуючих досліджень у сфері програмних рішень для визначення та аналізу контурів на зображеннях. Виявлено тренди розвитку алгоритмічних та нейромережових систем для пошуку контурів об'єктів, проте задача метрологічної оцінки таких об'єктів слабо розвинена і може бути досліджена. Виконано розробку методики пошуку точок на контурі з використанням сплайн-інтерполяції до вектору пікселів сканлайну з виявленням точок контрастного переходу через аналіз точок знакозміни шматкової функції сплайну на модулі функції похідної до функції сплайну з урахуванням контрастної різниці між дотичними точками на досліджуваному зображенні об'єкту контролю або вимірювання. Наведено відповідну візуалізацію для випадку простого сканлайну з математичним тестуванням на базі системи SciLab. На базі методики розроблено алгоритм аналізу сканлайну та розроблено програмний засіб, що реалізує даний алгоритм. Розробку виконано на базі рендеру, що реалізує стандарт OpenGL з використанням елементів бібліотеки Boost для виконання сплайн-інтерполяції, а також GTK для отримання охоплюючого прямокутника мінімальної площі методом обертового супорту. Оцінено достовірність результатів роботи, з результатами, що є прийнятними для інженерного використання програмного засобу за умови коректного налаштування. Тестування програмного засобу виконано на базі сукупності тестових зображень, що включали овальні ідеальні тестові зразки без градієнтних зон переходу та з двійковим кольором, модельні зразки, відрендерені засобами рендеру Cycles у складі Blender 3D, та фотографічні тестові зразки.

Ключові слова: метрологія, вимірювання, аналіз зображення, розробка програмного забезпечення, пошук контуру, сканлайн, сплайн-інтерполяція.

The object of research in the paper is the spline analysis of the scan line. The purpose of the work is the development of an improved algorithm for scanning contours and determination of geometric parameters of samples in the plane using spline interpolation tools. An overview of a number of existing studies in the field of software solutions for the definition and analysis of contours in images is presented. Trends in the development of algorithmic and neural network systems for finding contours of objects have been revealed, but the task of metrological assessment of such objects is poorly developed and can be investigated. The method of finding points on the contour was developed using spline interpolation to the vector of pixels of the scanline with the detection of points of contrast transition through the analysis of the points of change of sign of the piecewise function of the spline on the module of the function of the derivative of the function of the spline, taking into account the contrast difference between the tangent points on the investigated image of the control object or measurement. The appropriate visualization for the case of a simple scanline with mathematical testing based on the SciLab system is given. Based on the methodology, an algorithm for scanline analysis was developed and a software tool was developed that implements this algorithm. The development is based on a renderer that implements the OpenGL standard using elements of the Boost library to perform spline interpolation, as well as GTK to obtain an enclosing rectangle of minimum area by the rotary caliper method. The reliability of the work results was evaluated, with results that are acceptable for engineering use of the software under the condition of correct configuration. Testing of the software tool was performed on the basis of a set of test images, which included oval ideal test samples without gradient transition zones and with binary color, model samples rendered by Cycles rendering tools in Blender 3D, and photographic test samples.

Keywords: metrology, measurement, image analysis, software development, contour search, scanline, spline interpolation.

Вступ

На даний момент системи розпізнавання контурів набувають широкого розповсюдження у всіх сферах життя, в тому числі у метрології. Системи пошуку та аналізу контурів дозволяють розпізнавати, класифікувати, досліджувати об'єкти на зображенні, проводити контроль та визначати їх характеристики.

Системи пошуку контурів можуть базуватись на алгоритмічних та нейронних моделях. У обох підходів є певні недоліки та переваги як з точки зору швидкодії, так і якості, і потрібних обчислювальних потужностей.

Водночас розпізнавання контурів у метрології, особливо українській, залишається відносно слабо розвинутою областю. Відповідно, робота у даному напрямку є актуальною.

Мета роботи – розробити удосконалений алгоритм сканлайн пошуку контуру та визначення геометричних параметрів зразків у площині з використанням засобів сплайн-інтерполяції.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Розпізнавання та уточнення контурів об'єктів на зображеннях є важливою технологією в різних сферах життя та має багато перспектив розвитку. Цей процес базується на методах комп'ютерного зору та штучного інтелекту (ШІ), і його використання постійно розширюється.

Стаття [1] присвячена розробці методу швидкого пошуку цифрових зображень у великих сховищах даних. На основі аналізу існуючих моделей і пошукових сервісів, автори пропонують використовувати спеціальний шаблон зображення, який є інваріантним до різноманітних трансформацій зображення, таких як стиснення, зміна яскравості чи інші ефекти. Створення шаблону для кожного зображення дозволяє значно прискорити процес пошуку і порівняння зображень у сховищах.

Основна увага зосереджується на ефективності методу, зокрема точності та швидкості пошуку. Запропонований алгоритм передбачає побудову шаблону зображення при його першому збереженні, після чого цей шаблон використовується для подальших пошуків. У статті також розглядаються проблеми, пов'язані з дублюванням зображень та їх різними трансформаціями.

Експериментально підтверджено, що метод дозволяє швидко і точно знаходити зображення в сховищах, що містять понад 100 тисяч зображень, з різними класами об'єктів, такими як обличчя, транспортні засоби, будівлі тощо.

