

**Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет імені Тараса Шевченка**

КОЦУР ДМИТРО ВІКТОРОВИЧ

УДК 004.021:004.023:004.932

**ПОБУДОВА МОДЕЛІ ЄДИНОГО АЛГОРИТМІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА
НА ОСНОВІ ДІАГРАМИ ВОРОНОГО ДЛЯ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ
КОМПЛЕКСУ ЗАДАЧ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ**

01.05.01 – теоретичні основи інформатики та кібернетики

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі математичної інформатики факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Терещенко Василь Миколайович,
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка,
завідувач кафедри математичної інформатики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук
Семенова Наталія Володимирівна,
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН
України, м. Київ, провідний науковий
співробітник відділу методів дискретної
оптимізації, математичного моделювання та
аналізу складних систем;

кандидат фізико-математичних наук, доцент
Жежерун Олександр Петрович,
Національний університет «Києво-Могилянська
академія», м. Київ, доцент кафедри
мультимедійних систем.

Захист відбудеться «03» жовтня 2019 р. о 15 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.001.09 Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: 03680, Київ, проспект Академіка Глушкова, 4д, факультет комп'ютерних наук та кібернетики, аудиторія 01.

З дисертацією можна ознайомитись у Науковій бібліотеці ім. М. Максимовича Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: 01601 МСП, Київ, вул. Володимирська, 58.

Автореферат розісланий «02» вересня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.П. Шевченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Обробка та аналіз зображень є невід'ємним складником багатьох сфер людського життя. З появою ЕОМ розпочався етап цифрового аналізу зображень. Задачі обробки зображень постають у численних галузях науки. Наприклад, сучасні дослідження в хімії, фізиці, біології та медицині потребують обробки та аналізу великих обсягів даних з найрізноманітніших джерел. Це можуть бути зображення, отримані за допомогою сканерів, цифрових фотокамер, мікроскопів, комп'ютерних томографів тощо. Аналіз таких даних є зазвичай трудомістким процесом, який потребує спеціально навчених кваліфікованих фахівців, тому розроблення високоефективних методів автоматичного розв'язання задач обробки зображень є надзвичайно актуальним напрямом дослідження.

Особливо стрімкий розвиток методів цифрової обробки зображень припав на 70-і рр. ХХ ст. та був обумовлений безпосередньо швидкими темпами розвитку комп'ютерної техніки, цифрових оптичних пристроїв, а також математичного апарату для аналізу та реконструкції графічних зображень. Ядром багатьох алгоритмів обробки зображень стали методи та підходи обчислювальної геометрії, фундаментальні геометричні алгоритми та структури даних.

Дослідженням задач та методів ефективної обробки зображень, а також розробленням фундаментального базису для них займалися L. G. Shapiro, C. Xu, J. L. Prince, R. Kimmel, S. Osher, J. A. Sethian, P. Felzenszwalb, R. C. Gonzalez, A. Fran-*gi*, A. Rosenfeld, A. Zissermann, M. Shamos, F. Preparata, J. Malik, S. Fortune, J. Canny, M. Kass, M. Sonka, N. Otsu, A. Okabe, V. Hlavac, J. Matas, J. Kybic, J. O'Rourke, M. Overmas, B. Chazelle, J. Goodman, M. Held, S. Skiena та інші. Серед вітчизняних науковців зазначеною проблематикою займалися В. М. Глушков, А. В. Анісімов, М. І. Шлезінгер, В. М. Терещенко, Ю. І. Петунін, Б. В. Рубльов, Д. А. Ключин, Ю. В. Крак, Н. В. Семенова, О. П. Жежерун, В. П. Кожем'яко, В. П. Боюн, О. А. Ємець, Р. Н. Кветний, Ю. Г. Стоян, Ю. М. Рашкевич та інші.

В останні роки було розроблено як вузькопрофільні, так і універсальні мультиалгоритмічні платформи для аналізу та обробки зображень. Прикладом таких платформ є ImageJ (або FiJi), IMARIS, iLastic. Попри такі переваги існуючих систем, як простота використання, зручність користувацького інтерфейсу, наявність великої алгоритмічної бази, вони не дають змоги отримати бажаний результат для класу задач. Наприклад, IMARIS та iLastic не підтримують модульність середовища, мають обмежені можливості для розширення алгоритмічної бази. Інше універсальне середовище ImageJ попри відкритість та модульність, не надає можливості отримати ефективний розв'язок, оскільки не реалізує універсальних структур даних з можливістю їх спільного використання, а вхід та вихід кожного модулю можна представити лише як зображення. Тому важливою на сьогодні проблемою є розробка моделі ефективного мультиалгоритмічного середовища для розв'язування класу задач обробки зображень, яка використовує єдині уніфіковані структури даних та алгоритмічні засоби для досягнення комплексного кінцевого результату.

Прикладом вирішення цієї проблеми є модель єдиного алгоритмічного середовища (МЄАС), що була вперше запропонована В. М. Терещенком для розв'язування комплексу задач обчислювальної геометрії. Оскільки алгоритми та структури даних обчислювальної геометрії є ядром для багатьох методів обробки зображень, розширення МЄАС на базі геометричних структур для складних задач обробки зображень є актуальним та перспективним напрямом дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота є складовою частиною наукових робіт, які ведуться на кафедрі математичної інформатики факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка при виконанні теми проекту Міністерства освіти та науки України: «Розробка єдиного програмно-алгоритмічного середовища візуалізації та комп'ютерного моделювання для створення систем оздоровлення військовослужбовців» (НДФ №19БФ015-04, 01.01.2019-31.12.2021)

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є створення моделі єдиного алгоритмічного середовища на основі універсальних структур даних (діаграм Вороного) для ефективного розв'язування комплексу задач обробки зображень (зокрема, біологічних та медичних). Поставлена мета передбачає реалізацію таких завдань:

1. Узагальнити концепцію моделі єдиного алгоритмічного простору на основі діаграми Вороного для розв'язування задач обробки зображень.
2. Створити на основі розробленої методології моделі єдиного алгоритмічного середовища ефективні засоби для розв'язування таких задач обробки зображень: сегментація, бінаризація, відстеження, побудова серединної осі об'єкта, знаходження областей близькості для множини об'єктів, підрахунок дескрипторів об'єкта.
3. Розробити ефективні алгоритми розв'язання задач обробки зображень та покращити існуючі на сьогодні методи.
4. Дослідити методи побудови діаграми Вороного для об'єктів довільної форми на площині та можливість їх застосування до розв'язування прикладних задач обробки зображень.
5. Розробити ефективні методи побудови двовимірного скелетона та серединної осі об'єкта заданої форми.
6. Виконати програмну реалізацію моделі єдиного алгоритмічного середовища на основі діаграми Вороного. Це включає оптимізацію роботи алгоритмів, тестування ефективності роботи алгоритмів, застосування моделі єдиного алгоритмічного середовища для розв'язування практичних задач обробки та аналізу зображень.
7. Продемонструвати практичну цінність розробленої МЄАС для розв'язування прикладних задач обробки біологічних та медичних зображень.

Об'єкт дослідження – процес ефективного розв'язання класу задач обробки та аналізу зображень (зокрема, біологічних та медичних).

Предмет дослідження – концепції, методи, алгоритми та структури даних для ефективного розв'язування комплексу задач обробки зображень.

Методи дослідження. Дисертаційна робота ґрунтується на методах прикладної теорії алгоритмів, обчислювальної геометрії, цифрової обробки зображень, комп'ютерної графіки та візуалізації, методі редукції.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі розглядаються теоретичні та прикладні аспекти побудови моделі єдиного алгоритмічного середовища. Уперше:

- розроблено модель єдиного алгоритмічного середовища (МЄАС) на основі діаграми Вороного для розв'язання широкого класу задач обробки зображень (зокрема, біологічних та медичних);
- подальшого розвитку набули алгоритми побудови апроксимації діаграми Вороного для множини параметрично заданих кривих на площині;
- удосконалено алгоритм побудови скелетону та серединної осі об'єкта з порожнинами, який задається набором плоских багатокутників;
- розроблено новий метод M-Scale регуляризації серединної осі об'єкта на основі діаграми Вороного для кіл, проаналізовано оцінку складності такого методу;
- проаналізовано можливості оптимізації роботи МЄАС на основі спрощеного представлення геометричних об'єктів;
- сформульовано критерій спрощення багатокутників для задачі побудови скелетона об'єкта, доведено його коректність;
- знайдено евристичні методи пришвидшення алгоритму побудови діаграми Вороного та скелетону об'єкта на площині;
- у межах МЄАС розроблено ефективний алгоритм трекінгу ниткоподібних структур на основі методу активних контурів.

