

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет “Львівська політехніка”

**МЕДВЕДЄВ ДМИТРО ГЕННАДІЙОВИЧ**

УДК 004:51+004.93

**АВТОМАТИЗОВАНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МОРФОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ЗОБРАЖЕНЬ ОБ’ЄКТІВ З РОЗМИТИМИ КРАЯМИ**

05.13.23 – Системи та засоби штучного інтелекту

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

Львів– 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Криворізькому педагогічному інституті ДВНЗ «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Шелевицький Ігор Володимирович**  
Криворізький педагогічний інститут  
ДВНЗ «Криворізький національний університет»,  
Міністерство освіти і науки України,  
завідувач кафедри інформатики та прикладної  
математики

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент  
**Литвиненко Володимир Іванович**,  
Херсонський національний технічний університет,  
Міністерство освіти і науки України,  
завідувач кафедри інформатики і комп'ютерних  
технологій

доктор технічних наук, професор  
**Шумейко Олександр Олексійович**,  
Дніпродзержинський державний технічний університет,  
Міністерство освіти і науки України,  
завідувач кафедри програмного забезпечення систем

Захист відбудеться «25» грудня 2014 р. о 16.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.14 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Степана Бандери, 28а, ауд. 807, V навч. корпус.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «24» листопада 2014 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
к.т.н., доцент

А.С. Батюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність теми.

Інтенсивний розвиток засобів отримання й передачі цифрових зображень створює проблему обробки величезних обсягів зображень. Так розшифровано й описано лише 25 тис. цифрових зображень високої роздільної здатності Марса з супутника Mars Reconnaissance. Майже 4 млн. зображень Марса викладено на ресурсах Planetfour.org для розпізнавання й оконтурювання вітрових плям волонтерами.

Величезну кількість зображень отримують в геології, мінералогії, біології, металургії, медицині, метеорології, екології тощо.

Важливим джерелом інформації на зображеннях є не тільки наявність чи кількість певних об'єктів, але і їх морфологія. Наприклад, морфологія зерен мінералів дозволяє визначити умови формування, спільність походження. Морфологія імунних клітин – еозинофілів – показує стан імунної системи. Однак визначення морфологічних показників – трудомісткий процес, що потребує оконтурювання. Ця задача значно ускладнюється для мікрооб'єктів, які за своєю природою або через особливості реєстрації не мають чітких контурів. Об'єкти мають розмиті контури через дифузну природу (дим, забруднення атмосферними викидами), через «рваний», фрактальний характер країв (крони дерев, межі великих гранульованих лімфоцитів), через розфокусованість зображення.

Найбільш відомим й загальноприйнятим методом є метод активних контурів. Його практичний варіант змійка (snake) розроблено в 1988 році. Функція, що моделює контур змінюється, намагаючись досягти мінімуму власної енергії (гладкості контуру) та невідповідності контуру (функція зображення).

Метод потребує початкової ініціалізації (як правило 3-5 точок) і в процесі ітераційної побудови розраховує похідні та градієнти зображення. Загальна ідея знаходить втілення у багатьох варіантах методу, що відрізняються способами розрахунку градієнтів, похідних, методами оптимізації та видом параметричної кривої контуру. Різноманітність зумовлена намаганням досягнути найбільшої придатності для конкретних задач, умов і об'єктів.

Інший підхід до оконтурювання пов'язаний із цифровою фільтрацією. Виділення контурів близьке до виділення височастотної складової зображення. Цифрові фільтри виділення контурів реалізовано як дискретні диференційні оператори 3x3 або 5x5 пікселів. Найбільш відомі оператори Робертса, Собеля, Прюїтт. Фільтрація зображення цими операторами дозволяє отримати контури зображення в усьому полі обробки. Однак за цим зображенням важко визначати морфологічні показники окремих об'єктів.

Задача оконтурювання значно ускладнюється, якщо контур об'єкта розмитий або недостатньо гладкий. Це призводить до посилення впливу шумів, поганої збіжності ітераційного процесу, неточного відтворення контурів. Різні автори, залежно від конкретних задач, вирішують цю задачу по-різному. Наприклад, ведеться пошук «ушкоджених» фрагментів й окремо налаштовуються на такі фрагменти. В Hybrid Method розроблена технологія

оконтурювання, де виділяються й усуваються з побудови контуру екстремальні точки.

Методи обробки мікробіологічних об'єктів розробляються в Донецькому національному технічному університеті (Коков А. А.), в Закарпатському державному університеті (Буряк А. А.), Івано-Франківському національному технічному університеті (Бедзір А. О.).

Однак такі алгоритми потребують додаткових параметрів та їх точного налаштування, часто за активної участі оператора.

Отже, існує важлива науково-технічна задача автоматизації оконтурювання об'єктів з розмитими краями за їх цифровими зображеннями для визначення морфологічних параметрів та класифікації.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основні дослідження з теми дисертаційної роботи викладені в межах науково-дослідних робіт ДВНЗ «Криворізький національний університет» за темами: № 30/40-928-12 “Розроблення прототипу міської інформаційної системи «Первинна медична допомога» МІС ПМД” (номер державної реєстрації 0112U003966); №78/1/40-939-12 “Розроблення функції автоматизації прийому пацієнтів міської інформаційної системи первинна медична допомога МІС ПМД” (номер державної реєстрації 0113U003749).

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи – створення інформаційної технології автоматизованого визначення морфологічних параметрів зображень об'єктів з розмитими краями.

Задачі дослідження:

1) проаналізувати існуючі методи та алгоритми оконтурювання зображень, моделювання та морфологічної параметризації контурів та можливість їх застосування для об'єктів з розмитими краями;

2) розробити метод оконтурювання та морфологічної параметризації об'єктів з розмитими краями за їх цифровим зображенням;

3) побудувати сплайн-моделі контурів, алгоритми та програми ідентифікації, моделювання об'єктів з розмитими краями за кольоровим цифровим зображенням;

4) виконати налаштування та перевірку розробленого методу на реальних цифрових зображеннях різних типів;

5) розробити інформаційну технологію визначення морфологічних параметрів контурів для їх класифікації;

6) оцінити часові витрати, достовірність, об'єктивність та точність класифікації об'єктів з розмитими краями.

*Об'єкт дослідження* – процеси обробки цифрових зображень об'єктів з розмитими краями.

*Предмет дослідження* – інформаційна технологія автоматизованого оконтурювання об'єктів з розмитими краями на цифрових зображеннях.

*Методи дослідження* – методи цифрової обробки зображень, методи сплайн-апроксимації, багатовимірної оптимізації, метод найменших квадратів, дискримінантний аналіз, системний аналіз.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що:

### **Вперше розроблено**

1) метод ітераційного уточнення грубо визначених розмитих контурів об'єктів за допомогою кубічного ермітового сплайна шляхом оптимізації розміщення вузлів та їх ітеративного додавання, що дозволяє уникнути апріорного задання параметрів гладкості сплайна й керуватись лише заданою точністю;

2) систему морфологічних відносних показників, що ґрунтуються на сплайн-моделі замкнутого контуру об'єкта й дозволяють виконати класифікацію об'єктів методами дискримінантного аналізу.

### **Вдосконалено:**

формули кубічного ермітового сплайна для замкнутого контуру об'єкта, що враховано в структурі матриці планування методу найменших квадратів, який застосовується при наближенні контуру до грубо визначених точок.

### **Отримали подальший розвиток:**

інформаційна технологія оконтурювання для випадку об'єктів з розмитими контурами, що поєднує методи цифрової фільтрації неоднозначних точок контуру з ітеративною апроксимацією сплайном, що дозволяє автоматизувати визначення морфологічних параметрів без тонкого настроювання параметрів методу, керуючись лише необхідною точністю

### **Практичне значення одержаних результатів:**

1) використання розробленого алгоритму параметризації дозволяє автоматизувати процес визначення відносних морфологічних показників об'єктів з розмитими краями, що усунуло з процесу суб'єктивність оператора та суттєво скоротило час обробки зображень й вимоги до якості зображень (достатньо мікроскопа Konus Academy #5304 з об'єктивом x100);

2) використання запропонованої інформаційної технології дозволяє виконувати класифікацію об'єктів за відносними морфологічними параметрами. Зокрема отримано дискримінантну формулу для класифікації імунного стану людини за навчальною вибіркою із 110 еозинофілів. Ретроспективна класифікація вибірки виявила 7,3% віднесення норми до патології та 12,6% патології до норми;

3) реалізовано інформаційну технологію в інформаційній системі у середовищі MatLab та у вигляді Web-ресурсу [isop.krpd.edu.ua](http://isop.krpd.edu.ua), створеного на мові Python.

