

Національний університет “Львівська політехніка”

Тушницький Руслан Богданович

УДК 004.93'14

**МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ІЄРАРХІЧНОЇ ДЕКОМПОЗИЦІЇ, ІНДЕКСУВАННЯ,
КЛАСИФІКАЦІЇ ТА АНАЛІЗУ ВІЗУАЛЬНИХ ОБРАЗІВ**

Спеціальність 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення
обчислювальних машин і систем

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті “Львівська політехніка”
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Мельник Роман Андрійович,
Національний університет “Львівська політехніка”
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри програмного забезпечення

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Воробель Роман Антонович, Фізико-механічний
інститут ім. Г.В. Карпенка Національної академії
наук України, завідувач відділу обчислювальних
методів і систем перетворення інформації

кандидат технічних наук, доцент
Березький Олег Миколайович, Тернопільський
національний економічний університет Міністерства
освіти і науки України, в.о. завідувача кафедри
комп'ютерної інженерії

Захист відбудеться 18 червня 2010 р. о 16⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті “Львівська політехніка”
(79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12).

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці
Національного університету “Львівська політехніка” (79013, м. Львів,
вул. Професорська, 1).

Автореферат розіслано 14 травня 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



Р. А. Бунь

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Широке використання різних інформаційних технологій зумовлює актуальність проблеми розпізнавання образів. Задачі індексування та пошуку зображень на основі їх вмісту (Content-based image retrieval – CBIR) у графічних базах даних із мільйонами образів є актуальними в інформаційних системах. Ефективна класифікація зображень зменшує час опрацювання їх фільтруванням класів образів під час пошуку подібних до них. Існує велика кількість підходів до розв’язання цих задач, проте жоден не дає повної однозначності пошуку. Тому є потреба у розробленні нових методів декомпозиції, індексування й екстракції адекватних характеристик образу, що дасть змогу охопити повніше проблематику.

У розвиток теоретичних і практичних основ обробки і розпізнавання зображень, формування простору ознак значний внесок зробили дослідження українських і закордонних учених: О.Г. Івахненка, В.В. Грицика, Р.А. Воробеля (методи покращення зображень); С.В. Абламейка, В.П. Машталіра (кореляційні методи опрацювання); Є.П. Путятіна, Б.П. Русина, R.C. Gonzales, A.K. Jain, В.К.Р. Horn, W.K. Pratt (теоретичні та прикладні основи опрацювання зображень); М.І. Шлезінгера, J.Z. Wang (статистичні методи кластеризації) та ін. Розробці методології розв’язування оптимізаційних комбінаторних задач, методів та підходів ієрархічної декомпозиції присвячено роботи Р.П. Базилевича, Р.А. Мельника. Класичними роботами з проектування й розробки принципів створення систем класифікації є роботи О.Є. Єрмакова, І.Є. Кураленка, І.А. Мельчука, І.С. Некрестьянова, В.В. Плешка, І.І. Попова, S. Kaski, T. Kohonen, K. Lagus, G. Salton, van Rijsbergen та інших авторів.

Отримані результати не розв’язують повністю задачі пошуку зображень. Сучасні потреби пошуку та обробки візуальних образів не завжди мають відповідне математичне забезпечення. Тому відсутні програмні засоби, які б давали точні розв’язки задачі пошуку образів. У зв’язку з цим виникає актуальна потреба розроблення нових і вдосконалення існуючих ефективних математичних моделей, методів обчислення й алгоритмів, математичного та програмного забезпечення як складових системи автоматизованого індексування та пошуку візуальних образів, а також підвищення швидкодії та точності систем пошуку зображень. Тому задача класифікації, індексування та пошуку зображень в базах даних є актуальною.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до наукової програми кафедри “Програмне забезпечення” Національного університету “Львівська політехніка”. А також при виконанні теми “Алгоритми та програмне забезпечення декомпозиції, апроксимації візуальних образів для їх збереження та розпізнавання на основі кластерного аналізу”, № держ. реєстр. 0108U005038 (дисертантом розроблено структурні коефіцієнти зображення, методи

класифікації візуальних образів за згортанням ключів (вектора ознак) образів, та за їхніми структурними властивостями).