Практичне значення одержаних результатів. Робота має як теоретичну, так і прикладну спрямованість. Розроблена модель єдиного алгоритмічного середовища (МЄАС) надає змогу розв'язувати такі задачі обробки зображень, як сегментація, аналіз статичних структур (обчислення дескрипторів для об'єктів на зображенні), відстеження об'єктів на зображенні, аналіз динамічних структур на послідовності зображень (наприклад, визначення швидкості руху чи ступеню деформації об'єкта). МЄАС знаходить особливе практичне застосування при аналізі біологічних та медичних зображень. Зокрема, у дисертаційній роботі було продемонстровано застосування МЄАС для розв'язання таких задач:

- сегментація біологічної нейронної мережі, реконструкція топології мережі, класифікація аксонів, дендритів, клітинних сом із використанням флуоресцентних зображень з мікроскопа;
- сегментація структур цитоскелета та мембрани клітини;
- сегментація та реконструкція судинної сітки сітківки ока;
- побудова скелетона, серединної осі бінарної фігури;
- відстеження клітинних філаментів на послідовності зображень;
- моделювання та візуалізація засобів реабілітації військовослужбовців.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, що складають суть дисертаційної роботи, одержані здобувачем самостійно. Із праць, виконаних у співавторстві, на захист виносяться лише результати, отримані особисто здобувачем. Роботи [1, 12] написані у співавторстві з науковим керівником, якому

належить постановка проблеми, вибір методів дослідження та обговорення результатів. У роботах [6, 10] здобувачем розроблено алгоритми сегментації та відстеження ниткоподібних об'єктів, виконано порівняльний аналіз таких алгоритмів; [2, 9] – застосовано розроблені у межах МЄАС алгоритми відстеження для аналізу руху окремих кератинових філаментів та мікротрубочок; [8] – проаналізовано часткові випадки алгоритму тріангуляції на основі обходу Грехема, виконано його програмну реалізацію; [5] – розроблено метод сегментації нейронних мереж на основі діаграми Вороного; [7] – запропоновано евристичні методи пришвидшення побудови скелетона об'єкта, проведено обчислювальні експерименти, виконано порівняльний аналіз евристик; [11] – визначено оптимальні параметри алгоритмів відстеження.

Апробація результатів дисертації. Основні ідеї та положення дисертаційного дослідження обговорювалися на наукових семінарах факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Основний зміст дисертаційної роботи викладено та оприлюднено у доповідях і тезах міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій, зокрема:

- Quantitative BioImaging Conference. Göttingen, Germany, 4-6 January 2018;
- Approximation Methods for Molecular Modelling and Diagnosis Tools. Malekhiv, Ukraine, 19-23 March, 2018;
- 26th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision. Plzen, Czech Republic, 28 May - 1 June 2018;
- OAGM & ARW Joint Workshop (Vision, Automation and Robotics). Vienna, Austria, 10-12 May, 2017;
- IEEE Fifth International Conference on the Innovative Computing Technology (INTECH 2015). Pontevedra, Spain, 20-22 May 2015.

Публікації. За результатами дослідження опубліковано 12 наукових праць: 4 наукові статті у фахових виданнях України, 3 – у міжнародних журналах, що індексуються у наукометричних базах SCOPUS та Web of Science, та 5 тез міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (135 найменувань) і шести додатків. Загальний обсяг дисертації становить 199 с., основний текст роботи викладено на 163 с.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено його об'єкт, мету і завдання, відзначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, вказано апробацію та публікації результатів дисертаційного дослідження, зазначено особистий внесок здобувача.

Перший розділ присвячено аналізу наявних підходів до розв'язання задач обробки зображень. У **підрозділі 1.1** визначено основні задачі обробки зображень. **Підрозділ 1.2** містить огляд наявних алгоритмічних засобів та програмних пакетів для обробки та аналізу зображень. Алгоритми обробки зображень включають у себе базові перетворення зображень (наприклад, на основі гістограм), методи

спектрального аналізу, алгоритми реконструкції, методи математичної морфології, алгоритми сегментації (наприклад, метод Оцу, алгоритм «GrabCut», «Watershed», «Felzenszwalb»), методи відстеження (точковий трекінг, відстеження кривих).

При аналізі програмних пакетів акцент зроблено на універсальних мультиалгоритмічних середовищах для (напів-)автоматичного розв'язування задач обробки зображень (у тому числі медичних, біологічних). Табл. 1.1 містить порівняльний аналіз таких середовищ. Недоліками ilastic та IMARIS є відсутність модульності, розширюваності, обмежена алгоритмічна база та функціональність. Середовище ImageJ, незважаючи на відкритість та модульність, не дає змоги ефективно отримати бажаний результат, оскільки кожен модуль використовує незалежні структури даних, що унеможливорює їх спільне використання.

Табл. 1.1. Порівняльний аналіз програмних засобів обробки зображень

Назва	Переваги (наявні функції, +)	Недоліки (відсутні функції, -)
ilastic	+ сегментація 2D зображень; + відкритий доступ;	- відстеження об'єктів; - модульність; - можливість розширення;
IMARIS	+ сегментація у 2D та 3D; + велика алгоритмічна база для задач реконструкції, покращення; + точкове відстеження;	- комерційне ПЗ; - модульність; - відстеження кривих, складних об'єктів;
ImageJ (FiJi)	+ велика алгоритмічна база; + розширюваність за рахунок модулів на Java, Python, Groovy; + легкість конфігурації системи та окремих модулів.	- спільне використання структур даних, проміжних обчислень окремими модулями; - складність програмної реалізації користувацьких модулів.

Останнього недоліку позбавлена модель єдиного алгоритмічного середовища (МЄАС), що була вперше запропонована В. М. Терещенком для швидкого розв'язування комплексу задач обчислювальної геометрії: триангуляція Делоне, діаграма Вороного, пошук найближчої пари тощо. Тому в цьому підрозділі проаналізовано концепцію МЄАС та основи методології побудови високоефективних паралельно-рекурсивних систем з єдиними структурами даних.

Підрозділ 1.3 містить основні геометричні означення, теореми та твердження, деякі результати теорії графів. У **підрозділі 1.4** описано модель обчислень для аналізу складності алгоритмів, а **підрозділ 1.5** розкриває суть поняття звідності (або редукції) задач. Математичну модель зображення для неперервного та дискретного випадків визначено у **підрозділі 1.6**.

Означення 1.40. Нехай M, N позначають скінченні множини $M = \{1, 2, \dots, N\}$, $N = \{1, 2, \dots, W\}$, $N, W \in \mathbb{N}$, $\Lambda = M \times N$, $U \neq \emptyset$, $U \subset \mathbb{R} \mid |U| < \infty$. Тоді *дискретним двовимірним зображенням* $I(p)$, $p \in \Lambda$ називається відображення:

$$I : \Lambda \rightarrow U^K, \quad (1.20)$$

де $W, N \in \mathbb{R}$ – відповідно висота та ширина зображення, $K \in \mathbb{N}$ – кількість каналів зображення, а точка $p \in \Lambda$ називається *пікселем* зображення.

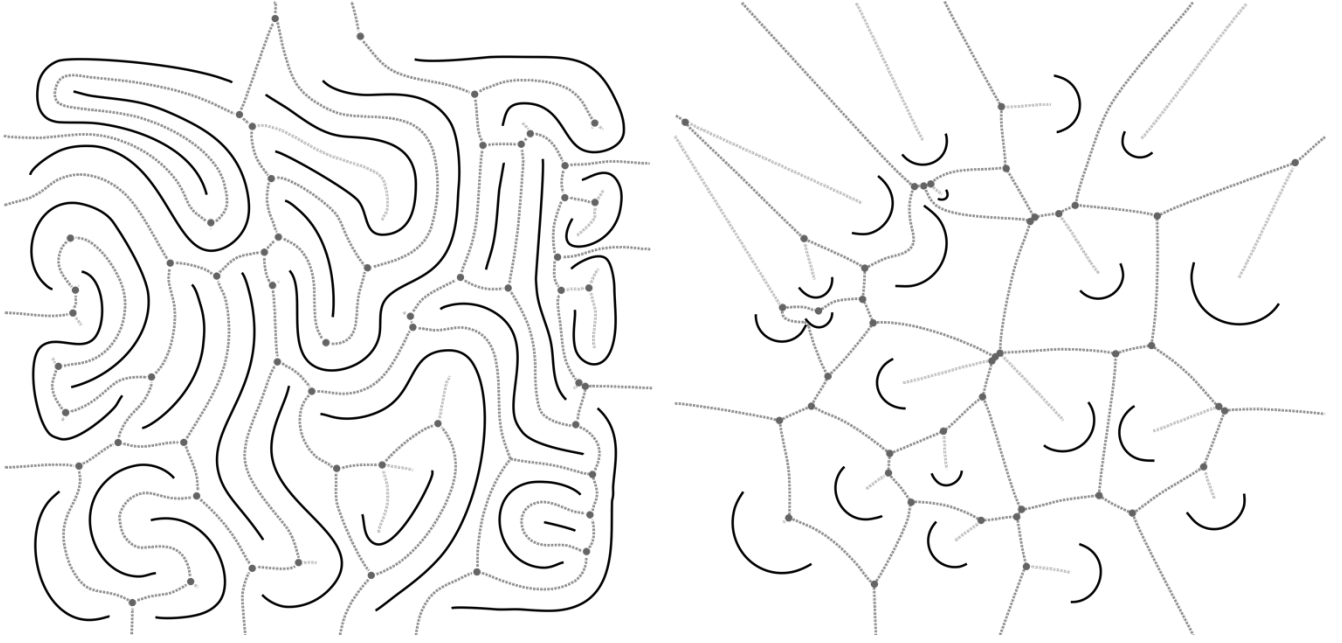


Рис. 2.3. Приклади діаграм Вороного (сірий колір) для множини параметричних кривих (ліворуч) та множини дуг кола (праворуч)

У другому розділі визначено діаграму Вороного для множини точок, відрізків, кіл та параметрично заданих кривих на площині, а також проаналізовано основні властивості діаграм Вороного.