Отримані результати дозволяють вирішувати важливу практичну задачу обробки цифрових зображень – оконтурювання об'єктів з розмитими контурами та розрахунку їх морфологічних параметрів, що знайшла застосування у мінераграфії, металографії, медичних дослідженнях з оперативного визначення імунного статусу людини з мінімальними фінансовими та часовими затратами.

### **Отримані в дисертаційній роботі результати впроваджено:**

1) на кафедрі педіатрії та клінічної лабораторної діагностики факультету післядипломної освіти Дніпропетровської державної медичної академії при дослідженнях імунного статусу новонароджених;

2) в ВАТ «КОНСТАР» для дослідження поверхонь металевих деталей (тріщин), а також структури матеріалу за кількісними характеристиками;

3) в навчальний процес на кафедрі інформатики та прикладної математики Криворізького педагогічного інституту ДВНЗ «Криворізький національний університет» при вивченні курсів “Розпізнавання зображень” та “Цифрова обробка сигналів”.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є самостійно виконаним науковим дослідженням. У роботах, виконаних у співавторстві, здобувачеві належить: [1] – метод та алгоритм оконтурювання, [7] – розробка системи морфологічних відносних показників, що ґрунтуються на сплайн-моделі замкнутого контуру об’єкта й дозволяють виконати класифікацію об’єктів методами дискримінантного аналізу, [8] – розробка інформаційної технології визначення морфологічних параметрів еозинофілів. У наукових працях, виконаних одноосібно, здобувачем представлено такі наукові результати: [2] – розробка інформаційної системи визначення морфологічних параметрів еозинофілів, [3] – розробка технології класифікації еозинофілів на основі сплайн-параметризації, [4] – метод виділення контурів об’єктів з розмитими краями, [5] – метод ітераційного уточнення грубо визначених розмитих контурів об’єктів за допомогою кубічного ермітового сплайна шляхом оптимізації розміщення вузлів, [6, 11, 13, 14] – параметризація об’єкта, [9, 10, 12, 15] – алгоритм оконтурювання об’єктів.

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень доповідалися на таких конференціях:

1) Сучасні проблеми моделювання складних економічних систем // II Всеукраїнська науково-практична конференція. – Кривий Ріг, КЕІ ДВНЗ “КНЕУ” ім. В. Гетьмана, 2010;

2) Комп’ютерні науки та інженерія //IV міжнародна конференція молодих вчених, 25-27 листопада 2010, Львівська політехніка, Львів;

3) АВІА-2011 //X міжнародна наук.-техн. конф., 19-21 квітня 2011., НАУ, Київ;

4) Обчислювальний інтелект // I міжнародна наук.-техн. конф., 10-13 травня 2011., ЧДТУ, Черкаси;

5) Обробка сигналів і негауссівських процесів // III міжнародна наук.-техн. конф., 24-27 травня 2011., ЧДТУ, Черкаси;

6) Питання оптимізації обчислень // міжнародна молодіжна математична школа., 22-29 вересня 2011., Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова, Київ;

7) Статистичні методи обробки сигналів і даних // Міжнародна наукова конференція; м. Київ, 16-17 жовтня 2013р., Національний авіаційний університет, 2013;

**Публікації.** Результати досліджень опубліковано у 15 наукових роботах, з них 6 статей у фахових виданнях України, з них одноосібних 3, 2 публікації у наукових періодичних виданнях інших держав та 7 публікацій за матеріалами наукових конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури, що містить 118 найменувань, 2 додатків, 90 ілюстрацій, 2 таблиці. Загальний обсяг роботи складає 138 сторінок, у тому числі 126 сторінок основного тексту.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** сформульовано проблему дослідження, обґрунтовано її актуальність, визначено ціль роботи і коло вирішуваних задач, вказано її практичну значимість та наукову новизну.

У **першому розділі** дисертаційної роботи містяться загальні відомості про основні задачі та технології оконтурювання зображень, інформаційні технології, засоби та алгоритми оконтурювання об'єктів з розмитими краями, застосування сплайнів в задачах оконтурювання.

Інтенсивний розвиток засобів отримання й передачі цифрових зображень створює проблему обробки величезних обсягів зображень. Величезну кількість зображень отримують в геології, мінералогії, біології, металургії, медицині, метеорології, екології тощо.

Важливим джерелом інформації на зображеннях є не тільки наявність чи кількість певних об'єктів, але і їх морфологія. Наприклад, морфологія зерен мінералів дозволяє визначити умови формування, спільність походження. Морфологія імунних клітин – еозинофілів – показує стан імунної системи. Однак визначення морфологічних показників – трудомісткий процес, що потребує оконтурювання. Ця задача значно ускладнюється для мікрооб'єктів, які за своєю природою або через особливості реєстрації не мають чітких контурів. Об'єкти мають розмиті контури через дифузну природу (дим, забруднення атмосферними викидами), через «рваний», фрактальний характер країв (крони дерев), через розфокусованість зображення (межі великих гранульованих лімфоцитів).

Як найбільш показовий приклад практичної потреби в методі автоматизованого оконтурювання розглянемо розроблений на кафедрі педіатрії Дніпропетровської медичної академії метод прогнозування імунного статусу людини за морфологічними параметрами таких елементів крові як еозинофіли, що відрізняється від інших методів оперативністю та низькою ціною.

Однак, метод передбачає вимірювання таких кількісних параметрів еозинофілів як площа, довжина контуру. Враховуючи мікроскопічні розміри контуру, труднощі візуального визначення контуру, суб'єктивні помилки оператора без автоматизації розпізнавання та параметризації еозинофілів застосувати на практиці ці результати неможливо.

Для уточнення грубо виділеного контуру відомими методами (оператором Собеля з попередньою фільтрацією зображення) необхідно побудувати сплайн. Особливість даного сплайна в тому, що він є замкнутим, і класичні методи побудови сплайн-функцій не підходять до вирішення даної проблеми.

Виконаний аналіз методів, алгоритмів та інформаційних систем розпізнавання, параметризації та класифікації об'єктів на цифровому зображенні показав відсутність прийнятних спеціалізованих засобів для роботи з морфологією еозинофілів. Серед методів оконтурювання вартими уваги є метод активних контурів та метод змійки. Метод активних контурів ап'юрі вважає, що функція контуру має мінімальну енергію й виходячи з цього здійснюються моделювання. Однак, у багатьох випадках про мінімізацію енергії не можна стверджувати в силу двох обставин. По-перше, об'єкти часто не мають чіткого контуру. По-друге, для об'єктів не завжди характерні округлі форми, що зумовлені мінімумом енергії контуру. Намагання врахувати відхилення від округлих форм потребує уведення вагових коефіцієнтів до моделі, котрі задаються досить довільно оператором, що перешкоджає автоматичній побудові моделі.

Метод «змійки» спирається на геометричну модель грубого оконтурювання оператором. Експоненційна сплайн-модель контуру знаходиться всередині описаного випуклого полігону й визначається положенням його вершин. Такий підхід працює у випадку чітко окресленого контуру каплеподібної форми.

Таким чином, існуючі методи оконтурювання використовують моделі та методи їх побудови, часто не адекватні природі об'єктів з розмитими краями.

Аналіз існуючих програмно-апаратних рішень у сфері морфологічного аналізу мікрооб'єктів показує, що вони мають високу вартість (за рахунок високих вимог до оптичних систем) та загальне призначення, не враховують специфіки об'єктів з розмитими краями (ОРК) та не включають визначення необхідних параметрів.

Таким чином ставиться задача розробки спеціалізованих методів та алгоритмів, які зможуть вирішувати задачу оконтурювання об'єктів з розмитими краями за їх цифровим зображенням невисокої якості, на основі моделі визначити їх морфологічні параметри з точністю, достатньою для їх класифікації. На основі розроблених спеціалізованих методів, алгоритмів, слід розробити інформаційну технологію оконтурювання та параметризації ОРК.

У **другому розділі** міститься сплайн-модель контуру ОРК: вибір представлення контурних даних, алгоритм побудови замкнутого ермітового кубічного сплайна за допомогою методу найменших квадратів.

Контур переважної частини об'єктів є замкнутою кривою на площині. Представлення функції контуру в декартовій системі координат можливе у векторному вигляді та параметричній формі. Векторна форма не може бути використана для замкнутої лінії згідно означення функції. Параметричне представлення дає таку важливу перевагу, що дозволяє вивчати неявні функції в тих випадках, коли їх приведення до явного виду інакше як через параметри, дуже складно.