Автор статті розповідає про розробку методу швидкого пошуку цифрових зображень у великих сховищах даних. Він пропонує алгоритм, який базується на створенні спеціальних шаблонів для кожного зображення, що дозволяє значно скоротити час пошуку. Метод орієнтований на інваріантність до трансформацій, таких як стиснення або зміна яскравості, що робить його ефективним для великих баз даних, де є ризик дублювання зображень або їх видозмін.

Стаття [2] присвячена дослідженню та застосуванню нейронних мереж для вирішення задач розпізнавання об'єктів у зображеннях. Автори акцентують увагу на важливості використання сучасних нейромережових підходів, які забезпечують високу точність і швидкість при роботі з великими обсягами даних та складними зображеннями.

Основні теми статті включають:

Принципи роботи нейронних мереж – описуються базові архітектури нейронних мереж, що застосовуються для розпізнавання об'єктів, такі як згорткові нейронні мережі (CNN). Пояснюється, як ці моделі використовують різні шари для витягнення характеристик з зображення і як вони навчаються розпізнавати різноманітні об'єкти.

Аналіз точності моделей – автори досліджують показники точності роботи нейронних мереж у задачах розпізнавання об'єктів. Проводяться експерименти на різних наборах даних, які демонструють переваги використання глибоких нейронних мереж для підвищення точності.

Переваги використання нейромережових підходів – у статті підкреслюється, що завдяки можливості навчання на великих наборах даних, нейронні мережі показують чудові результати в задачах класифікації і розпізнавання складних об'єктів, які можуть бути схожими або частково закритими.

Використання у реальних додатках – автори розглядають застосування нейромереж для розпізнавання об'єктів у різних галузях, таких як медицина, автомобільна промисловість, безпека та відеоспостереження. Завдяки використанню глибоких моделей, системи стають більш надійними та автоматизованими.

У роботі [3] виконано дослідження інтеграції машинного навчання (ML) в оптичну метрологію, розкриваючи покращення ефективності та результативності вимірювальних процесів. З акцентом на фазову демодуляцію, розгортання та перетворення фази у висоту, огляд підкреслює, як алгоритми ML трансформували традиційні методи оптичної метрології, пропонуючи покращену швидкість, точність і можливості обробки даних. Підвищення ефективності підкреслюється прогресом у генеруванні даних, інтелектуальному відборі та стратегіях обробки, де алгоритми ML пришвидшили метрологічне оцінювання. Ефективність підвищується в точності вимірювань, завдяки ML, що забезпечує надійні рішення для складних завдань розпізнавання образів і зменшення шуму. Крім того, підкреслюється роль паралельних обчислень з використанням графічних процесорів і програмованих

вентильних матриць, демонструючи їх важливість у підтримці обчислювально інтенсивних алгоритмів ML для обробки в реальному часі. Кульмінацією цього огляду є визначення майбутніх напрямків досліджень, підкреслення потенціалу передових моделей ML і більш широких застосувань в оптичній метрології.

Автори роботи [4] зазначають, що розпізнавання форм є активною темою досліджень у галузі комп'ютерного зору та графічних обчислень. Тим не менш, існуючі методи все ще мають певну низьку точність і ефективність, що значно обмежує їх застосування в системі комп'ютерного зору. У цьому документі досліджується обмеження структури ознак, яке по суті погіршує продуктивність розпізнавання. Крім того, ми пропонуємо швидкий метод розпізнавання форми, заснований на дворівневому обмеженні обмеження контурного кодування (CC2RR), який забезпечує більш ефективну теоретичну підтримку для практичного застосування візуального алгоритму. CC2RR зменшує обмеження, що виконуються від виділення та вираження контурних ознак відповідно. По-перше, для контуру форми обмеження виділення ознак контуру зменшено шляхом перетворення напрямку точок контуру на сегменти контуру; по-друге, для закодованого сегмента контуру обмеження вираження ознаки контуру зменшується; іншими словами, поточний напрямок зводиться до попереднього та наступного напрямків. Керуючись цими ідеями, кодова відстань Хеммінга використовується для узгодження характеристик кодування після подвійного зменшення обмежень, і отримані результати. Експериментальні результати підтверджують, що метод значно покращує продуктивність, яка працює до 500 разів швидше, ніж існуючі методи опису на основі контурів форми, одночасно збільшуючи надійність. Це робить метод корисним у практичній програмній системі.

Робота [5] спрямована на дослідження метрології контурів. У контурній метрології CD-SEM (скануючий електронний мікроскоп критичного розміру) призначає безперервну межу розширеним характеристикам зображення. Межа зазвичай призначається як проста функція інтенсивності сигналу, наприклад, порогом яскравості або градієнтом. Однак околиці різних точок уздовж межі об'єкта можуть значно відрізнятися. Деякі частини кордону можуть мати близькі сусідні об'єкти, тоді як інші є відносно ізольованими. Сусідні елементи можуть перешкоджати виходу вторинних електронів. Таким чином, різна близькість сусідів впливає на виявлену інтенсивність. Різниця інтенсивності, викликана різницею сусідства, може бути неправильно інтерпретована як зміщення контуру, наприклад, коли контур переходить від ізольованого сусідства до щільного. Величина цієї варіації зсуву оцінюється за допомогою зображень, створених JMONSEL, моделюючим методом Монте-Карло SEM вторинних електронних зображень, на основі простих зразків тестових моделей із різними околицями. Подібні структури згодом були виміряні як SEM, так і атомно-силовою мікроскопією (АСМ). Очевидні зрушення (тобто помилки) порядку від 0,5 нм до 1,0 нм для кожного краю спостерігалися як на модельованих, так і на вимірних SEM-зображеннях порівняно з AFM, коли положення країв призначалися за допомогою фіксованого контуру яскравості зображення. Призначення країв за яскравістю відносно локального фону та локальної максимальної яскравості призвело до вимірювань, які були менш чутливими до відмінностей сусідства.