Нехай $S_C = \{C_1(t), C_2(t), \dots, C_N(t)\}$, $t \in [0,1]$ позначає множину неперервних параметрично заданих кривих на площині: $C_i: [0,1] \rightarrow \mathbb{R}^2$, $i = 1, 2, \dots, N$.

Припущення 2.6. $\forall C_i, C_j \in S_C$ ($i \neq j$) $\forall t_i, t_j \in (0,1) : C_i(t_i) \neq C_j(t_j)$.

Припущення 2.7. $\forall C_i \in S_C \forall t_1, t_2 \in [0,1] : C_i(t_1) = C_i(t_2) \Rightarrow t_1 = t_2$.

Припущення 2.8. (регулярність) $\forall C_i \in S_C \forall t \in [0,1] : C'_i(t) \neq 0$;

Для кривої, що задовольняє припущення 2.6, 2.7, відстань між точкою $p \in \mathbb{R}^2$ та кривою $C_i \in S_C$ визначається так:

$$d_c(p, C_i) = \inf_{t \in [0,1]} \|p - C_i(t)\|. \quad (2.22)$$

Означення 2.10. Діаграмою Вороного $\mathcal{VD}(S_C)$ для множини кривих S_C (яку називають множиною генераторів діаграми Вороного) називається розбиття площини на області близькості (рис. 2.3):

$$\mathcal{VD}(S_C) = \{\mathcal{VP}(C_i) | C_i \in S_C\}, \quad (2.23)$$

де $\mathcal{VP}(C_i)$ позначає багатокутник Вороного, що відповідає кривій $C_i \in S_C$:

$$\mathcal{VP}(C_i) = \left\{ p \in \mathbb{R}^2 \mid d_c(p, C_i) \leq d_c(p, C_j) \quad \forall j \in I_N \setminus \{i\} \right\}. \quad (2.24)$$

Границя між двома багатокутниками Вороного є частиною відповідного бісектора, а самі багатокутники можуть містити власні бісектори (self-bisectors).

Означення 2.6. Бісектором між двома елементами $s_i, s_j \in S$, ($i \neq j$) називається множина точок:

$$b(s_i, s_j) := \{p \in \mathbb{R}^2 \mid d^*(p, s_i) = d^*(p, s_j)\}, \quad i \neq j, \quad (2.10)$$

де $d^*(p, s) = \inf_{p' \in S} \|p - p'\|$ – відстань між точкою $p \in \mathbb{R}^2$ та елементом $s \in S$.

Означення 2.11. Власним бісектором кривої $C(t)$ називається множина:

$$b(C) = \{p \in \mathbb{R}^2 \mid \exists t, s \in [0,1], t \neq s : d_c(p, C) = \|p - C(t)\| = \|p - C(s)\|\}. \quad (2.26)$$

Табл. 2.1. Алгоритми побудови діаграми Вороного

Назва алгоритму	Складність (час)	Коментарі
<i>Алгоритми побудови діаграми Вороного для множини точок</i>		
Перетин півплощин	$O(N^2 \log N)$	-
Інкрементний	$O(N^2 \log N)$	послідовна вставка точок
«Розділяй та володарюй»	$O(N \log N)$	-
Алгоритм Форчуна	$O(N \log N)$	метод «плоского замітання»
Проекція опуклої оболонки	$O(N \log N)$	на базі триангуляції Делоне
<i>Алгоритми побудови діаграми Вороного для множини відрізків</i>		
Алгоритм Форчуна	$O(N \log N)$	метод плоского замітання
Кінематичний алгоритм	$O(N \log N + t)$	t – кількість змін у графі після вставки всіх відрізків
Алгоритм Кіркпатріка	$O(N \log N)$	-
Алгоритм Лі-Драйсдейла	$O(N \log^2 N)$	-
Алгоритм Бає	$O(N \log N + k)$	k – кількість перетинів відрізків
Алгоритм Каравеласа	$O((N + k) \log^2 N)$	
<i>Діаграма Вороного для відрізків та дуг кола</i>		
Алгоритм Япа	$O(N \log N)$	-
<i>Діаграма Вороного для множини кіл</i>		
Алгоритм Шаріра	$O(N \log^2 N)$	кола можуть перетинатися
Алгоритм “sweep line”	$O(N^2)$	

Приклади діаграм Вороного для множини кривих зображено на рис. 2.3. У випадку $C_i(t) = p_i \in \mathbb{R}^2$, $t \in [0,1]$ отримуємо діаграму Вороного для точок, а при $C_i(t) = tp_i^1 + (1-t)p_i^2$, $p_i^1, p_i^2 \in \mathbb{R}^2$, $t \in [0,1]$ – діаграму Вороного для відрізків.

Діаграму Вороного $\mathcal{VD}(S_C)$ можна представити планарним графом $G = (Q, E)$, де $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_{N_v}, q_\infty\} \subset \mathbb{R}^2$ та $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{N_e}\}$ – множини вершин та ребер $\mathcal{VD}(S_C)$ відповідно. Діаграма Вороного для точок та відрізків має такі властивості.

Властивість 2.7. Кожній вершині $q_i \in Q$ діаграми Вороного $\mathcal{VD}(P)$ відповідає порожнє коло з центром q_i , що проходить не менше ніж через три генератора з S .

Властивість 2.8. Коло у властивості 2.7 є найбільшим порожнім колом серед усіх порожніх кіл з центром у точці $q_i \in Q$.

Структурою даних, що надає змогу ефективно зберігати діаграму Вороного є РСПЗ – реберний список з подвійними зв'язками. РСПЗ містить дані про вершини, ребра та грані діаграми Вороного, зв'язки між ними у вигляді вказівників та додаткові атрибути. У табл. 2.1 наведено перелік алгоритмів побудови діаграми Вороного для точок, відрізків, кіл або дуг кіл.

Велике коло задач обчислювальної геометрії зводиться до побудови діаграми Вороного. На рис. 2.14 наведено діаграму звідності задач обчислювальної геометрії та оцінки складності редукції за часом та обсягом пам'яті. Оскільки методи обчислювальної геометрії є ядром для багатьох задач обробки та аналізу зображень, розширення МЄАС на основі діаграми Вороного для розв'язування таких задач є актуальним напрямом дослідження.

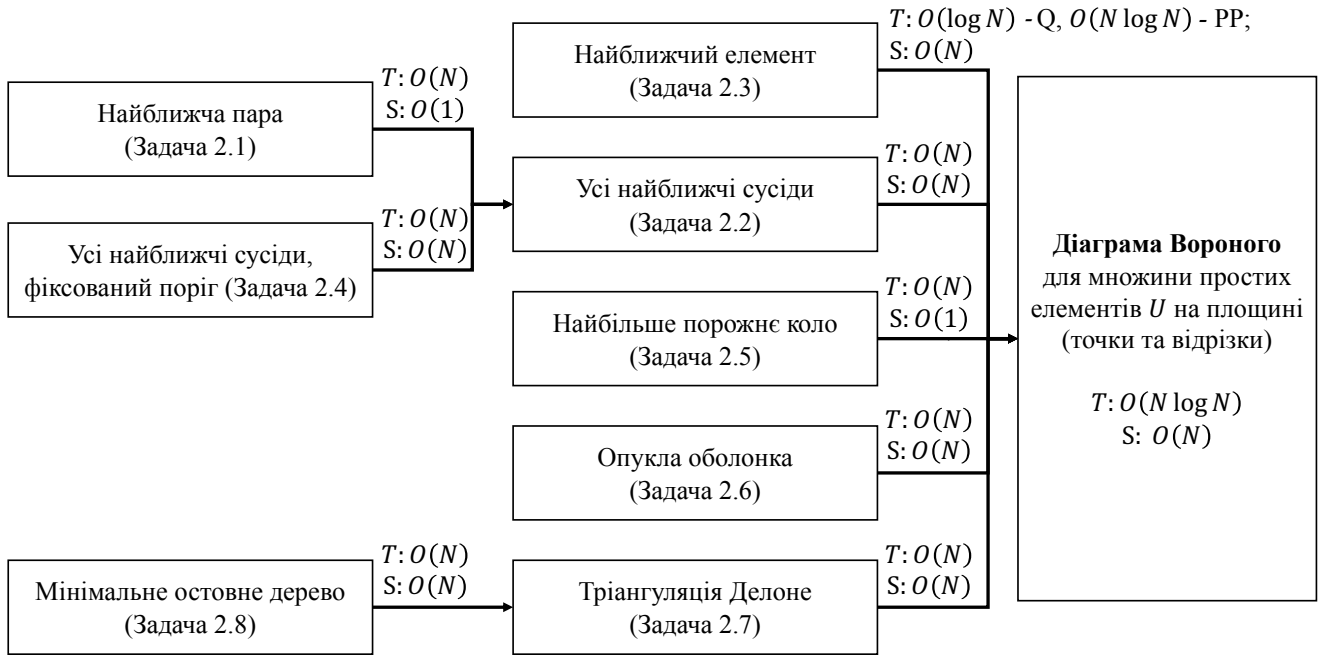


Рис. 2.14. Звідність задач обчислювальної геометрії до діаграми Вороного.
Складність: T – час, S – пам'ять, Q – час запиту, PP – час попередньої обробки.