Але представлення замкнутої функції в параметричній формі (рисунок 1) має ряд недоліків. По-перше, що вважати параметром функції? Можна пронумерувати кожену точку, і в якості параметра використати її номер. Але виникає питання як саме надавати номер точці растрового зображення? Крім



того, як розташовувати вузли сплайна (в однакових значеннях  $t$  або незалежно)? Оскільки маємо дві функції  $S_x(t)$  та  $S_y(t)$ , то кількість розрахунків збільшується вдвічі, також удвічі зростає число параметрів, при цьому точність може суттєво знизитись.

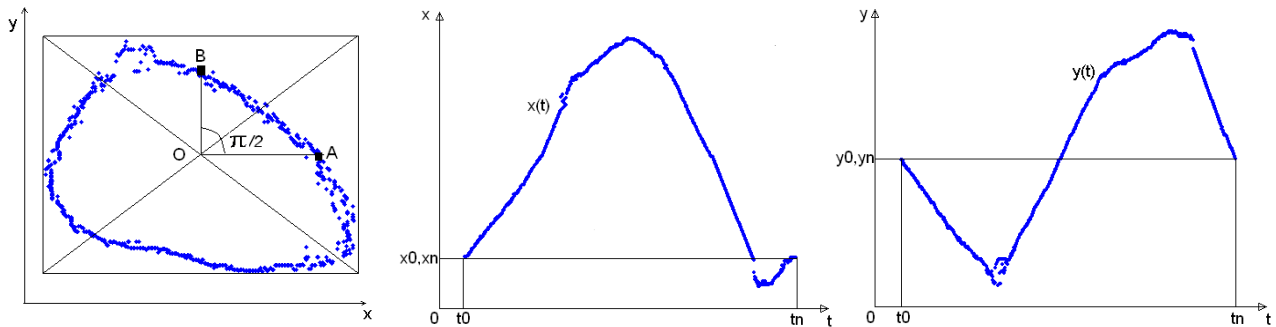


Рисунок 1 – Контур в декартовому та параметричному представленні

Тому було обрано перевести координати точок з декартової до полярної системи координат.

Для уточнення грубо виділеного контуру треба побудувати сплайн-модель. Особливість даного сплайна в тому, що він є замкнутий. В такому сплайні кількість вузлів дорівнює кількості фрагментів (рисунок 2).

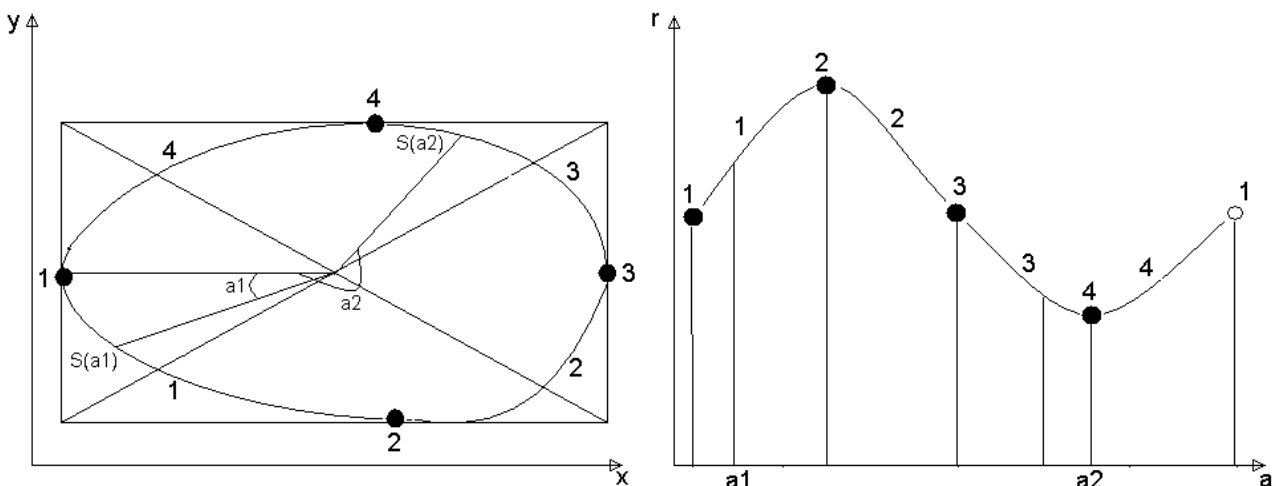


Рисунок 2 – Схематичне зображення замкнутого сплайна в декартовій та полярній системах координат

Особливістю періодичного сплайна є те, що перед першим фрагментом знаходиться останній, а за останнім фрагментом іде перший. Для обчислень базисних функцій ермітового сплайна використовуються наступні формули:

$$X_0(x) = -p_1 p_4 b, \quad X_1(x) = p_1 c - p_2 d + b, \quad X_2(x) = -p_4 c - p_3 d + a, \quad X_3(x) = -p_3 p_2 d,$$

$$a = (x - x_j) / h_j, \quad b = 1 - a, \quad c = ab^2, \quad d = a^2 b,$$

$$p_1 = \frac{h_j}{h_{j-1}}, \quad p_2 = \frac{h_j}{h_{j+1} + h_j}, \quad p_3 = \frac{h_j}{h_{j+1}}, \quad p_4 = \frac{h_j}{h_{j-1} + h_j}, \quad (1)$$

$$h_{j-1} = x_j - x_{j-1}, \quad h_j = x_{j+1} - x_j, \quad h_{j+1} = x_{j+2} - x_{j+1}.$$

Замкнутість контуру сплайна враховується наступним чином:

для першого ( $j = 1$ ):  $h_{j-1} = x_R - x_{R-1}$ ;

для останнього ( $j = R$ ):  $h_j = x_1 - x_0, \quad h_{j+1} = x_2 - x_1$ ;

для передостаннього ( $j = R - 1$ ):  $h_{j+1} = x_1 - x_0$ ,

де  $R$  – кількість фрагментів сплайну,  
 $j$  – номер поточного фрагмента.

В загальному вигляді, для сплайна, який складається з  $R$  фрагментів, маємо вираз:

$$S(x) = \sum_{j=0}^R f(x_j) \hat{X}_j(x), \quad (2)$$

де  $\hat{X}_j(x)$  локальна базисна сплайн-функція, що складається з чотирьох фрагментів:

$$\hat{X}_j(x) = \begin{cases} X_{0,j-1}(x), & x \in [x_{j-1}, x_j), \\ X_{1,j}(x), & x \in [x_j, x_{j+1}), \\ X_{2,j+1}(x), & x \in [x_{j+1}, x_{j+2}), \\ X_{3,j+2}(x), & x \in [x_{j+2}, x_{j+3}), \\ 0, & x \notin [x_{j-1}, x_{j+3}). \end{cases} \quad (3)$$

Значення сплайна в довільній точці, що належить  $j$ -му фрагменту дорівнює

$$S(x) = f(x_{j-1})X_{0,j-1}(x) + f(x_j)X_{1,j}(x) + f(x_{j+1})X_{2,j+1}(x) + f(x_{j+2})X_{3,j+2}(x). \quad (4)$$

Для замкнутого сплайна цей вираз однаковий для всіх фрагментів.

Апроксимація виконується за методом найменших квадратів (МНК).

Необхідно за множиною точок  $y_i, a_i, i = \overline{1, N}$ , визначити істинне значення контуру  $f(a_i)$  за умови адитивної похибки з нульовим математичним сподіванням  $y_i = f_i + \varepsilon_i, M[\varepsilon_i] = 0$ . Похибку вважаємо некорельованою та розподіленою за нормальним законом з дисперсією  $D[\varepsilon] = \sigma^2$ . Тобто, треба знайти такі значення вектора  $A = \{a_j\}$ , при яких досягається мінімум

$$d = \sum_{i=1}^N (y_i - S(a_i, A))^2 \rightarrow \min_A. \quad (5)$$

Розв'язком є  $A = (P^T P)^{-1} (P^T Y)$ . Тобто, у загальному вигляді МНК із моделлю сплайном не відрізняється від аналогічних рівнянь для алгебраїчних поліномів.

Особливістю сплайн-моделі контуру є його замкнутість. Тобто, початок і кінець сплайна є умовними, оскільки кінцевий вузол одночасно є і першим. Тому матриця планування для замкнутого сплайна матиме блочно-діагональну форму з додатковими блоками праворуч-вгорі та ліворуч-вниз (рисунок 3).