Щодо сплайн-інтерполяції

Сплайн-інтерполяція, подібно до поліноміальної інтерполяції, використовує поліноми низького ступеня в кожному з інтервалів і вибирає поліноміальні фрагменти так, щоб вони гладко підходили

один до одного. Отримана функція називається сплайном (рис. 1) [6,7].

Сплайн має відповідати певним базовим вимогам з такими обмеженнями:

1. Кожен поліном проходить через відповідні кінцеві точки.
2. Перші похідні збігаються у внутрішніх точках.
3. Другі похідні збігаються у внутрішніх точках.
4. Другі похідні звертаються в нуль у кінцевих точках.

В основі даної роботи лежить використання сплайн-інтерполяції для опису сканлайну при пошуку точок контрастного переходу.

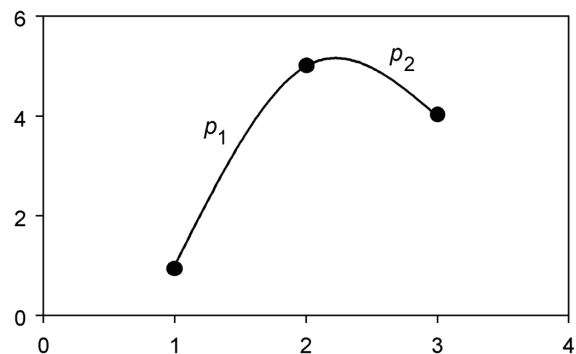


Рисунок 1 – Кубічний сплайн, інтерпольований між точками (1, 1), (2, 5) і (3, 4), будується з двох кубічних поліномів

Теоретична база роботи

В узагальненому вигляді сканлайн є дискретним набором з n точок, кожна з яких має координати x та y :

$$S = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_{n-1} \\ y_0 & y_1 & y_2 & y_3 & \dots & y_{n-1} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Ці точки мають (можуть) знаходитись у залежності як дві множини S_x та S_y , утворюючи функціональну залежність $S_y(S_x)$.

Такі множини, зазвичай, найзручніше описувати з використанням сплайнів [8].

Сплайн-функція, область визначення якої розбита на частини, на кожному з частин функція є деяким поліномом (многочленом). Більш поширеним типом сплайн-інтерполяції є інтерполяція з використанням кубічних сплайнів [9].

Тож, сплайн-функцію $t(x)$ можна представити як суму функцій:

$$t(x) = \sum_{i=0}^{n-1} f_i(x), \quad (2)$$

де $f_i(x)$ – це функції, що у сукупності утворюють сплайн.

Однією з основних умов для коректної побудови кубічного сплайну є рівність значень похідних другого ступеня у кінцевих точках кожного зі шматків сплайну, тобто:

$$f_i''(x) = f_{i+1}''(x). \quad (3)$$

Очевидно, що похідна другого ступеня від кубічної параболи є функцією дотичної до цієї параболи у точці, а співпадіння значень дотичних гарантує виконання умови гладкості сплайну.

У найпростішому випадку, коли сканлайн має бінарну структуру (0, 1), сканлайн опис його матиме вигляд як представлено на рис. 2.

Як можна побачити, сплайн-представлення дає певне уявлення про структуру зображення, але вимагає аналізу істотної кількості екстремальних значень. Цю задачу можна спростити, якщо

використати як основу першу похідну $|t'(x)|$ від знайденого сплайну.

Таким чином, основою для аналізу сканлайну при пошуку точок переходу стає аналіз модуля першої похідної від функції сканлайну.

Програмно-алгоритмічна реалізація роботи

Існує широкий спектр інструментів для виконання сплайн-інтерполяції на базі різних програмних бібліотек та засобів.

Однією з більш поширених бібліотек загального застосування, що розробляється у кон'юнкції зі стандартом C++, є бібліотека Boost [10]. Як зазначають розробники, «ми прагнемо встановити «існуючу практику» та надати довідкові реалізації, щоб бібліотеки Boost були придатними для можливої стандартизації. Починаючи з десяти бібліотек Boost, включених до Технічного звіту бібліотеки (TR1), і продовжуючи з кожним випуском стандарту ISO для C++ з 2011 року, Комітет стандартів C++ продовжує покладатися на Boost як на цінне джерело для доповнень до стандартної бібліотеки C++».