Третій розділ присвячений розробленню концепції моделі єдиного алгоритмічного середовища на основі діаграми Вороного для розв'язування наведених нижче задач обробки зображень (**підрозділ 3.1**).

Нехай $I : \Lambda \rightarrow U^K$ позначає вхідне зображення, а I_1, I_2, \dots, I_L – послідовність зображень, де $I_j : \Lambda \rightarrow U^K$, $j = 1, 2, \dots, L$, $L \in \mathbb{N}$.

Задача 1. *Сегментація об'єктів та структур на зображенні:*

а) за вхідним зображенням I , що містить $N \in \mathbb{N}$ об'єктів O_1, O_2, \dots, O_N , побудувати дискретну маску $I_M : \Lambda \rightarrow U_N$, $U_N := \{0, 1, 2, \dots, N\}$, де для $p \in \Lambda$ виконується $I_M(p) = k$, $k \in U_N \setminus \{0\}$ тоді і лише тоді, коли p належить k -ому об'єкту на зображенні, а при $I_M(p) = 0$ піксель $p \in \Lambda$ належить фону;

б) за вхідним зображенням I , що містить $N \in \mathbb{N}$ об'єктів O_1, O_2, \dots, O_N , побудувати множину контурів $\mathcal{S} := \{\mathcal{S}^1, \mathcal{S}^2, \dots, \mathcal{S}^N\}$, де $\mathcal{S}^i = \{\mathcal{P}_0^i, \mathcal{P}_1^i, \dots, \mathcal{P}_{M_i}^i\}$ – контури i -го об'єкта, \mathcal{P}_0^i позначає зовнішній контур, а $\mathcal{P}_j^i, j > 0$ – це внутрішні контури об'єкта.

Задача 2. *Бінаризація зображення:* за вхідним зображенням I побудувати двійкову маску $I_B : \Lambda \rightarrow \{0, 1\}$, для якої $I_B(p) = 1$, якщо $p \in \Lambda$ належить об'єкту (множині об'єктів) та $I_B(p) = 0$, якщо $p \in \Lambda$ належить фону.

Зауваження 3.1. При $N = 1$ бінаризація (задача 2) є частковим випадком сегментації (задача 1).

Задача 3. *Відстеження (трекінг) структур на послідовності зображень:* нехай задано послідовність зображень I_1, I_2, \dots, I_L , $L \in \mathbb{N}$, що містить $N \in \mathbb{N}$ об'єктів O_1, O_2, \dots, O_N . Якщо на k -му зображенні відомо положення \mathcal{S}_k^i i -го об'єкта, знайти положення O_i на зображенні I_{k+1} .

Зауваження 3.2. У тривіальному випадку положення об'єкта задано єдиною точкою, тоді задача 3 називається задачею *точкового трекінгу*. Якщо положення об'єкта задано набором його контурів, то отримуємо *задачу відстеження контурів*.

Задача 4. Побудова серединної осі об'єкта \mathcal{O} : за зображенням I визначити границю $\partial\mathcal{O}$ та побудувати граф, що представляє множину $\mathcal{M}(\mathcal{O})$ точок серединної осі: $p \in \mathcal{M}(\mathcal{O}) \stackrel{def}{\Leftrightarrow} \exists p_1, p_2 \in \partial\mathcal{O}, p_1 \neq p_2 : \|p - p_1\| = \|p - p_2\| = \min_{q \in \partial\mathcal{O}} \|p - q\|$.

Задача 5. Знаходження областей близькості: за вхідним зображенням I , що містить $N \in \mathbb{N}$ об'єктів $\mathcal{O}_1, \mathcal{O}_2, \dots, \mathcal{O}_N$, побудувати розбиття площини π на області близькості: R_1, R_2, \dots, R_N , для яких виконується:

а) $R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_N = \pi$;

б) $p \in R_i \Leftrightarrow \forall j \in I_N \setminus \{i\} : d(p, \mathcal{O}_i) \leq d(p, \mathcal{O}_j)$, де $d(p, \mathcal{O}) = \inf_{q \in \mathcal{O}} \|p - q\|$.

Зауваження 3.3. Задача 5 полягає в розбитті зображення на області близькості, кожна з яких відповідає деякому об'єкту на зображенні. Отже, задача зводиться до побудови діаграми Вороного для множини довільних об'єктів на площині. **Підрозділ 3.5** присвячений розв'язанню цієї проблеми.

Задача 6. Визначення чисельних характеристик об'єктів на зображенні: за вхідним зображенням I , що містить об'єкт \mathcal{O} , обчислити характеристики \mathcal{O} , наприклад, периметр, площу, опуклість, округлість або сферичність.

Для ефективного розв'язування сукупності перелічених задач МЄАС має відповідати принципам універсальності, багатофункціональності, масштабованості та розширюваності, тому у **підрозділі 3.2** запропоновано багаторівневу модель мультиалгоритмічного середовища, що складається з таких етапів (рис. 3.1).

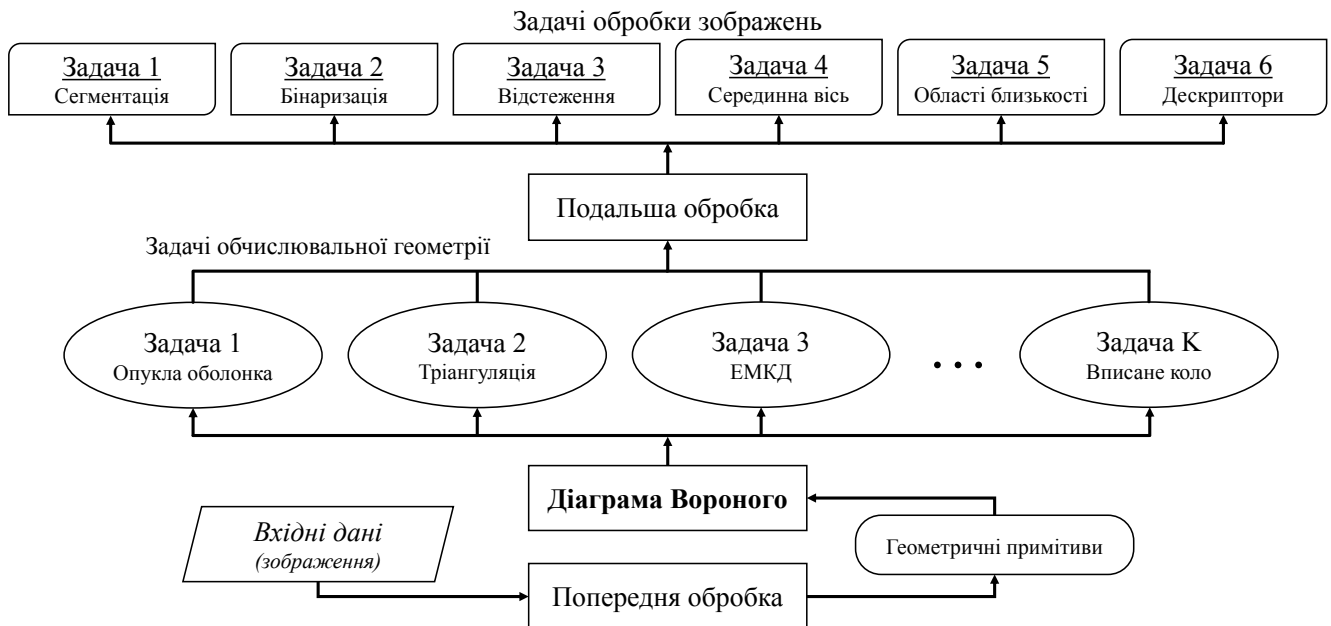


Рис. 3.1. Структура моделі єдиного алгоритмічного середовища

Етап 1. Попередня обробка вхідних даних призначена для перетворення та покращення зображень, виділення контурів об'єктів, представлення їх набором геометричних примітивів. Етап включає (рис. 3.2) піксельну обробку (покращення, фільтрацію) зображень; векторизацію об'єктів (виділення контурів, кряжів); обробку геометричних примітивів (оптимізацію форми, інтерполяцію, репараметризацію). На цьому етапі можливе розв'язання таких задач обробки зображень, як сегментація, бінаризація, відстеження, підрахунок дескрипторів.