Мета роботи і завдання дослідження. Метою роботи є розроблення математичного і програмного забезпечення ієрархічної декомпозиції, індексування, класифікації та аналізу візуальних образів для пошуку їх у графічних базах даних.

Для досягнення поставленої мети розв'язано такі завдання:

1. Аналіз актуальності, потреб, стану систем пошуку та опрацювання зображень на основі їх вмісту, огляду сучасних засобів проектування систем індексування та пошуку візуальних образів.
2. Розробка нових методів декомпозиції образу, оптимізація алгоритмів для зменшення їх складності, екстракція властивостей образу для формування його ключа, класифікація образів.
3. Формалізація й обґрунтування математичних моделей процесів індексування та пошуку зображень за ключами.
4. Розроблення програмного забезпечення на основі створеного математичного забезпечення.
5. Верифікація розроблених математичних моделей, методів та алгоритмів шляхом тестових досліджень і визначення точності та достовірності одержаних результатів.

Об'єктом дослідження є процес пошуку зображень на основі структурних властивостей у графічних базах даних.

Предметом дослідження є методи і засоби алгоритмічної і програмної підтримки пошуку зображень в графічних базах даних.

Методи дослідження. Математичні моделі процесів пошуку зображень розроблені з використанням теорії кластерного аналізу, теорії графів, математичної статистики; для створення програмного забезпечення застосована теорія об'єктно-орієнтованого програмування.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблено метод розв'язання задачі пошуку візуальних образів з допомогою 4-D структурних коефіцієнтів, які отримані в результаті кластерного аналізу, що дало змогу у порівнянні з іншими підходами підвищити точність пошуку образів.

2. Вперше розроблено методи класифікації візуальних образів за згортанням ключів образів, а також за їхніми структурними властивостями, що уможливило прискорення пошуку образів зменшенням робочої області.

3. Розвинуто, вдосконалено класичний ієрархічний агломеративний алгоритм за рахунок триступеневої кластеризації, що забезпечило можливість адаптуватись до характерних особливостей зображень при їх опрацюванні.

4. Дістали подальший розвиток методи каскадної декомпозиції даних та простору, за рахунок чого збільшено швидкодію алгоритмів, зменшено область

пошуку оптимальних розв'язків (множину вхідних елементів) та обчислювальні ресурси для розв'язання задач кластеризації зображень з кращими показниками точності декомпозиції, ніж відомі.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Комплекс прикладних програм, створений на основі розроблених математичних моделей, відкриває можливості для декомпозиції, індексування та пошуку зображень в галузі обробки та розпізнавання образів, зокрема забезпечує підвищення точності пошуку образів в середньому на 15%.

2. Розроблені 4-D структурні коефіцієнти дають змогу кількісно та якісно аналізувати біомедичні зображення, досліджувати зміни поверхні та структури матеріалів.

3. Розроблені математичні моделі процесів індексування та пошуку візуальних образів відкривають можливість застосовування в автоматизованих системах пошуку зображень на основі їх вмісту.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені при виконанні робіт пошуку та опрацювання зображень лінійчастих спектрів у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка національної академії наук України, а також використані у навчальному процесі Національного університету “Львівська політехніка” при читанні курсу лекцій з дисциплін “Методи розпізнавання образів”, “Методи та алгоритми опрацювання зображень”, що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані дисертантом самостійно. У роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать: [1, 15, 19] – розробка 4-D інтегральних та розподілених структурних властивостей зображення; [2] – дослідження методу 3-ступеневої кластеризації для аналізу зображень структури; [3] – розробка методу класифікації зображень за згортанням їх ключів; [4, 18] – розробка методу класифікації зображень за їх структурними властивостями; [5, 17] – формалізація процесів індексування та пошуку зображень; [7] – дослідження методу 3-ступеневої кластеризації для опрацювання біомедичних мікрооб'єктів; [8, 20] – розробка методу ітераційної декомпозиції для опрацювання зображень лінійчастих спектрів; [9, 16] – розробка методу 3-ступеневої кластеризації образів; [10, 22] – розробка методів керування параметрами кластера для алгоритму декомпозиції сірих зображень; [11, 23] – розробка методу каскадної кластеризації ключів образів; [12] – розробка методів сканування зображення; [13, 24] – розробка коефіцієнта швидкості для декомпозиції даних великої розмірності; [14, 25] – розробка методів багатокаскадної декомпозиції даних та двокаскадної декомпозиції простору; [21] – розробка методу декомпозиції зображень; [26] – дослідження параметрів простору даних під час двокаскадної кластеризації; [27] – аналіз методів опрацювання зображень об'єктів розвідки засобами ієрархічної кластеризації;