Для побудови матриці планування  $P$  використовуються формули (1). Для кожної  $i$ -ї точки обчислюються значення функцій  $X_0(x_i), X_1(x_i), X_2(x_i), X_3(x_i)$ . В матриці планування вони знаходяться на  $i$ -му рядку. Для кожного  $j$ -го фрагмента із загальної кількості фрагментів  $R$ , крім  $j = 1, R - 1, R$ , значення функцій  $X_0(x_i), X_1(x_i), X_2(x_i), X_3(x_i)$  знаходяться у стовбцях з номерами  $j - 1, j, j + 1, j + 2$  відповідно. Для першого фрагмента ( $j = 1$ ) значення функції  $X_0(x_i)$

записується в стовбець  $R$ , оскільки в якості нульового фрагмента використовується останній. Значення  $X_1(x_i)$ ,  $X_2(x_i)$ ,  $X_3(x_i)$  записуються у стовбці 1, 2, 3 відповідно. Для передостаннього фрагмента ( $j = R - 1$ ) значення  $X_3(x_i)$  заноситься до 1-го стовбця, так як далі за останнім фрагментом вважається перший. Значення  $X_0(x_i)$ ,  $X_1(x_i)$ ,  $X_2(x_i)$  записуються у стовбці  $R - 2$ ,  $R - 1$ ,  $R$  відповідно.

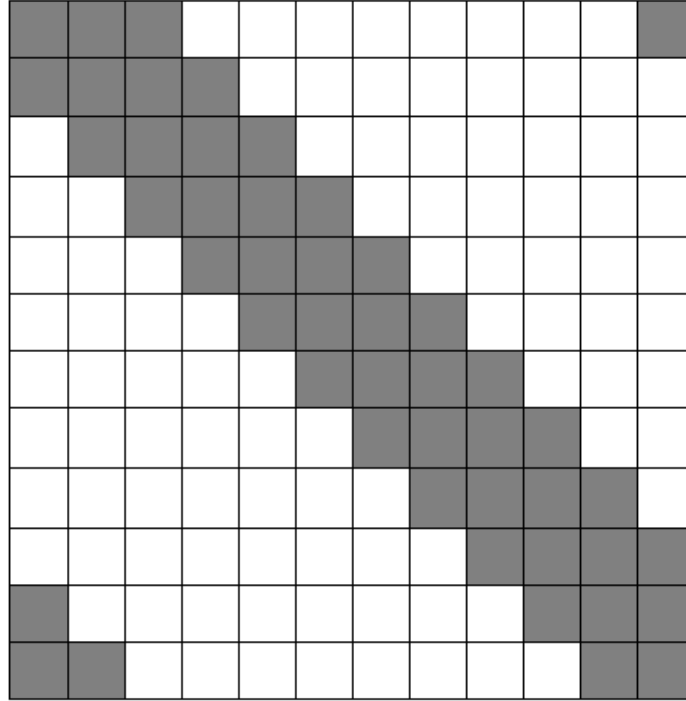


Рисунок 3 – Схема розташування блоків матриці планування.

З тієї ж причини для останнього фрагмента ( $j = R$ ) значення  $X_3(x_i)$  заноситься до 2-го стовбця,  $X_2(x_i)$  заноситься до 1-го стовбця. Значення  $X_0(x_i)$ ,  $X_1(x_i)$ , записуються у стовбці  $R - 1$ ,  $R$  відповідно.

У **третьому розділі** містяться: метод пошуку ОРК на цифровому зображенні, алгоритм грубого виділення контуру, метод оптимізації сплайн-контуру, параметризація за сплайн-моделлю контуру.

Як типовий ОРК розглянемо цифрове зображення еозинофіла.

Для найбільш типових лабораторних мікроскопів збільшення, при якому розглядають препарат, складає 400-1000 разів. В роботі використовувався оптичний мікроскоп Konus Academy #5304 з об'єктивом  $\times 100$ . Для фотографування зображень використовувалась цифрова камера-окуляр DCM510. Оптична система камери дає збільшення в 5 разів. Отже, загальне збільшення на цифровому фото складає 500 разів. Для визначення фактичних розмірів пікселів цифрового зображення проводилось калібрування по об'єктмікрометру. Встановлено, що розмір пікселя зображення становить  $0,04826 \pm 0,00049$  мкм.

Розглянемо типові цифрові знімки еозинофілів (рисунок 4).

Для подальшої обробки, зображення переводиться з формату BMP в YUV, оскільки для фільтрації та оконтурювання найбільш інформативною є яскравість зображення. За допомогою одномірної медіанної фільтрації з зображення видаляється частина шуму. За допомогою модифікованого

оператора Собеля виділяються контури на зображенні. Модифікація заключається в збереженні складових  $U$  та  $V$  без змін, а оператор застосовується до яскравості. Це дозволяє виділити контур еозинофіла серед контурів інших кров'яних тілець (еозинофіл став білим, а весь останній фон – жовтим). Далі за допомогою розроблено алгоритму, що базується на стратегії перебору, визначаємо межі білого тіла – точки контуру еозинофіла та описаний навколо нього прямокутник. Далі координати точок контуру переводяться в полярну систему координат, центром якої є точка перетину діагоналей знайденого прямокутника.