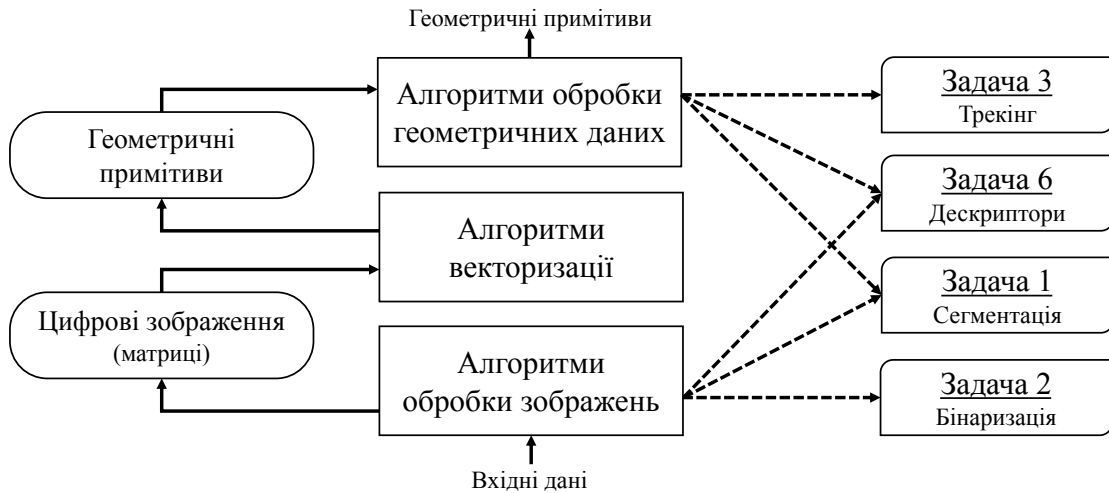


Рис. 3.2. Основні кроки етапу попередньої обробки МСАС

Етап 2. Побудова діаграми Вороного для множини геометричних примітивів та застосування редукції для розв'язання класу споріднених задач (рис. 2.14);

Етап 3. Подальша обробка включає в себе злиття результатів окремих підзадач та попередніх етапів для отримання кінцевого результату. На цьому етапі може виконуватися фільтрація графу діаграми Вороного для отримання скелетона об'єкта чи областей близькості для множини довільних об'єктів.

Для забезпечення цілісності та однорідності середовища МСАС має використовувати єдині уніфіковані структури даних:

- 1) *зображення*. Вхід та проміжні результати алгоритмів обробки зображень представлені дискретними зображеннями;
- 2) *геометричні об'єкти*: точки, відрізки, багатокутники та ламані;
- 3) *діаграма Вороного*, представлена РСПЗ, який також зберігає результати подальшої обробки (області близькості, скелетон тощо).

Теорема 3.1 (часова оцінка складності МСАС). Нехай $O(K_1), O(K_2), \dots, O(K_L)$ складності L кроків попередньої обробки, а $O(M_1), O(M_2), \dots, O(M_S)$ складності S кроків подальшої обробки відповідно; N – число пікселів вхідного зображення. Тоді МСАС має часову оцінку складності $O(N \log N + K + M)$, $K = \max_{i \in I_L} \{K_i\}$, $M = \max_{i \in I_S} \{M_i\}$, а $f = \max_{i \in I_S} \{f_i\} \stackrel{\text{def}}{\iff} f \in \{f_1, f_2, \dots, f_S\} \wedge \forall i \in I_S: f_i \in O(f)$.

Наслідок 3.2. Якщо $K_i = O(N)$, $M_j = O(N)$ тоді МСАС на основі діаграми Вороного має часову оцінку складності $O(N \log N)$.

Теорема 3.3 (оцінка використання пам'яті МСАС). Нехай L задач попередньої обробки потребують $O(K_1), O(K_2), \dots, O(K_L)$ пам'яті, а S задач подальшої обробки – $O(M_1), O(M_2), \dots, O(M_S)$ відповідно. Тоді МСАС потребує $O(N + K + M)$ пам'яті, де $K = \max_{i \in I_L} \{K_i\}$, $M = \max_{i \in I_S} \{M_i\}$, N – кількість пікселів вхідного зображення.

Наслідок 3.4. Якщо $K_i = O(N)$, $M_j = O(N)$, тоді МСАС на основі діаграми Вороного потребує $O(N)$ пам'яті.

У **підрозділі 3.3** описано деякі алгоритми обробки зображень: фільтри Гауса, Собеля, Кенні, алгоритм Франжі, бінарнізація за пороговим значенням, метод Оцу. **Підрозділ 3.4** містить базові алгоритми виділення контурів об'єкта: метод квадратів, алгоритм Мура, алгоритм Тео-Павлідіса, «рухомі квадрати».

У **підрозділі 3.5** узагальнено алгоритми побудови апроксимації діаграми Вороного для довільних об'єктів, що надають змогу розв'язати задачу розбиття на області близькості (задача 5). Акцент зроблено на алгоритмах на основі діаграми Вороного для точок або відрізків. Основними їх кроками є дискретизація множини вхідних кривих (об'єктів) на основі вибраної параметризації, побудова діаграми Вороного для простих об'єктів, обробка графа діаграми Вороного. У результаті проведеного аналізу встановлено, що алгоритми цього класу мають часову оцінку складності $O(N \log N)$, де N – кількість вибраних точок об'єктів.

Підрозділ 3.6 присвячений побудові серединної осі об'єкта на основі діаграми Вороного для відрізків. Нехай \mathcal{O} позначає об'єкт на площині, а його границя $\partial\mathcal{O}$ задається списком замкнутих контурів $\mathcal{P} = \{\mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2, \dots, \mathcal{P}_N\}$, де контур представлений багатокутником $\mathcal{P}_i = \{p_1^i, p_2^i, \dots, p_{M_i}^i\}$, $p_k^i \in \mathbb{R}^2, k = 1, \dots, M_i, i = 1, \dots, N$.

Припустимо, що контур \mathcal{P}_i об'єкта $\mathcal{O} \in G_1$ - неперервним за винятком скінченної підмножини вершин $W_i \subseteq \mathcal{P}_i, i = 1, \dots, N$, де контур G_0 - неперервний.

Означення 3.8. Вершина q називається *особливою* вершиною границі об'єкта, якщо існує багатокутник $\mathcal{P}_i \in \mathcal{P}$, де q є вершиною \mathcal{P}_i та $q \in W_i \neq \emptyset$.

Нехай L_i – множина ребер багатокутника $\mathcal{P}_i \in \mathcal{P}$, а U_i – множина його вершин. $L = \bigcup_{i=1}^N L_i, U = \bigcup_{i=1}^N U_i$ – множини всіх ребер та вершин $\mathcal{P}, S = L \cup U$.

Означення 3.9. *Серединною віссю* $\mathcal{M}(\mathcal{O})$ є така підмножина точок об'єкта \mathcal{O} , що для $p \in \mathcal{M}(\mathcal{O})$ існує щонайменше дві відмінні точки $p_1, p_2 \in \partial\mathcal{O}, p_1 \neq p_2$ на границі об'єкта $\partial\mathcal{O}$, для яких виконується $0 < \|p - p_1\| = \|p - p_2\|$:

$$\mathcal{M}(\mathcal{O}) = \left\{ p \in \mathcal{O} \mid \|p - p_1\| = \|p - p_2\| = \inf_{q \in \partial\mathcal{O}} \|p - q\|, p_1, p_2 \in \partial\mathcal{O}, p_1 \neq p_2 \right\}. (3.23)$$

Означення 3.10. *Наближеною діаграмою Вороного* $\mathcal{VD}_a(\mathcal{P})$ для плоского об'єкта, що заданий набором багатокутників \mathcal{P} , називається підграф G_P^a графа G_P діаграми Вороного $\mathcal{VD}(L)$ для множини ребер L багатокутників \mathcal{P} , який отримано шляхом видалення ребер графа G_P , що відповідають бісекторам між суміжними ребрами l_i, l_{i+1} багатокутника зі спільною *неособливою* вершиною p_i .

Означення 3.11. *Скелетом Вороного* $\mathcal{VS}(\mathcal{O})$ об'єкта \mathcal{O} , що представлений множиною багатокутників \mathcal{P} , називається підмножина діаграми Вороного, розташована всередині області R обмеженої багатокутниками множини \mathcal{P} .

Зауваження 3.1. Отже, скелет Вороного для \mathcal{P} обчислюється шляхом видалення ребер графа G_P^a , які не розташовані всередині області R .

Алгоритм 3.2 (побудова серединної осі)

1. Побудувати діаграму Вороного $\mathcal{VD}(S)$ для відрізків S , що утворюють ребра \mathcal{P} ; у результаті отримуємо граф $G_S = (V_S, E_S)$, де V_S, E_S – відповідно множини вершин та ребер діаграми Вороного. Кожній вершині $v \in V_S \setminus \{v_\infty\}$ діаграми Вороного відповідає коло радіуса $r(v)$ з центром $p(v)$.
2. За допомогою пошуку в ширину (BFS) визначити надлишкові вершини та ребра графа G_S . На цьому кроці здійснюється розподіл вершин та ребер діаграми Вороного за такими класами (псевдокод наведено в Додатку 1):
 - для вершин: клас «I» – внутрішня вершина G_S ; клас «O» – зовнішня вершина G_S ; клас «C» – особлива вершина G_S (співпадає з особливою

- вершиною деякого багатокутника з \mathcal{P}); клас « B » – гранична вершина G_S (співпадає з деякою неособливою вершиною багатокутника \mathcal{P});
- для ребер: клас « I » – внутрішнє ребро G_S відносно \mathcal{O} ; клас « O » – зовнішнє ребро G_S ; клас « C » – особливе ребро G_S (з'єднує особливу вершину G_S із внутрішньою вершиною G_S); клас « R » – надлишкове ребро G_S (з'єднує граничну вершину G_S із внутрішньою вершиною G_S).

Надлишковими є вершини класів « O », « B » та ребра класів « O », « R ».

3. Видалити з G_S надлишкові ребра та вершини, ізольовані вершини; отримати граф $G_{MAT} := (V_{MAT}, E_{MAT})$, $V_{MAT} \subseteq V_S$, $E_{MAT} \subseteq E_S$.