Інструментар для сплайн інтерполяції надають такі програмні комплекси як

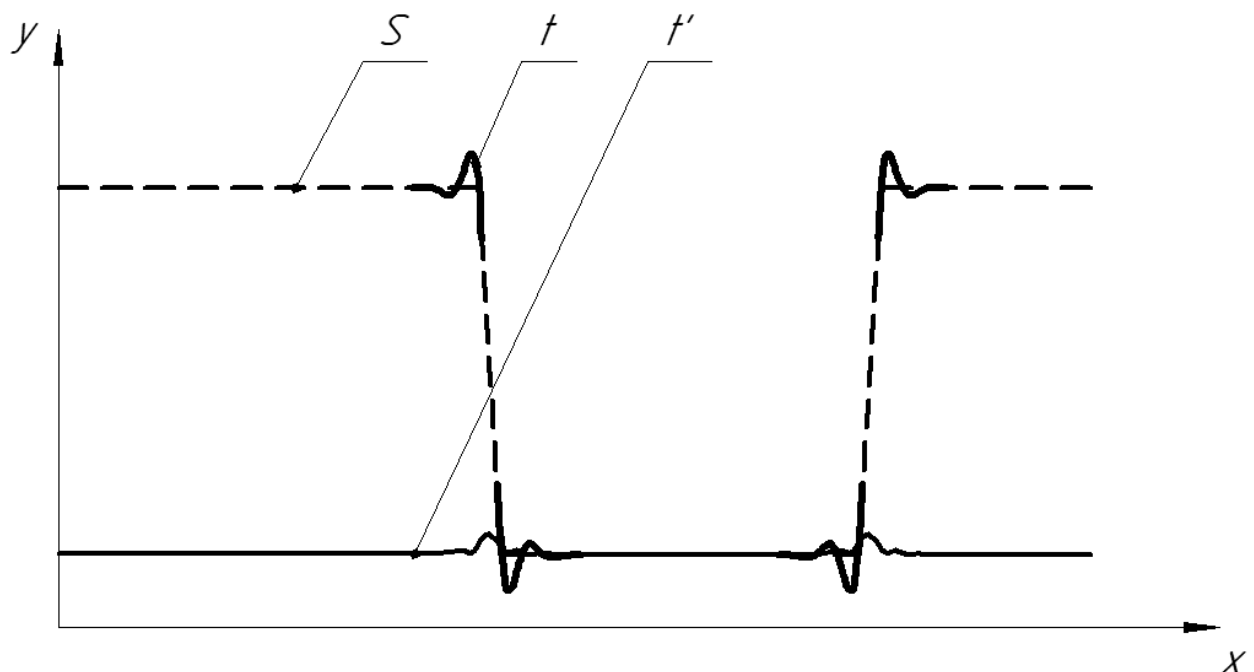


Рисунок 2 – Графічне представлення сканлайну

MathCAD, Matlab та Scilab [11]. Останній було використано при побудові математичного підходу при створенні наведеної у роботі алгоритміки

Клас кубічного В-сплайна, наданий Boost [12], дозволяє швидко й точно інтерполювати функцію, яка відома в рівновіддалених точках. Інтерполяція кубічного В-сплайна чисельно стабільна, оскільки використовує базисні функції з компактною підтримкою, побудовані за допомогою ітераційної згортки. На відміну від традиційної кубічної сплайн-інтерполяції, це погано обумовлено, оскільки глобальна підтримка кубічних поліномів призводить до того, що невеликі зміни далеко від точки оцінки мають великий вплив на обчислене значення.

Як показано у [13], якісне визначення контуру об'єкту з використанням сканлайн-методу є можливим з прийнятною точністю. Проте, в основі методу було закладено «брутфорс»-підхід, що ускладнювало задачу виявлення точок переходу у складних випадках.

В попередніх роботах використано розробку [14]. На базі створеної алгоритмічної бази постає необхідність удосконалення попередньо розроблених алгоритмів з урахуванням відповідної методики.

Розроблений алгоритм, структуру якого наведено на рис. 3, включає наступні етапи:

1) Отримати поточний сканлайн у вигляді набору (вектору) пікселів.

2) Усереднити кольорові канали кожного пікселю та привести до єдиного числового значення.

3) Виконати утворення сканлайну засобами бібліотеки Boost та отримати першу похідну для кожного пікселя.

4) Знайти точки знакозмінності для першої похідної.

5) Відкинути точки знакозмінності, контраст пікселів для яких не перевищує порогове значення.

6) Визначити координати точок з урахуванням масштабних коефіцієнтів.

7) Отримати випуклий охоплюючий контур для отриманого набору точок.

8) Отримати прямокутник із найменшою площею з використанням алгоритму обертальних супортів з бібліотеки GTK.

9) Обчислити значення габаритів отриманого прямокутника.

Розроблений програмний засіб базується на попередніх розробках кафедри КРСКД, показаних вище. Програма включає два основних логічні блоки: рендер та логічний блок.

Логічний блок відповідає за введення, обробку даних, відслідковування обраних користувачем операцій, налаштувань, тощо.

Рендер реалізовано на базі попередніх наробок автора [15], спрямованих на створення функціональної бібліотеки для рендерінгу на базі OpenGL. Рендер надає можливість виводити, масштабувати, переміщувати зображення, відображати точки та лінії заданого кольору, оновлювати дані.

Рендер пов'язаний з логічним модулем. Вікно рендеру використовується для визначення координатного введення даних користувачем.

Окрім вікна рендеру, інтерфейс користувача розробленого програмного засобу включає панель інструментів (рис. 4), що включає кнопку відкриття зображення (1), інструменти налаштування масштабних коефіцієнтів (2), налаштування порогу виявлення контрастних точок (3), кнопку виклика автовимірювання (4) з можливістю використовувати як новий, так і старий алгоритм за відповідним налаштуванням (5). результати вимірювань поміщуються до відповідного журналу (6).

Вихідний код оновленої функції, створеної у відповідності до розробленого алгоритму (рис. 3) наведено на відповідній сторінці GitHub [15].