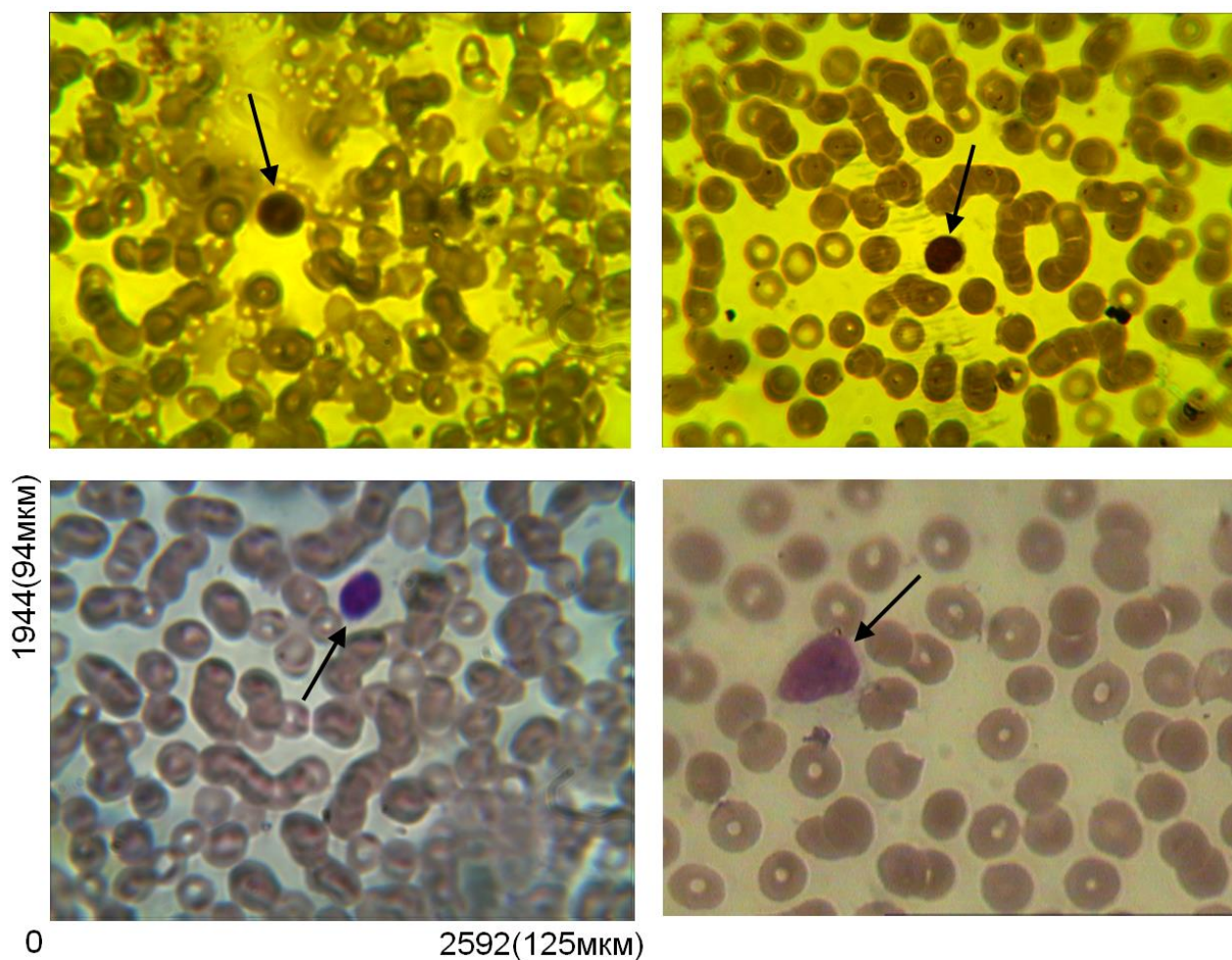


Рисунок 4 – Оригінальне зображення еозинофілів

Гладкість та точність наближення сплайн-контур не явно залежить від кількості вузлів сплайна. Для досягнення наближення сплайном до  $\sigma^2 < 9$  розроблено метод оптимізації кількості вузлів та їх розміщення. На початковій стадії сплайн будується на чотирьох фрагментах з чотирма вузлами. Перший вузол знаходиться в першій точці сплайну. Інші три – на рівних відстанях один від одного. Уточнення положення вузлів сплайна виконується наступним чином. Відстань між сусідніми вузлами ділиться на п'ять частин. Кожен вузол рухається в кожен з них. Якщо середньоквадратичне відхилення (СКВ) сплайн-контур після тимчасового руху вузла зменшилась, то від тепер вузол знаходиться в цій новій точці. Якщо після оптимізації розміщення вузлів не вдається досягнути необхідної точності наближення, збільшуємо число

фрагментів сплайна (додаємо ще один вузол). В середину фрагменту з найбільшим відхиленням додається новий вузол. Далі знов оптимізація розміщення вузлів. В середньому сплайн будується на 10-12 вузлах. Результат оптимізації показано на рисунку 5.

Для параметризації еозинофіла необхідно визначити такі його морфологічні параметри, а саме:

1. форма клітини (кругла, овальна, неправильна),
2. індекс видовженості клітини (відношення великого до малого діаметрів клітини),
3. площа,
4. довжина контуру.

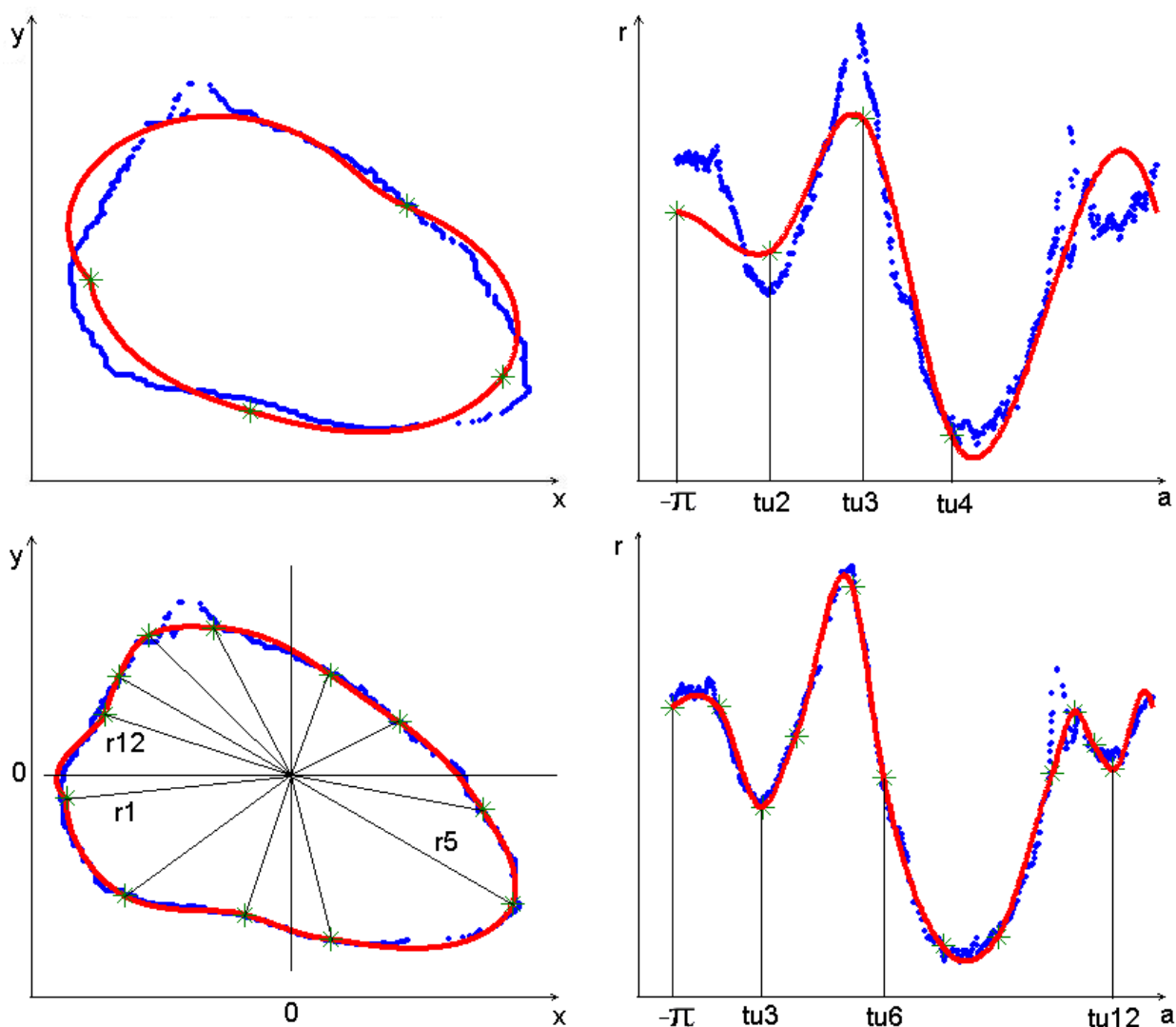


Рисунок 5 – Результати оптимізації сплайн-контур.

Великим діаметром еозинофіла вважатимемо найдовший серед відрізків, кінці якого належать контуру досліджуваного тіла. Малим діаметром, за аналогією з еліпсом, буде найдовший відрізок, серед перпендикулярних до великого діаметра. Індекс видовженості клітини визначається відношенням великого діаметра до малого. Якщо індекс видовженості належить проміжку (1, 1.1) і довжина контуру еозинофіла приблизно дорівнює  $\pi d_v$ , де  $d_v$  – великий

діаметр, то форма є круглою. Якщо діаметри точкою перетину діляться навпіл, то форма є овальною. Форма є неправильною у всіх останніх випадках.

Для визначення площі та периметра, треба представити сплайн у вигляді кубічного полінома на фрагменті. Тоді площа та периметр визначаються аналітично за наступними формулами:

$$S = \sum_{r=1}^R \int_{\alpha_r}^{\alpha_{r+1}} S_r(\alpha) d\alpha, \quad (6)$$

$$l = \int_m^n \sqrt{r^2 + (r')^2} dx = \sum_{r=1}^R \int_{\alpha_r}^{\alpha_{r+1}} \sqrt{(S_r(\alpha))^2 + (S_r'(\alpha))^2} d\alpha, \quad (7)$$

де  $S$  – площа,  $l$  – периметр,  $r$  – кількість вузлів сплайна,  $\alpha$  – полярний кут,  $S_r$  – кубічний поліном сплайна на  $r$ -му фрагменті.

У **четвертому розділі** міститься опис інформаційної технології визначення морфологічних параметрів, її архітектура, підсистема дискримінантного аналізу для класифікації еозинофілів.

Інформаційна технологія визначення морфологічних параметрів еозинофілів в широкому сенсі вирішує важливе практичне завдання дослідження імунного статусу пацієнта за допомогою еозинофілів. Розглянемо інформаційну технологію для дослідження еозинофілів в широкому сенсі з боку користувача (рисунок 6).