Одним із недоліків серединних осей, який значно ускладнює їх обробку та застосування у прикладних задачах, є чутливість перетворення серединної осі до незначних збурень (похибок) границі об'єкта $\partial\mathcal{O}$. Останні призводять до утворення надлишкових вершини та розгалужень. Тому у **підрозділі 3.6** досліджено методи регуляризації, які спрямовані на зменшення впливу випадкових шумів на результат перетворення серединної осі. Запропоновано новий алгоритм регуляризації серединної осі на основі методу мультиплікативного масштабування SAT та діаграми потужності (або діаграми Вороного для множини кіл).

Алгоритм 3.3 (регуляризація серединної, метод M-Scale)

1. Утворити множину масштабованих кіл $\mathcal{C}^s := \{C_v^s \mid v \in V_S\}$, де C_v^s – коло із центром $p(v)$, $v \in V_S$ та радіусом $s \cdot r(v)$, $s > 0$ – параметр регуляризації.
2. Побудувати діаграму потужності для \mathcal{C}^s .
3. Визначити такі вершини графа діаграми Вороного G_S , що відповідні їм кола множини \mathcal{C}^s повністю покриті хоча б одним іншим колом із множини \mathcal{C}^s . Позначимо таку множину $R_S \subseteq V_S$.
4. За допомогою BFS, що ініціалізується кінцевими вершинами G_S , послідовно видалити лише вершини $v \in R_S$ (у чергу додаються лише вершини $v \in R_S$).

Теорема 3.13. Алгоритм регуляризації M-Scale має часову оцінку складності $O((K + N) \log N)$, де $N := |\mathcal{C}^s|$, а K – кількість точок перетину множини кіл \mathcal{C}^s .

У **підрозділі 3.7** сформульовано основні теореми для побудови евристичних методів пришвидшення роботи МЄАС шляхом спрощення геометричних об'єктів. На прикладі задачі побудови скелетона було сформульовано критерій спрощення та досліджено евристичні алгоритми спрощення багатокутників і ламаних ліній.

Теорема 3.14. Нехай $\mathcal{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ – деякий простий багатокутник, l_i – відрізок, що з'єднує послідовні точки $p_i, p_{i+1} \in \mathcal{P}$, $i = 1, \dots, N$, $p_{N+1} = p_0$. Багатокутник \mathcal{P}' отримано шляхом розбиття відрізка l_i багатокутника \mathcal{P} – представлення l_i у вигляді ламаної, що складається з вершин $p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,R_i} \in l_i$, $i = 1, 2, \dots, N$ ($p_{i,1} = p_i$, $p_{i,R_i} = p_{i+1}$). Тоді скелетони Вороного $\mathcal{VS}(\mathcal{P})$, $\mathcal{VS}(\mathcal{P}')$, побудовані за допомогою алгоритму 3.2 на основі діаграми Вороного, співпадають (відстань Гаусдорфа між ними дорівнює нулю).

Зауваження 3.3. З теореми 3.2 слідує, що скелетон $\mathcal{VS}(\mathcal{P}')$ для багатокутника \mathcal{P}' співпадає зі скелетоном $\mathcal{VS}(\mathcal{P})$ для початкового багатокутника \mathcal{P} (рис. 3.15). Проте на відміну від $\mathcal{VS}(\mathcal{P})$ скелетон $\mathcal{VS}(\mathcal{P}')$ представлений більшою кількістю ребер та вершин Вороного. Отже, має місце поняття скелетона Вороного з

найменшою кількістю вершин та ребер. Застосування теореми 3.2 у зворотному напрямі дає змогу зменшити кількість вершин та ребер скелетона Вороного. Це у свою чергу пришвидшує побудову та обробку скелетона та зменшує обсяг пам'яті, необхідної для його збереження.

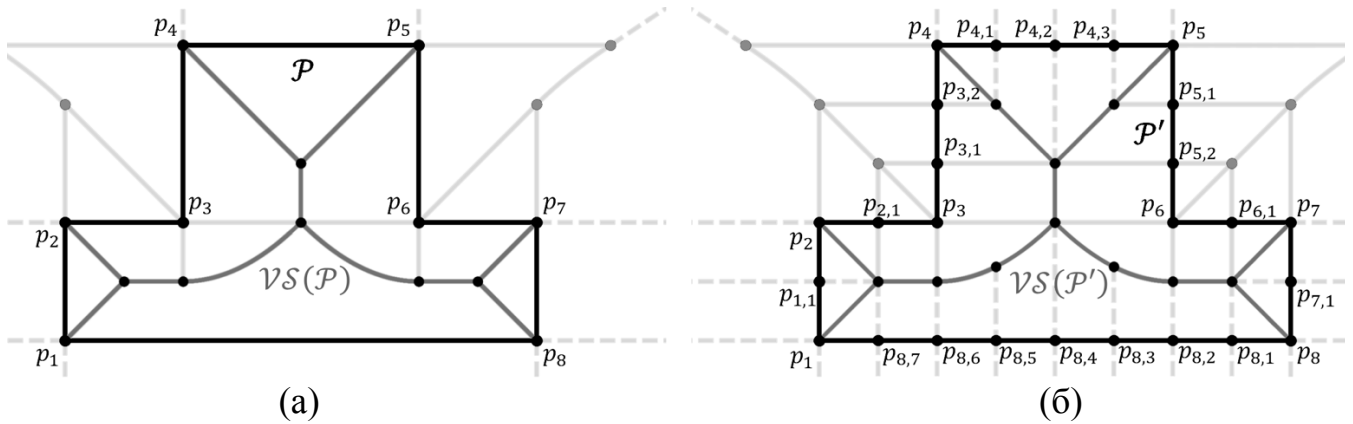


Рис. 3.15. Скелетони для багатокутників \mathcal{P} (ліворуч) та \mathcal{P}' (праворуч)

Отже, оптимізація алгоритму побудови скелетона націлена на розроблення швидкої та ефективної евристики спрощення багатокутників (для перетворення \mathcal{P}' у \mathcal{P}). Відповідно до теореми 3.2 процедура спрощення має задовольняти наступний критерій.

Лема 3.15 (Критерій спрощення, КС). Суміжні колінеарні ребра багатокутника можна представити єдиним прямим ребром без втрати точності отриманого результату.

Отже, на етапі обробки геометричних примітивів МЄАС виконується процедура спрощення багатокутників. При цьому алгоритм спрощення має задовольняти КС вище. У результаті аналізу наявних евристик спрощення (табл. 3.1) встановлено, що лише сім алгоритмів відповідають КС. Для визначення найефективнішого алгоритму з найменшими накладними витратами було проведено обчислювальні експерименти.

У четвертому розділі (підрозділ 4.1) описано результати тестування евристик спрощення на прикладі задачі побудови скелетона плоского об'єкта. Для визначення ефективності евристик та МЄАС загалом використано набір даних MPEG 7 CE-Shape-1. За допомогою алгоритму «рухомі квадрати» (що є складовою частиною МЄАС) отримано 1282 багатокутники, які представляють типові складні геометричні фігури в задачах обробки зображень.

Для оцінки ефективності МЄАС та евристик було обчислено такі величини:

1. Час виконання (мс) евристичних алгоритмів та МЄАС загалом.
2. Відстань Гаусдорфа для визначення похибки d_H між спрощеним багатокутником \mathcal{P}_S та еталоном \mathcal{P} , а також для обчислення відстані h_H між еталоном скелетона та результатом алгоритму;
3. Ступінь спрощеності (%) багатокутника:

$$SR(\mathcal{P}, \mathcal{P}_S) = \frac{|\mathcal{P}| - |\mathcal{P}'|}{|\mathcal{P}|} \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

де $\mathcal{P}_S, \mathcal{P}$ – відповідно спрощений багатокутник та еталон. $|\mathcal{P}|$ – кількість вершин \mathcal{P} .

Табл. 3.1. Огляд евристик спрощення багатокутників та ламаних

Назва алгоритму (аббревіатура)	оцінка складності		Задовольняє КС?
	середня	найгірша	
Рамер-Дуглас-Пекер (DP)	$O(N \log N)$	$O(N^2)$	так (+)
Вісвалінгам-Уайат (VW)	$O(N \log N)$	$O(N \log N)$	так (+)
Рейман-Уіткем (RW)	$O(N)$	$O(N)$	так (+)
Опхайм (OP)	$O(N)$	$O(N)$	так (+)
Ланг (LA)	$O(NK)$	$O(NK^2)$	так (+)
Чжао-Заальфельд (ZS)	$O(N)$	$O(N)$	так (+)
Рапсо (RA)	$O(N)$	$O(N)$	ні (-)
Лі-Опеншав (LO)	$O(N)$	$O(N)$	ні (-)
N-та точка (NP)	$O(N)$	$O(N)$	ні (-)
Точки у колі (CI)	$O(N)$	$O(N)$	ні (-)
Перпендикулярна відстань (PD)	$O(NK)$	$O(N)$	так (+)

Аналіз результатів експериментів показав, що найшвидшими є евристики DP та VW. Вони зменшують час обробки в середньому на 30% для допустимої похибки $d_H=10^{-3}$, при цьому $h_H=0.21$ (DP), $h_H=0.31$ (VW). Удвічі повільніші OP та RW дають результат із найменшою похибкою ($h_H \approx 5 \cdot 10^{-3}$ для $d_H=10^{-3}$). Проте при $d_H < 0.002$ ці алгоритми мають значні накладні витрати: час виконання задачі з OP (370 мс) або RW (324 мс) перевищує час виконання без оптимізації (224 мс). Отже, для задач з критичною допустимою похибкою, що не перевищує 0.002, пришвидшення досягається за допомогою OP або RW. Для задач із критичним часом виконання доцільно використовувати евристики DP або VW.