Тестування розробленого ПЗ виконувалось на базі трьох типів графічних зразків:

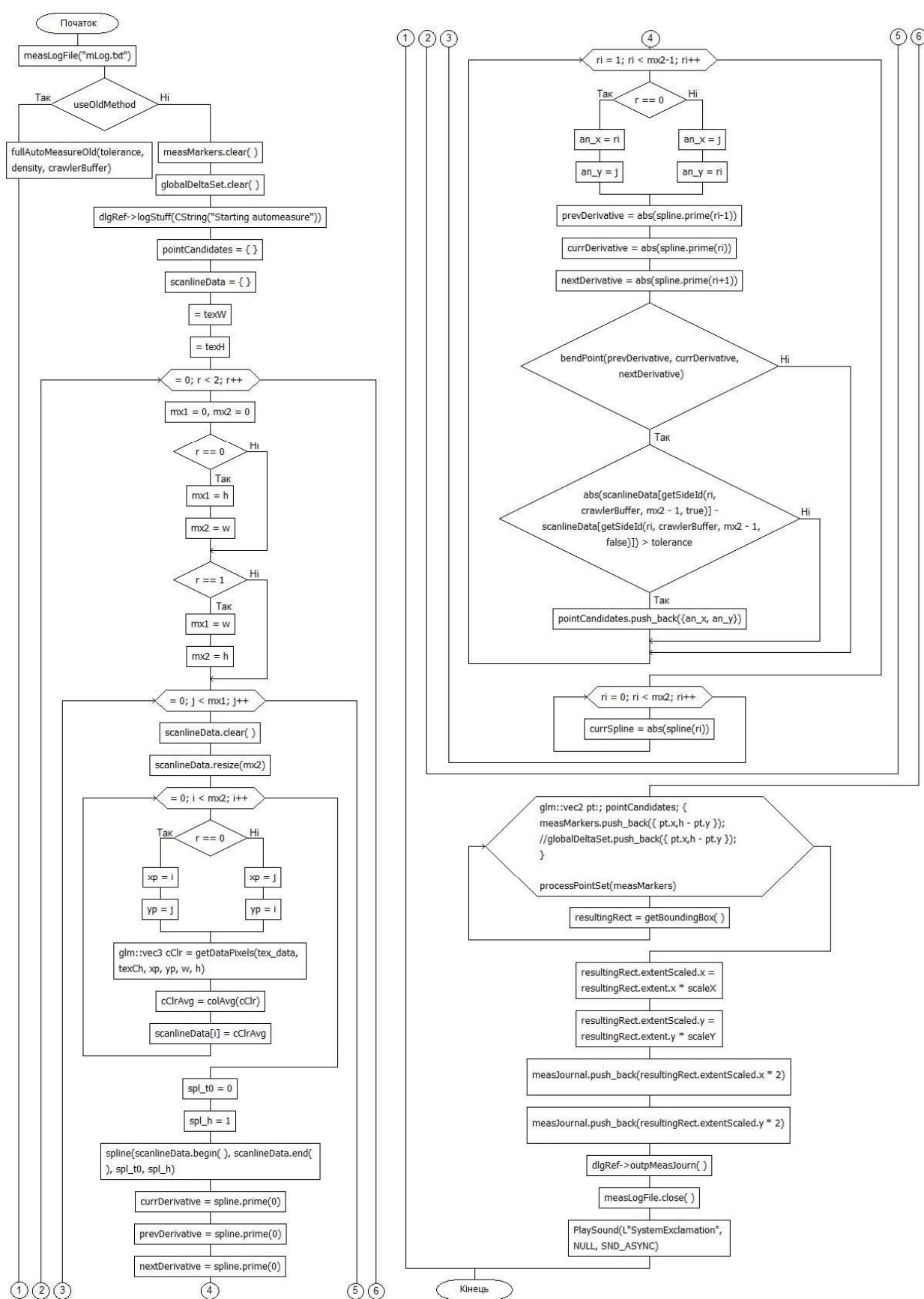


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритму сканлайн пошуку контуру та визначення розмірів об'єкту на базі сплайн-інтерполяції