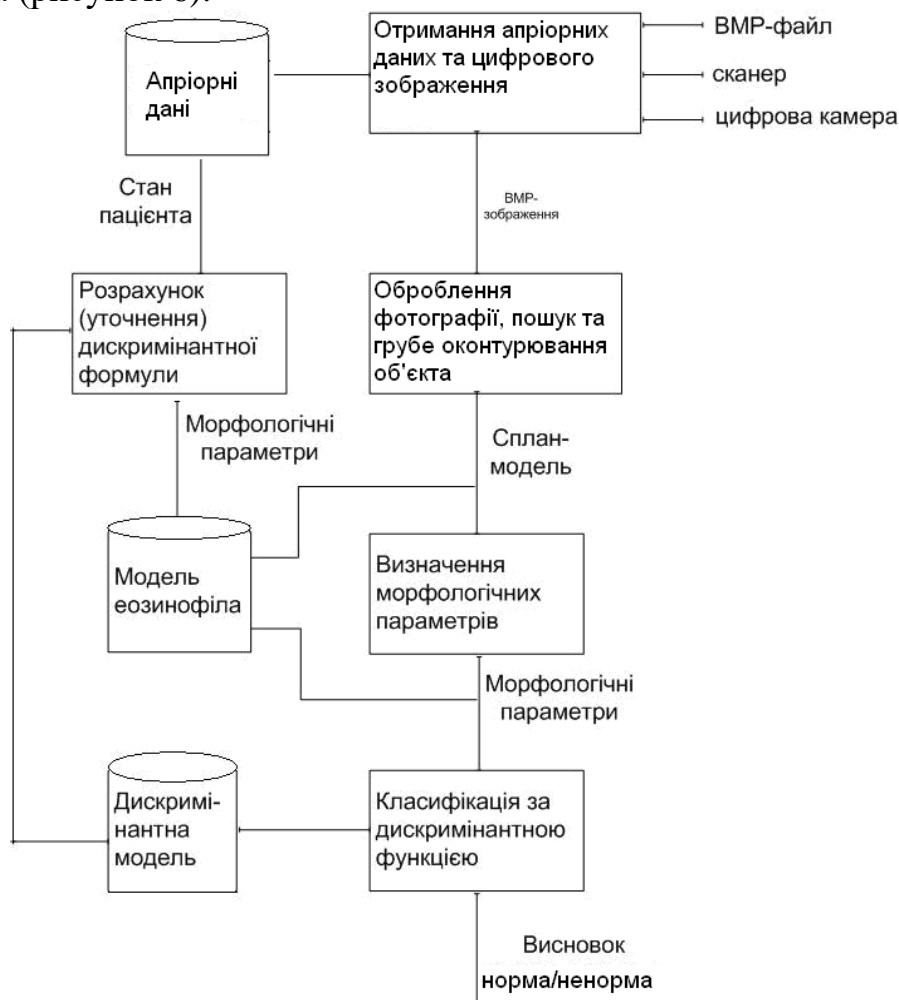


Рисунок 6 – Складові інформаційної технології в прикладній задачі

Вхідною інформацією є цифрове зображення мазка крові. На виході маємо висновок про належність об'єкта до норми чи патології. Іншими вихідними даними є коефіцієнти дискримінантної функції.

Інформаційна технологія визначення морфологічних параметрів ОРК є чітко вираженою послідовністю окремих технологічних фаз перетворення інформації, що переводять вхідну інформацію у вихідну (рисунок 7).

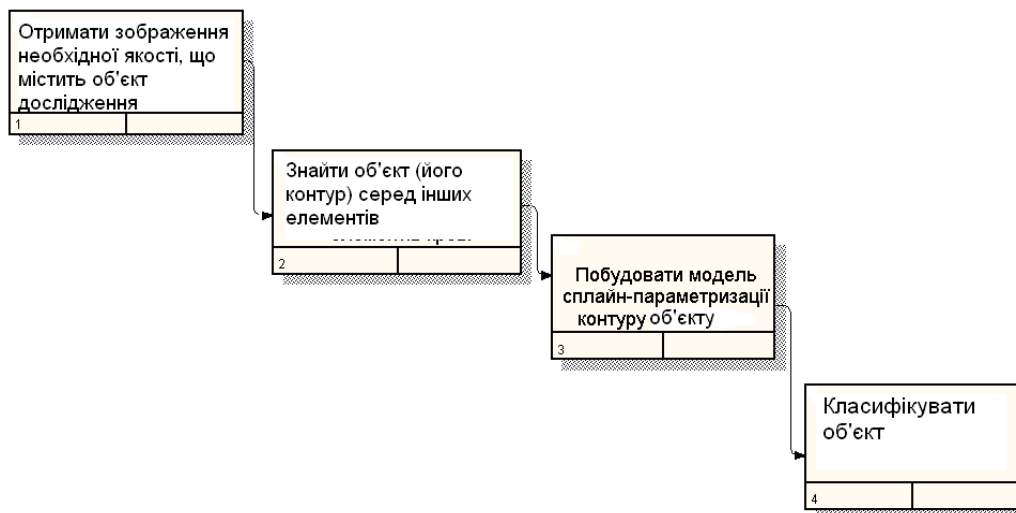


Рисунок 7 – Етапи інформаційної технології (в стандарті IDEF3)

Запропонована інформаційна система визначення морфологічних параметрів об'єктів з розмитими краями (ІСВМПОРК) є автоматизованою ІС. Пошук еозинофіла на зображенні, його оконтурювання, параметризація та оцінка статусу відбувається інформаційною системою автоматично. Проте приблизно у 15–20% випадків оператор має вказати на об'єкт. Людина отримує зображення клітини за допомогою мікроскопа та спеціалізованої камери і приймає кінцеве рішення щодо стану імунної системи. Структура ІСВМПОРК показана на рисунку 8.

Вхід до інформаційної системи може здійснити кожен зареєстрований адміністратором користувач. Пріоритети користувачів, а відповідно й їх можливості, різні й поділяються на: рядового користувач (може лише дізнатися статус об'єкта за зображенням); фахівець (додатково має функцію формування навчальної бази); експерт (менеджер системи, експерт з предметної області, обізнаний з деталями роботи ІСВМПОРК й методами класифікації); адміністратор (фахівець у галузі ІТ, що забезпечує надійність та безпечність системи).

ІСВМПОРК вирішує наступні задачі:

1. Отримання цифрового зображення об'єктів. Зображення можна отримати:

- а) безпосередньо з підготовленого зразка з допомогою мікроскопа та цифрової камери із загальним збільшенням до 500 разів;
- б) отримати безпосередньо цифрове зображення дистанційно.

2. Введення бази даних об'єктів, що поділяється на діагностичну та навчальну. Діагностична база дозволяє ідентифікувати зображення об'єкта певного характеру. Навчальна база додатково містить інформацію про істотні класифікаційні ознаки й необхідна для формування навчальних вибірок.

3. Оконтурування та сплайн-параметризації об'єктів за зображенням й збереження цієї інформації.
4. Розрахунку дискримінантної функції для навчальних вибірок.
5. Класифікація об'єктів, що ґрунтується на параметризації та дискримінантному аналізі.
6. Адміністрування системи.



Рисунок 8 – Функціональна схема ІСВМПОК

Класифікація об'єктів виконується дискримінантним аналізом. Її завдання полягає в тому, щоб за морфологічними ознаками (параметрами) віднести деякий зразок до одного з двох класів: норма або ні.

Дискримінантна функція має наступний вигляд:

$$Y(x) = \sum_{i=1}^p \beta_i x_i, \quad (8)$$

де  $\beta_i$  – коефіцієнти дискримінантної функції, що треба знайти,  $x_i$  – параметри об'єкта.

Дана задача розв'язується в припущенні багатовимірного нормального розподілу з невідомими статистичними параметрами розподілів.

Хоча для ОРК було визначено 5 параметрів, використати їх напряму для дискримінантного аналізу не вдається. Форма є дискретним значенням (круг, овал, неправильна) і не має явної числової характеристики. До того ж значення площі, периметра та довжин діаметрів мають суттєву різницю.

Тому для виконання дискримінантного аналізу було використано відносні показники.



В якості першого відносного показника було взято відношення великого діаметра до малого діаметра. Також взято відношення площі ОРК до площі круга з такою самою довжиною контуру. І відношення довжини контуру до довжини кола з такою самою площею. Тобто були взяті наступні відносні показники:

$$x_1 = \frac{d_v}{d_m}, \quad x_2 = \frac{S}{l^2 / 4\pi}, \quad x_3 = \frac{l}{2\sqrt{\pi S}},$$

де  $d_v$  – великий діаметр,

$d_m$  – малий діаметр,

$S$  – площа,

$l$  – довжина контуру.

Для розрахунку використано навчальну вибірку із  $n = 110$  зразків, з них  $n_1 = 72$ ,  $n_2 = 38$ .

Ймовірність помилкової класифікації визначається наступним чином. Якщо  $m_1$  – число спостережень з  $W_1$  віднесених до  $W_2$ , і  $m_2$  – число спостережень з  $W_2$  класифікованих в  $W_1$ , то  $P(2|1) = m_1/n_1$  і  $P(1|2) = m_2/n_2$ .