У **підрозділі 4.2** протестовано ефективність методів регуляризації серединної осі на наборі даних MPEG 7 CE-Shape-1. Об'єкти деформовано з додаванням випадкового шуму різної амплітуди $\delta \leq 1.0$. У результаті порівняльного аналізу встановлено, що для всіх значень δ алгоритм “angle” має найменшу точність (при $\delta=1.0$ похибка “angle” – 0.25, M-Scale – 0.11, λ -axis – 0.05). Для $\delta \geq 0.5$ метод M-Scale має більшу похибку, ніж λ -axis, проте для $\delta < 0.5$ їх точності не відрізняються ($3.1 \cdot 10^{-3}$ для $\delta=10^{-3}$). Встановлено, що M-Scale у комбінації з “angle” чи λ -axis дає змогу зменшити похибку результату на 10% порівняно з окремими алгоритмами.

У **підрозділі 4.3** описано інший обчислювальний експеримент для визначення швидкодії МЄАС. Розглянуто задачу підрахунку складеного дескриптора форми об'єкта, що включає дві компоненти:

- 1) *опуклість* об'єкта \mathcal{O} – відношення периметра $CH(\mathcal{O})$ до периметра \mathcal{O} ;
- 2) *сферичність* – відношення радіуса r_p найбільшого вписаного у \mathcal{O} кола до радіуса R_p найменшого кола, що повністю покриває \mathcal{O} .

Обчислення складеного дескриптора виконувалося двома способами:

- 1) за допомогою МЄАС, де побудову опуклої оболонки та знаходження найбільшого вписаного кола виконано за $O(N)$ за допомогою діаграми Вороного;
- 2) кожна компонента підрахована окремим алгоритмом. Для $CH(P)$ використовувався алгоритм Грехема зі складністю $O(N \log N)$;

У результаті тестування на наборі даних MPEG 7 CE-Shape-1 визначено, що розв'язок на основі МЄАС без оптимізації (1) працює в середньому на 20% швидше, ніж альтернативний спосіб (2), тоді як уведення етапу оптимізації пришвидшує виконання в середньому в 10 разів при максимальній похибці 1,0%.

Підрозділ 4.4 присвячений особливостям програмної реалізації МЄАС, її основним компонентам. Програмний прототип МЄАС та його окремі модулі було реалізовано мовами програмування C++ та Python. Для імплементації графічного та модульних інтерфейсів використано бібліотеку Qt.

У **п'ятому розділі** наведено приклади застосування МЄАС для прикладних задач обробки зображень. **Підрозділ 5.1** присвячений побудові скелетона плоскої фігури за допомогою МЄАС. У **підрозділі 5.2** наводиться детальний опис розробленого у межах МЄАС алгоритму сегментації та відстеження клітинних структур на основі методу активних контурів. Зокрема, у межах МЄАС покращено алгоритм відстеження кривих. Розроблено новий метод обробки кінців кривої шляхом мінімізації запропонованої функції вартості. У результаті порівняльного аналізу було встановлено, що для задачі трекінгу клітинних філаментів запропонований метод надає змогу отримати в середньому в 1.5 раза точніший результат, ніж існуючі методи. **Підрозділ 5.3** присвячений задачі сегментації мережі багатополярних нейронів на флуоресцентних зображеннях. За допомогою МЄАС виконано реконструкцію топології мережі, що має прикладне значення для досліджень у нейробиології. У **підрозділі 5.4** представлено приклад застосування МЄАС для сегментації судин сітківки ока. **Підрозділ 5.5** присвячений розробці алгоритму сегментації окремих клітин епітеліальної тканини.

У шести **додатках** наведено порівняльний аналіз алгоритмів регуляризації МЄАС, псевдокод деяких процедур обробки діаграми Вороного, частини програмного коду МЄАС, приклади роботи МЄАС, подано список публікацій здобувача, а також відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

Головним результатом дисертаційної роботи є побудова моделі алгоритмічного середовища на основі діаграм Вороного, що дає змогу вирішити важливу наукову проблему створення єдиного середовища для ефективного розв'язування класу задач обробки та аналізу зображень.

У дисертаційній роботі отримано такі результати. Уперше:

1. Побудовано модель єдиного алгоритмічного середовища (МЄАС) на основі діаграм Вороного для розв'язування таких класів задач обробки зображень: сегментація та бінаризація; відстеження об'єктів на послідовності зображень; побудова серединної осі; визначення областей близькості для множини об'єктів; підрахунок чисельних характеристик об'єктів.
2. Узагальнено алгоритми побудови апроксимації діаграми Вороного для множини довільних об'єктів на площині, що дає змогу отримати наближений розв'язок задачі визначення областей близькості;
3. Узагальнено у межах МЄАС алгоритми на основі діаграми Вороного для побудови скелетона об'єкта з порожнинами. Встановлено, що порівняно з

методами потоншення такі алгоритми дають скелетон із субпіксельною точністю, що інваріантний до повороту та масштабування.

4. Розроблено евристичний підхід, який пришвидшує роботу МЄАС шляхом спрощення форми об'єкта. Сформульовано та доведено основні теореми для евристичних методів оптимізації, а також критерій спрощення форми об'єкта, що є основою побудови евристичних алгоритмів.
5. Проаналізовано наявні алгоритми спрощення багатокутників та перевірено їх відповідність критерію оптимізації. У результаті було визначено сім евристичних алгоритмів, що дають змогу оптимізувати роботу МЄАС.
6. Проведено обчислювальні експерименти на наборі даних MPEG-7 CE Shape-1 для визначення найефективніших евристик. Встановлено, що найбільше пришвидшення (на 30% для похибки 10^{-3}) досягається за допомогою евристик Рамера-Дугласа-Пекера та Вісвалінгама-Уайата. Визначено, що евристики можуть погіршувати точність результату, тому розроблено правила їх застосування залежно від критичних вимог системи (часу та точності).
7. Запропоновано новий підхід M-Scale для регуляризації серединної осі на основі діаграми Вороного для множини кіл та методу мультиплікативного масштабування. У результаті проведеного порівняльного аналізу встановлено, що алгоритми M-Scale та λ -серединна вісь є найефективнішими алгоритмами регуляризації (з найменшою похибкою), а застосування комбінації алгоритмів M-Scale та λ -серединна вісь надає можливість покращити точність регуляризації на 10% у порівнянні з окремими алгоритмами.
8. Реалізовано програмний прототип МЄАС на принципах модульності, розширюваності, універсальності структур даних. На прикладі задачі підрахунку складеного дескриптора форми об'єкта (опуклість, округлість) встановлено, що МЄАС без оптимізації дає змогу зменшити час виконання на 20% у порівнянні з іншими алгоритмами. Введення етапу оптимізації дозволяє пришвидшити виконання в середньому в 10 разів при максимальній похибці 1,0%.
9. Реалізовано алгоритм трекінгу відкритих кривих на основі активних контурів. Запропоновано новий метод обробки кінців кривої шляхом мінімізації введеної функції вартості. Встановлено, що він дає змогу отримати в 1.5 раза точніший результат, ніж наявні методи для задачі відстеження філаментів.
10. Розроблену МЄАС було успішно застосовано для розв'язання важливих прикладних задач обробки біологічних та медичних зображень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях України та наукових періодичних виданнях інших держав:

1. Коцур Д.В., Терещенко В.М. Побудова діаграми Вороного для об'єктів довільної форми. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: фізико-математичні науки.* №1. 2014. С.145-148.

2. Коцур Д.В., Терещенко В.М. Застосування моделей активних контурів у задачах трекінгу структур цитоскелету. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: фізико-математичні науки.* №4. 2016. С.74-77

3. Коцур Д.В. Алгоритм побудови діаграми Вороного на двовимірній сітці з L_p нормою. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: фізико-математичні науки.* №4. 2017. С.54-58.

4. Коцур Д.В. Порівняльний аналіз алгоритмів спрощення багатокутників та ламаних ліній. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.* №2. 2018. С.5-12.

5. Kotsur D., Voronoi-based skeletonization algorithm for segmenting the network of biological neurons. *Journal «Radio Electronics, Computer Science, Control», ZNTU.* Volume 48(1). 2019. P.98-109.

6. Kotsur D., Yakobenchuk R., Leube R.E., Windoffer R., Mattes J. An Algorithm for Individual Intermediate Filament Tracking. *Processing and Analysis of Biomedical Information.* Springer. Volume 11379. 2019. P.66-74.

7. Kotsur D., Tereshchenko V. *Optimization Heuristics for Computing the Voronoi Skeleton.* *Computational Science.* ICCS 2019. Springer. Volume 11536. 2019. P.96-111.

Тези доповідей на міжнародних наукових конференціях:

8. Kotsur D., Tereshchenko V., Tereshchenko Y. Point set triangulation using Graham's scan. *Proceedings of the 5th International Conference on Innovative Computing Technology.* Galicia, Spain, 20-22 May 2015. P.148-151.