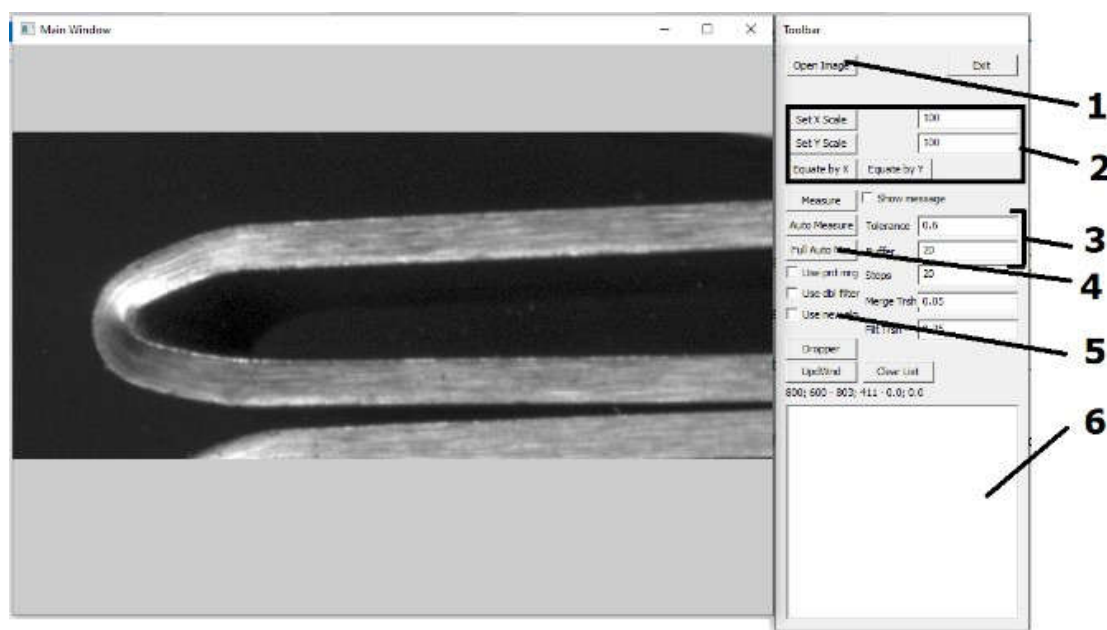


Рисунок 4 – Значущі елементи інтерфейсу користувача розробленого програмного засобу
1 – відкриття зображення, 2 – налаштування масштабних коефіцієнтів, 3 – налаштування порогового значення та ширини буферу, 4 – виклик автовимірювача, 5 – активація оновленого алгоритму автовимірювання, 6 – урнал результатів вимірювання

1) ідеальні зразки, що мають безумовну контрастність на рівні 100%;

2) модельні зразки, рендери яких було отримано з використанням ПЗ Blender 3D [16, 17];

3) фотозразки відомих габаритів.

На рис. 5 – 10 відображено результати тестування алгоритму на зразках наведених типів.

Тестування показало, що оновлений алгоритм, загалом, надає більш високу точність визначення контуру за умови коректного налаштування, ніж брутфорс-версія попередньої реалізації, і спрацьовує коректно у більшій кількості випадків.

При коректному налаштуванні алгоритм надає відповідність номінальному значенню, що відрізняється не більше, ніж на 4 відсотки.

В той же час алгоритм на базі сплайну є більш повільним, іноді до 3-4 разів, виконуючи обробку кадру 1024x1024 протягом 3-4 секунд проти 0,7-1 секунди для брутфорс-алгоритму, хоча на дані результати може додатково впливати щільність сканування та ряд інших параметрів, урахування яких не входило у задачі роботи.

Висновки

1. Проаналізовано існуючі українські та зарубіжні дослідження щодо аналізу та розпізнавання контурів об'єктів на зображеннях. Виявлено тренди розвитку алгоритмічних та нейромережових систем для пошуку контурів об'єктів, проте задача метрологічної оцінки таких об'єктів розвинуна слабо, і тому потребує дослідження.

2. Створено методику аналізу зображення на основі сплайн-інтерполяції сканлайну з аналізом значень перших похідних функцій сплайну у точках знакозміни для виявлення точок контрастного переходу на сканлайні.

3. На основі створеної методики розроблено алгоритм для пошуку точок знакозміни у вибірці перших похідних кускової сплайн-функції для заданого набору пікселів.

4. Реалізовано розроблений алгоритм у вигляді оновленої функції автоматичного вимірювання, отримано приріст точності в середньому на 1% (від 5% до 4%) за рахунок підвищення часу виконання алгоритму. Програмне рішення реалізовано на базі OpenGL-рендеру та бібліотеки сплайн-інтерполяції у складі Boost.