За даними ретроспективного аналізу було отримано  $P(2|1) = 0,073$ , а  $P(1|2) = 0,126$ . Тобто ймовірність віднести норму до ненорми приблизно дорівнює 7,3%, а ненорму як норму – 12,6%.

Результат оконтурювання об'єктів в мінераграфії, металографії та дослідженні імунного статусу показано на рисунку 9.

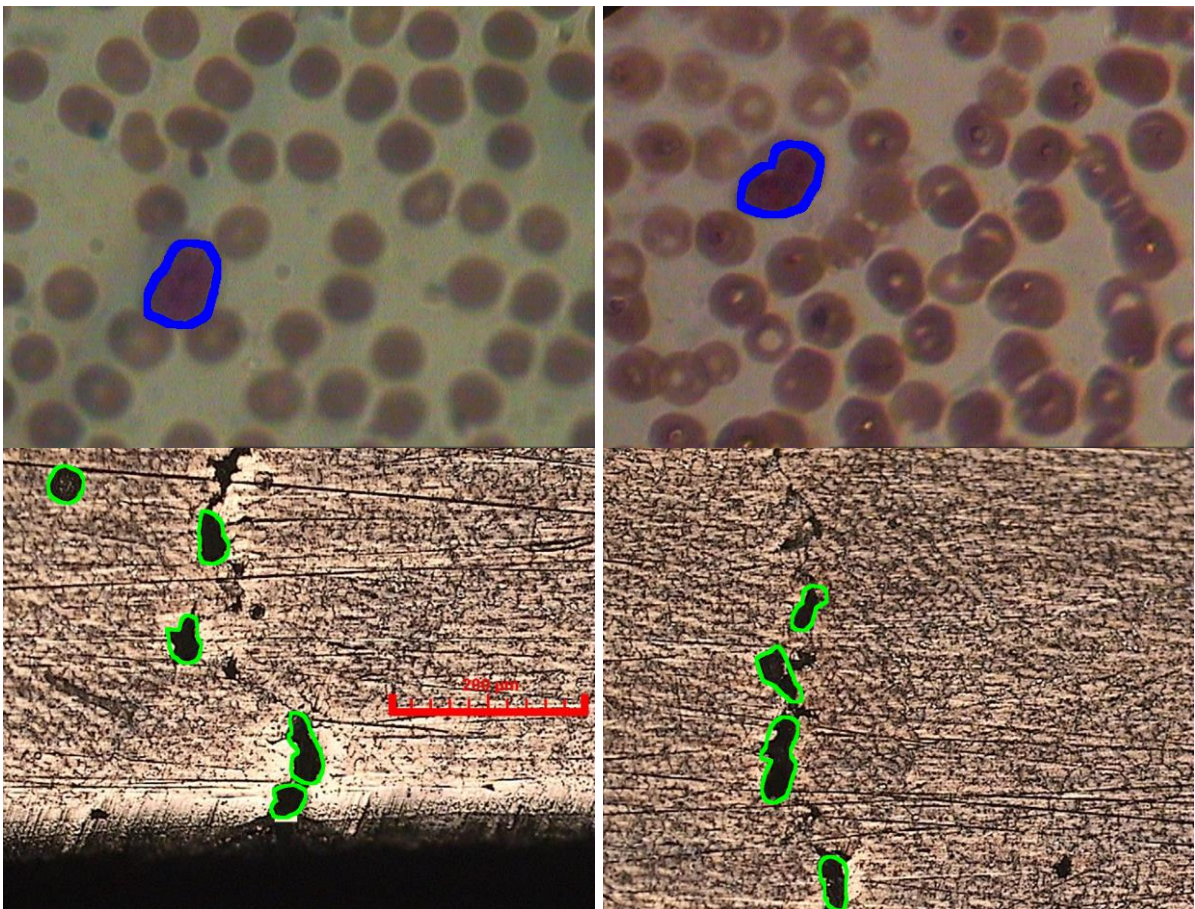


Рисунок 9 – Виділені контури ОРК

Прототип системи налагоджено в системі MatLAB та у вигляді Web-ресурсу isop.krpd.edu.ua, створеного на мові Python.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В результаті виконаної роботи досягнуто поставленої мети. Отримано інформаційну технологію, що в автоматичному режимі оконтурює об'єкти з розмитими краями на цифрових зображеннях та дозволяє визначати морфологічні параметри об'єктів для їх подальшого розпізнавання або класифікації. Технологія ґрунтується на новому методі оконтурювання, в основі якого ітераційне уточнення грубо й неоднозначно визначеного оператором Собеля контуру сплайном у двовимірному просторі. Особливістю методу є мінімальне число параметрів, а саме точність апроксимації грубого контуру.

В результаті виконаної роботи можна зробити такі висновки:

1. Аналіз існуючих методів та інформаційних систем оконтурювання, морфологічної параметризації та класифікації показав неможливість їх ефективного застосування для роботи із об'єктами з розмитими краями. Існуючі методи роботи з такими об'єктами налаштовані під конкретні практичні задачі, мають значне число параметрів, які потребують точного налаштування, часто з активною участю оператора. Водночас число задач оконтурювання й морфологічного аналізу об'єктів у різних галузях досліджень потребує досить універсальної технології її вирішення.

2. Розроблено метод ітераційного уточнення грубо визначених розмитих контурів об'єктів за допомогою кубічного ермітового сплайна шляхом оптимізації розміщення вузлів та їх ітеративного додавання, що дозволяє уникнути апріорного задання параметрів гладкості сплайна й керуватись лише заданою точністю;

3. Розроблено систему морфологічних відносних показників, що ґрунтуються на сплайн-моделі замкнутого контуру об'єкта й дозволяють виконати класифікацію об'єктів методами дискримінантного аналізу.

4. Вдосконалено формули кубічного ермітового сплайна для замкнутого контуру об'єкта, що враховано в структурі матриці планування методу найменших квадратів, який застосовується при наближенні контуру до грубо визначених точок.

5. Отримали подальший розвиток інформаційна технологія оконтурювання для випадку об'єктів з розмитими контурами, що поєднує методи цифрової фільтрації неоднозначних точок контуру з ітеративною апроксимацією сплайном, що дозволяє автоматизувати визначення морфологічних параметрів без тонкого настроювання параметрів методу, керуючись лише необхідною точністю. Зокрема отримано дискримінантну формулу для класифікації імунного стану людини за навчальною вибіркою із 110 еозинофілів. Ретроспективна класифікація вибірки виявила 7,3 % віднесення норми до патології та 12,6 % патології до норми.

6. Реалізовано інформаційну технологію в інформаційній системі у середовищі MatLab та у вигляді Web-ресурсу isop.krpd.edu.ua, створеного на мові Python.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Медведєв Д. Г. Алгоритм параметризації еозинофілів за допомогою сплайнів. / Д. Г. Медведєв, І. В. Шелевицький // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій, 2010. – Т.14. – С. 159-170.
2. Медведєв Д. Г. Інформаційна система визначення морфологічних параметрів еозинофілів / Д. Г. Медведєв. // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, 2012. – Вип.. 10. – С. 67-74.
3. Медведєв Д. Г. Технологія класифікації еозинофілів на основі сплайн-параметризації / Д. Г. Медведєв // "АСУ і ПА", 2011. – Вип. 156. – С. 77-82.
4. Медведєв Д. Г. Метод виділення контуров об'єктів с нечеткими краями на цветных изображениях / Д. Г. Медведєв // Цифровая обработка сигналов, 2014. – №3. – С. 62-67.
5. Медведєв Д. Г. Алгоритм виділення контура об'єкта с нечеткими краями / Д. Г. Медведєв // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук, 2014. – №02(61) Часть I. – С 56-61
6. Медведєв Д. Г. Алгоритм визначення геометричних параметрів еозинофілів за допомогою сплайнів. / Д. Г. Медведєв // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій. – 2011. – Т.15. – С. 58-68.
7. Медведєв Д. Г. Дискримінантна функція параметризованих еозинофілів / Д. Г. Медведєв, О. В. Бурлак, В. О. Головка. // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка", 2011. – Вип. 14 (188). – С. 202-206.
8. Медведєв Д. Г. Інформаційна технологія визначення морфологічних параметрів еозинофілів / М. О. Шутко, Д. Г. Медведєв. // Науковий вісник академії муніципального управління, Серія "Техніка", 2012. – Вип. 5. – С 216-224
9. Медведєв Д. Г. Алгоритм оконтурювання еозинофілів за допомогою сплайнів. / Д. Г. Медведєв // Праці міжнародної молодіжної математичної школи "Питання оптимізації обчислень (ПОО-XXXVII)" К.: Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2011. – С. 113-114.
10. Медведєв Д. Г. Алгоритм оконтурювання еозинофілів за допомогою сплайнів. / Д. Г. Медведєв // Комп'ютерні науки та інженерія: матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених CSE-2010. – Львів: вид-во Львівської політехніки, 2010. – С.274-275
11. Медведєв Д. Г. Алгоритм визначення геометричних параметрів еозинофілів за допомогою сплайнів / Д. Г. Медведєв. // Праці III Міжнародної науково-практичної конференції «Обробка сигналів і негауссівських процесів», присвяченої пам'яті професора Ю. П. Кунченка: тези доповідей. – Черкаси: ЧДТУ, 2011. – С. 128-130
12. Медведєв Д. Г. Метод визначення контурів об'єктів з нечіткими краями /