9. Kotsur D., Leube R.E., Windoffer R., Mattes J. Active contour models for individual keratin filament tracking. *Proceedings of the OAGM & ARW Joint Workshop on Vision, Automation and Robotic.* Graz, Austria, 10-12 May 2017. P.109-110.

10. Kotsur D., Yakobenchuk R., Mattes J., Leube R.E., Windoffer R. Automated detection, tracking and motion analysis of cytoskeletal keratin filaments in microscopic time-lapse fluorescence recordings. *Proceedings of Quantitative BioImaging Conference (QBI).* Göttingen, Germany, 4-6 January 2018. P.180.

11. Kotsur D., Windoffer R., Leube R.E., Pereverzyev S., Mattes J. Parameters estimation of active contour models for the problem of automatic cellular filaments tracking. *Proceedings of the 4th conference «Approximation Methods for Molecular Modelling and Diagnosis Tools».* Malekhiv, Ukraine, 19-23 March 2018. P.12.

12. Kotsur D., Tereshchenko Y., Tereshchenko V. A fast approximation of the Voronoi diagram for a set of pairwise disjoint arcs. *Proceedings of the 26th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision.* Plzen, Czech Republic, 28 May – 1 June 2018. P.7-12.

АНОТАЦІЯ

Коцур Д. В. Побудова моделі єдиного алгоритмічного середовища на основі діаграми Вороного для розв'язування комплексу задач обробки зображень. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.05.01 – теоретичні основи інформатики та кібернетики. –

Київський національний університет імені Тараса Шевченка МОН України, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена розробленню моделі мультиалгоритмічного середовища (МЄАС) на основі діаграми Вороного для розв'язування класу таких задач обробки зображень, як сегментація, бінаризація, відстеження, побудова скелетона об'єкта, знаходження областей близькості, обчислення дескрипторів.

Уперше розроблено багаторівневу структуру МЄАС, що включає етапи попередньої обробки, побудови діаграми Вороного, подальшої обробки та злиття результатів. Для пришвидшення МЄАС запропоновано евристичні спрощення об'єктів. У межах МЄАС реалізовано нові алгоритми для регуляризації серединної осі та відстеження кривих на послідовності зображень. Узагальнено алгоритми побудови серединної осі та діаграми Вороного для довільних об'єктів. МЄАС успішно застосовано для таких прикладних задач обробки біомедичних зображень, як сегментація нейронних мереж, цитоскелета та мембрани клітин, виділення судинної системи сітківки ока, відстеження клітинних філаментів.

Ключові слова: модель єдиного алгоритмічного середовища, діаграма Вороного, обробка зображень, сегментація, відстеження, серединна вісь, скелетон.

АННОТАЦИЯ

Коцур Д. В. **Построение модели единой алгоритмической среды на основе диаграммы Вороного для решения комплекса задач обработки изображений.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.05.01 – теоретические основы информатики и кибернетики. – Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Министерство образования и науки Украины, Киев, 2019.

Диссертационная работа посвящена разработке модели мультиалгоритмической среды на основе диаграммы Вороного для решения комплекса таких задач обработки изображений, как сегментация, бинаризация, отслеживание, построение скелетона объекта, нахождение областей близости, вычисление дескрипторов.

Впервые было разработано многоуровневую структуру МЕАС, которая включает этапы предварительной обработки, построения диаграммы Вороного, последующей обработки и слияния результатов. Для ускорения МЕАС предложено эвристики упрощения объектов. В рамках МЕАС реализованы новые алгоритмы для регуляризации срединной оси и отслеживания кривых на последовательности изображений. Обобщены алгоритмы построения срединной оси и диаграммы Вороного для произвольных объектов. МЕАС успешно применен для таких прикладных задач обработки биомедицинских изображений, как сегментация нейронных сетей, цитоскелета и мембраны клеток, выделение сосудистой системы сетчатки глаза, отслеживание клеточных филаментов.

Ключевые слова: модель единой алгоритмической среды, диаграмма Вороного, обработка изображений, сегментация, трекинг, срединная ось, скелетон.

ANNOTATION

Kotsur D. V. Constructing the model of unified algorithmic environment for solving the complex image processing problems based on the Voronoi diagram. – Manuscript.

Dissertation thesis for acquiring the degree of a Candidate of Mathematical and Physical Sciences in specialty 01.05.01 – Theoretical Foundations of Computer Science and Cybernetics. – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

Image processing and analysis problems are essential components of human's life. The invention of computers ignited a new era of digital image processing. Nowadays the state-of-the-art investigations in field of chemistry, biology, and medicine rely on the processing and analysis of the enormous amounts of data from the various sources: scanners, digital cameras, microscopes, computer tomographs, and others. The analysis of such data is very time-consuming and requires the training of the qualified staff. Therefore, the development of efficient automated methods for solving the image processing problems is extremely relevant and prospective research direction.

In recent years, several multipurpose image analysis platforms have been developed: ImageJ, IMARIS, iLastic. Despite such advantages as ease of use, user-friendliness, and a sizeable algorithmic core, existing systems still have efficiency issues and do not provide the desired results. Therefore, the development of an efficient multi-algorithmic model of an environment for solving image processing problems is of high relevance.

The Model of Unified Algorithmic Environment (MUAE) aims to solve the efficiency problem above. It was initially proposed by V. M. Tereshchenko for complex computational geometry problems. In particular, the author proposed a concept and methodology of highly efficient parallel-recursive tools for geometric modeling and visualization. Computational geometry methods are fundamental for many image processing algorithms. Therefore, the expansion of MUAE for image processing problems based on geometric data structures is a promising direction of research.

The main focus of this thesis is on the development of the Model of Unified Algorithmic Environment for solving the complex image processing problems based on the Voronoi diagram. The latter is chosen as a core of MUAE since it can be efficiently computed in $O(N \log N)$ operations, where N is the number of objects. The Voronoi diagram solves many related geometrical problems. In particular, the closest pair, all nearest neighbors, Euclidean minimum spanning tree, convex hull, the largest empty circle problems reduce to the Voronoi diagram in $O(N)$ operations.

The proposed concept of MUAE for image processing tasks consists of three stages. The first stage is the preprocessing of an input image. It includes image enhancement and filtration steps, vectorization of objects in an image (contour tracing), processing the geometric primitives (shape optimization, interpolation, reparameterization). At the second stage, the Voronoi diagram for a set of simple objects is constructed. It solves a class of related computational geometry problems. The third stage involves post-processing and merging of the data of subtasks or previous stages. At this stage, the Voronoi graph is processed to obtain the skeleton or approximate Voronoi diagram for arbitrary objects.

The concept of MUEA allows us to generalize Voronoi-based algorithms for constructing the proximity regions, medial axis (MA) and the skeleton of an object. The analysis showed that these methods have time complexity $O(N \log N)$, where N is the number of points representing the object(s).

The medial axis transform (MAT) is sensitive to small errors and random perturbations of the object's boundary. Thus, the development of appropriate regularization schemes is of high relevance. This thesis introduces a novel algorithm named M-Scale for regularizing MAT. The algorithm is based on the scale axis transform (SAT) and the Voronoi diagram for circles. The efficiency of M-Scale was compared to the existing regularization methods – angle method and λ -axis. The analysis revealed that M-Scale and λ -axis are the most efficient regularization algorithms. Moreover, their combination improves accuracy by approximately 10% in comparison to the individual algorithms.

This thesis introduces the heuristic approach for accelerating the MUAE by simplifying the object's shape. The main results were formulated as theorems and formally proved. As a result, the shape simplification criterion was established. This enables the development of efficient optimization heuristics for MUAE.

The analysis of existing polygon simplification algorithms revealed seven heuristics that agree with the proposed criterion. The efficiency of the heuristics was evaluated by conducting computational experiments. For different error levels, the following quantities were measured: accuracy of the results, the overhead execution time of heuristics, execution time of MUAE. As a result, Ramer-Douglas-Peucker and Visvalingam-Whyatt heuristics exhibit the highest acceleration (by 30% for error level 10^{-3}). Algorithms of Opheim and Reumann-Witkam despite the highest accuracy degrade the overall system's performance. Thus, this thesis establishes the rules enabling the selection of appropriate heuristics depending on critical system requirements (time and accuracy).

The implemented software prototype of MUAE fulfills the principles of modularity, extensibility, and uniformity of data structures. The conducted computational experiments demonstrate the efficiency of the MUAE-based solution in comparison to individual algorithms. For the analysis, the problem of computing two-component shape descriptor (convexity and sphericity) was considered. The experiments revealed that MUAE without optimization reduces the execution time by 20%. Moreover, the optimization step improves the execution time by approximately ten times with a maximum error of 1.0%.

A newly-introduced active contour-based tracking algorithm successfully solved the problem of open curve tracking. The essential part of this algorithm is a novel method for processing the endpoints by minimizing the suggested penalty function. The evaluation of the proposed method on the filament tracking dataset showed that it increases the accuracy by 1.5 times (Fréchet metric) in comparison to similar algorithms.

The MUAE was successfully applied for solving the following biomedical problems: (1) segmentation of the filament-like cellular structures using fluorescence images; (2) tracking of filamentous structures on a sequence of images; (3) segmentation of biological neural networks, identification of cell bodies, axons and dendrites; (4) segmentation of the retinal vascular system, reconstruction of its topology.

Keywords: Model of Unified Algorithmic Environment (MUAE), Voronoi diagram, image processing, segmentation, tracking, medial axis, skeleton.