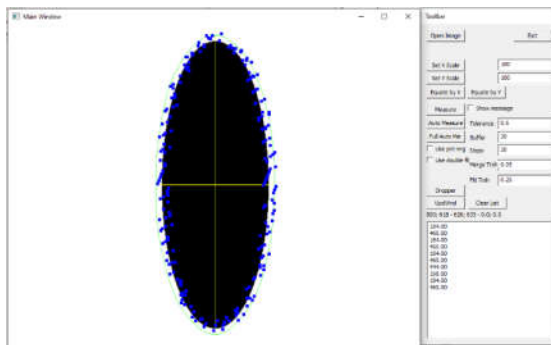


Рисунок 5 — Ідеальний зразок для широкого буфера

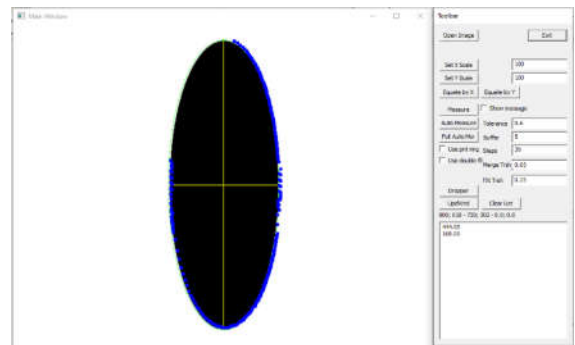


Рисунок 6 — Ідеальний зразок для вузького буфера

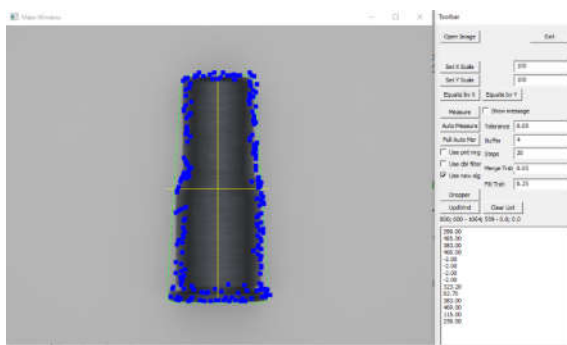


Рисунок 7 — Модельний зразок пуансону для витягування

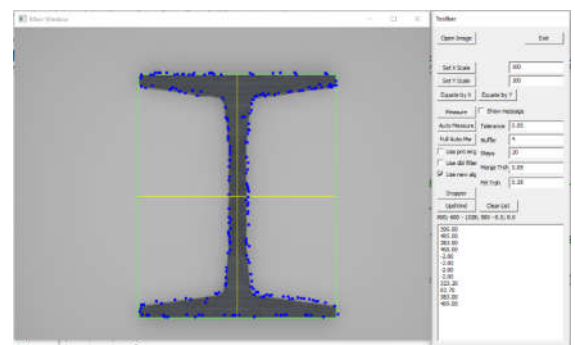


Рисунок 8 — Модельний зразок двотавру

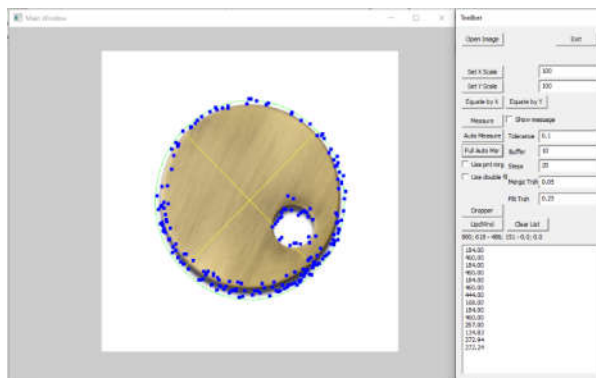


Рисунок 9 — Фізичний зразок берки

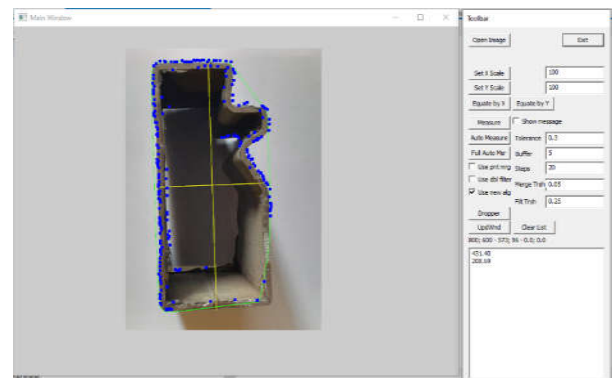


Рисунок 10 — Фізичний зразок профілю опалубки

Список використаних джерел

1. Смеляков К.С., Сандркін Д.Л., Товчиречко Д.О., Вакулік Є.В., Дроб Є.М. Розробка методу швидкого пошуку цифрового зображення у сховищах даних. *Системи обробки інформації*. 2021. С.54-63. DOI: [10.30748/soi.2021.165.07](https://doi.org/10.30748/soi.2021.165.07)
2. Борківський Б., Теслюк В. Використання нейромережових засобів для розпізнавання об'єктів у мобільних

системах з обходом перешкод. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2023. Том 33. №4. С. 84-89. DOI:[10.36930/40330412](https://doi.org/10.36930/40330412)

3. Xue Ruidong, Hooshmand Helia, Isa Mohammed, Piano Samanta, Leach Richard. Applying machine learning to optical metrology: a review. *Measurement Science and Technology*. 2024. Vol. 36. DOI:[10.1088/1361-6501/ad7878](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad7878)
4. Li Zekun, Guo Baolong, Meng Fanjie, Jiang Bingting. Fast shape recognition via a

bi-level restraint reduction of contour coding. *The Visual Computer*. 2023. Vol. 40. P. 2599–2614. DOI:[10.1007/s00371-023-02940-9](https://doi.org/10.1007/s00371-023-02940-9)

5. Villarrubia John, Dixon Ronald, Vladár András. Proximity-associated errors in contour metrology. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2010. 7638. DOI:[10.1117/12.848406](https://doi.org/10.1117/12.848406)

6. Ferguson, J. Multivariable curve interpolation. *Journal of the ACM (JACM)*, 1964. Vol. 11, No. 2. P. 221-228.

7. Cubic spline Interpolation. Geeks for Geeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/cubic-spline-interpolation/>

8. Малачівський П.С., Скопецький В.В. Неперервне й гладке мінімаксне сплайн-наближення. Київ: Наукова думка, 2013. 271 с.

9. Довгий Б.П., Ловеїкін А.В., Вакал Є.С., Вакал Ю.Є. Сплайн-функції та їхнє застосування: Навч. посіб. Київ: ВПЦ "Київський університет", 2017. 120 с.