- Д. Г. Медведєв // Статистичні методи обробки сигналів і даних: Матеріали Міжнародної наукової конференції; м. Київ, 16-17 жовтня 2013р., Національний авіаційний університет. – К.: НАУ, 2013. – С. 229-234.
13. Медведєв Д. Г. Алгоритм визначення геометричних параметрів еозинофілів за допомогою сплайнів / Д. Г. Медведєв. // Матеріали X міжнародної науково-технічної конференції “АВІА-2011”. – К.: НАУ, 2011 – Т.1. – С. 6.80-6.83.
  14. Медведєв Д. Г. Алгоритм визначення геометричних параметрів еозинофілів за допомогою сплайнів / Д. Г. Медведєв. // Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): матеріали 1-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Черкаси: Маклаут, 2011. – С. 449-450.
  15. Медведєв Д. Г. Алгоритм розпізнавання еозинофілів за допомогою сплайнів. / Д. Г. Медведєв // Сучасні проблеми моделювання складних економічних систем: збірник наук. тез II Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Кривий Ріг, КЕІ ДВНЗ “КНЕУ” ім. В. Гетьмана, 2010. – С. 261-263.

## АНОТАЦІЯ

**Медведєв Дмитро Геннадійович. Автоматизоване визначення морфологічних параметрів зображень об’єктів з розмитими краями. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.23 – системи та засоби штучного інтелекту – ДВНЗ «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки України, Кривий Ріг, 2014.

Дисертація присвячена створенню методів оконтурювання та параметризації об’єктів з розмитими краями (ОРК) за їх цифровим зображенням. Це необхідно для досліджень в мінераграфії, металографії, імунного статусу пацієнтів. Існуючі методи визначення біологічних об’єктів не спеціалізуються саме на еозинофілах.

В роботі розроблено алгоритм пошуку на цифровому зображенні ОРК на прикладі еозинофіла, який є прозорим за своєю природою і має розмитий контур. При цьому, через низьку якість зображення та специфічну форму об’єктів, грубо виділяється контур ОРК.

Для уточнення контуру побудовано сплайн-модель. Побудовано замкнутий ермітів кубічний сплайн за допомогою модифікації його крайових умов. Розроблено метод ітераційного уточнення грубо визначених розмитих контурів об’єктів шляхом оптимізації розміщення вузлів та їх ітеративного додавання, що дозволяє уникнути апріорного задання параметрів гладкості сплайна й керуватись лише заданою точністю

Розроблено інформаційну систему визначення морфологічних параметрів об’єктів з розмитими краями. Знайдено дискримінантну формулу для класифікації імунного стану людини за навчальною вибіркою із 110 еозинофілів за такими параметрами як форма, площа, периметр, великий та

малий діаметр. Ретроспективна класифікація вибірки виявила 7,3% віднесення норми до патології та 12,6% патології до норми.

**Ключові слова:** сплайн-функція, оконтурювання об'єктів.

## SUMMARY

**Medvedev Dmitry G. Automated determination of morphological parameters of image objects with blurred edges.** – Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.13.23 – systems and artificial intelligence – SHEI «Kryvyi Rih national university» Ministry of Education and Science of Ukraine, Kryvyi Rih, 2014.

The thesis is devoted to methods for delineation and parameterization objects with blurred edges for their digital images. It is necessary for research in mineragraphy, metallography, the immune status of patients. Existing methods for determining biological objects do not specialize in eosinophils.

In this paper, the search algorithm for digital image objects with blurred edges on the example of eosinophils, which are transparent in nature and has a blurred edges. However, due to the low image quality and a specific form of objects allocated roughly outline objects with blurred edges.

To clarify the edge constructed spline model. We construct a closed Hermite cubic spline through modification of its boundary conditions. The method of iterative refinement roughly determined blurred object edges by optimizing the placement of nodes and their iterative addition, to avoid setting a priori smoothness of the spline parameters and guided by a given accuracy.

Developed information system for determination morphological parameters of objects with blurred edges. Found discriminant formula for classification of immune human condition in a study sample of 110 eosinophils by parameters such as shape, area, perimeter, large and small diameter. Retrospective classification of the sample revealed a 7.3% attribution rules to pathology and 12.6% of pathology to normal.

**Keywords:** spline function delineate objects.

## АНОТАЦІЯ

**Медведев Дмитрий Геннадьевич. Автоматизированное определение морфологических параметров изображений объектов с размытыми краями.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.23 – системы и средства искусственного интеллекта. – ГВУЗ «Криворожский национальный университет» Министерства образования и науки Украины, Кривой Рог, 2014.

Диссертация посвящена созданию методов оконтуривания и параметризации объектов с размытыми краями за их цифровым изображением. Изображения таких объектов получают в минераграфии, металлографии, при исследовании иммунного статуса человека. Существующие методы

определения таких объектов на цифровом изображении либо не удовлетворяют требованиям поставленной задачи либо требуют непосредственного участия оператора, что усложняет процесс автоматизации определения как самого объекта, так и его дальнейшую параметризацию.

В работе разработан алгоритм оконтуривания объектов с размытым контуром на примере изображения эозинофилов – элементов крови. Для этого выполняется медианная фильтрация изображения, построение его гистограммы и выделение контура модифицированным оператором Собеля. Модификация оператора Собеля состоит в том, что он применяется только к яркости, а цветоразностные компоненты остаются без изменений. Тогда получается цветное изображение в выделенными на нем контурами. Но, не смотря на это, из-за низкого качества изображения и специфической формы клетки, контур эозинофила выделяется грубо.

Так как в декартовой системе координат функция, по определению, не может быть замкнутой, то выполняется перевод точек грубо выделенного контура в полярную систему координат. Центром полярной системы координат служит центр прямоугольника, описанный около грубо выделенного контура объекта.

Для уточнения контура эозинофила построено сплайн-модель. Особенность сплайн-модели в том, что контур является замкнутой линией. Поэтому, построено замкнутый кубический сплайн Эрмита с помощью модификации его краевых условий, что учтено в структуре матрицы планирования метода наименьших квадратов, который применяется для приближения контура к грубо выделенным точкам.

Для достижения заданной точности вычислений разработан метод итерационного уточнения количества и размещения узловых точек сплайна. Применение данного метода позволяет получить гладкий уточненный контур с среднеквадратическим отклонением  $\delta$  и минимальным количеством узлов.

Построена информационная технология определения морфологических параметров эозинофилов, включающая преобразование формата цифрового изображения в YUV, грубое выделение точек контура модифицированным оператором Собеля, сканирования контурных точек, переход к полярной системе координат контурных точек, аппроксимацию контура замкнутым кубическим сплайном Эрмита по методу наименьших квадратов, оптимизацию положения и числа узлов сплайна, расчет на основе сплайн-модели морфологических параметров объектов (форма, большой и малый диаметры, площадь, длина контура).

Использование предложенной информационной технологии позволяет выполнять классификацию объектов по относительным морфологическими параметрами. В частности получено дискриминантную формулу для классификации иммунного состояния человека по учебной выборке из 110 эозинофилов. Ретроспективная классификация выборки выявила 7,3 % отнесения нормы к патологии и 12,6 % патологии к норме.

**Ключевые слова:** сплайн-функция, эозинофилы, оконтуривание объектов.

Підписано до друку 17.11.2014 р. Формат 60x84/16.  
Папір офсетний. Наклад 150 прим. Замовлення № 560  
Копіювальний центр КПІ ДВНЗ «КНУ»  
50086, м. Кривий Ріг, пр. Гагаріна, 54

Видавничий центр ДВНЗ  
«Криворізький національний університет»  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 4328 від 24.05.2012 р.  
Вул. ХХІІ партз'їзду 11, Кривий Ріг, 50027  
Тел.: 409-17-23