10. Boost C++ Libraries. URL: <https://www.boost.org/>

11. Scilab. URL: <https://www.scilab.org/>

12. Cubic B-spline interpolation. Boost C++ Libraries Documentation. URL: https://live.boost.org/doc/libs/1_65_0/libs/math/doc/html/math_toolkit/interpolate/cubic_b.html

13. Зайченко М. С., Плєснецов С. Ю. Визначення геометричних параметрів об'єкту контролю сканлайн-методом. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених : зб. тез доп. 17-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, 28-30 листопада 2023 р.* Харків, 2023. С. 46. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/72741>

14. Плєснецов С. Ю. Копач К. Д. Реалізація програмної бібліотеки для шейдерного OpenGL-рендеру в межах розробки вимірювальної системи. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я / Information technologies: science, engineering, technology, education, health : тези доп. 31-ї Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2023, 17-20 травня 2023 р.* Харків : НТУ

"ХПІ", 2023. С. 486. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/71935>

15. farseer3_mfc. GitHub URL: https://github.com/Rastrelly/farseer3_mfc

16. Blender. URL: <https://www.blender.org/>

17. Акулов С.О., Плєснецов С.Ю. Алгоритм автоматичного пошуку геометричних параметрів об'єкту у площині з використанням удосконаленого сканлайн-алгоритму. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2024, 22-25 травня 2024 р.* Харків. – НТУ «ХПІ». С. 496.

References

1. Smeliakov K.S., Sandrkin D.L., Tovchyrechko D.O., Vakulik Ye.V., Drob Ye.M. Rozrobka metodu shvydkoho poshuku tsyfrovoho zobrazhennia u skhovyshchakh danykh. *Systemy obrobky informatsii*. 2021. P.54-63. DOI:[10.30748/soi.2021.165.07](https://doi.org/10.30748/soi.2021.165.07) [in Ukrainian]

2. Borkivskyi B., Tesliuk V. Vykorystannia neiromerezhevykh zasobiv dlia rozpoznavannia ob'ektiv u mobilnykh systemakh z obkhodom pereshkod. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2023. Vol. 33. No 4. P. 84-89. DOI:[10.36930/40330412](https://doi.org/10.36930/40330412)[in Ukrainian]

3. Xue Ruidong, Hooshmand Helia, Isa Mohammed, Piano Samanta, Leach Richard. Applying machine learning to optical metrology: a review. *Measurement Science and Technology*. 2024. Vol. 36. DOI:[10.1088/1361-6501/ad7878](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad7878)

4. Li Zekun, Guo Baolong, Meng Fanjie, Jiang Bingting. Fast shape recognition via a bi-level restraint reduction of contour coding. *The Visual Computer*. 2023. Vol. 40. P. 2599–2614. DOI:[10.1007/s00371-023-02940-9](https://doi.org/10.1007/s00371-023-02940-9)

5. Villarrubia John, Dixon Ronald, Vladár András. Proximity-associated errors in contour metrology. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2010. 7638. DOI:[10.1117/12.848406](https://doi.org/10.1117/12.848406)

6. Ferguson, J. Multivariable curve interpolation. *Journal of the ACM (JACM)*, 1964. Vol. 11, No. 2. P. 221-228.
7. Cubic spline Interpolation. Geeks for Geeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/cubic-spline-interpolation/>
8. Malachivskyi P.S., Skopetskyi V.V. Neperervne y hladke minimaksne splain-nablyzhennia. Kyiv: Naukova dumka, 2013. 271 p. [in Ukrainian]
9. Dovhyi B.P., Loveikin A. V., Vakal Ye. S., Vakal Yu.Ie. Splain-funktsii ta yikhnie zastosuvannia. Kyiv: VPTs "Kyivskyi universytet", 2017. 120 p. [in Ukrainian]
10. Boost C++ Libraries. URL: <https://www.boost.org/>
11. Scilab. URL: <https://www.scilab.org/>
12. Cubic B-spline interpolation. Boost C++ Libraries Documentation. URL: https://live.boost.org/doc/libs/1_65_0/libs/math/doc/html/math_toolkit/interpolate/cubic_b.html
13. Zaichenko M. S., Pliesnetsov S. Yu. Vyznachennia heometrychnykh parametriv ob'ektu kontroliu skanlain-metodom. *Teoretychni ta praktychni doslidzhennia molodykh vchenykh : zb. tez dop. 17-yi Mizhnar. nauk.-prakt. konf. mahistrantiv ta aspirantiv, 28-30 lystopada 2023 r.* Kharkiv, 2023. P. 46. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/72741> [in Ukrainian]
14. Pliesnetsov S. Yu. Kopach K. D. Realizatsiia prohramnoi biblioteki dlia sheidernoho OpenGL-renderu v mezhakh rozrobky vymiriuvalnoi systemy. *Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia / Information technologies: science, engineering, technology, education, health : tezy dop. 31-yi Mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD-2023, 17-20.05.2023.* Kharkiv : NTU "KhPI", 2023. P. 486. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/71935> [in Ukrainian]
15. farseer3_mfc. GitHub URL: https://github.com/Rastrelly/farseer3_mfc
16. Blender. URL: <https://www.blender.org/>
17. Akulov S.O., Pliesnetsov S.Yu. Alhorytm avtomatychnoho poshuku heometrychnykh parametriv ob'ektu u ploshchyni z vykorystanniam udoskonalenoho skanlain-alhorytmu. *Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dopovidei XXXII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2024, 22-25.05.2024.* Kharkiv: NTU «KhPI». P. 496. [in Ukrainian]

IMPROVEMENT OF THE ALGORITHM OF GEOMETRIC PARAMETER DEFINITION IN PLANE USING SCANLINE METHOD

S. Yu. Pliesnetsov, K. D. Virchenko,
A. O. Koliesnychenko, Yu. O. Pliesnetsov

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute";
2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine;
e-mail: serhii.pliesnetsov@khp.edu.ua