[28] – аналіз методів виділення контурів об’єктів для аналізу друкованої плати кластеризацією.

Апробація результатів дисертації. Результати теоретичних і практичних досліджень доповідалися й обговорювалися на: Міжнародній науково-технічній конференції “Досвід розробки та застосування приладотехнологічних САПР в мікроелектроніці”, CADSM (Львів-Поляна, 2007, 2009 рр.); Міжнародній конференції “Комп’ютерні науки та інформаційні технології”, CSIT (Львів, 2007, 2008, 2009 рр.); Міжнародній конференції молодих науковців “Комп’ютерні науки та інженерія”, CSE’07 (Львів, 2007 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп’ютерної інженерії”, TCSET’08 (Львів-Славсько, 2008 р.); 1-й Всеукраїнській науково-практичній конференції “Перспективи розвитку озброєння і військової техніки в збройних силах України”, ВНТК ЛІСВ “ЛП”-2008 (Львів, 2008 р.); Міжнародній конференції “Нейронні мережі та штучний інтелект”, ICNNAI’2008 (Мінськ, Білорусь, 2008 р.); Міжнародній конференції молодих вчених “Перспективні технології і методи проектування МЕМС”, MEMSTECH (Львів-Поляна, 2008, 2009 рр.); Всеукраїнській Міжнародній конференції “Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів”, УкрОБРАЗ’08 (Київ, 2008 р.); Міжнародній конференції “Сучасні комп’ютерні системи та мережі: розробка та використання”, ACSN (Львів, 2009 р.); Міжнародній конференції-форумі “Інформаційні системи і технології”, IST’2009 (Мінськ, Білорусь, 2009 р.); наукових семінарах кафедри “Програмне забезпечення” Національного університету “Львівська політехніка” (2007, 2008, 2009 рр.).

Публікації. За результатами проведених досліджень опубліковано 28 друкованих праць, з яких 14 праць у наукових фахових виданнях з переліку, затвердженого ВАК України, 14 тез доповідей у матеріалах всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота містить вступ, шість розділів, висновки з роботи, список використаної літератури, додатки. Повний обсяг дисертації 220 сторінок, з яких 150 сторінок машинописного тексту, список використаних джерел з 231 найменування на 24 сторінках. У тексті є 103 рисунки та 30 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету роботи та задачі дослідження, вказано наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, а також подано інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та наявні публікації.

В першому розділі проведено аналіз існуючих систем пошуку візуальних образів. Досліджено існуючі відомі системи пошуку зображень на основі їх вмісту. На підставі аналізу літературних джерел, відзначено основний недолік, через який наявні системи пошуку зображень є неефективними або такими, що не відповідають сучасним вимогам щодо пошуку зображень – недостатня точність пошуку, зумовлена складністю опису зображення. В розділі описано завдання досліджень, сформовано вимоги щодо математичного та програмного забезпечення системи пошуку зображень на основі їх вмісту.

У результаті проведеного аналізу сформульовано основні завдання дисертаційного дослідження.

У другому розділі формалізовано задачу пошуку візуальних образів, розроблено триступеневий метод ієрархічної кластеризації та досліджено його алгоритмічну складність.

У загальному вигляді задача пошуку візуальних образів за їх вмістом полягає у формуванні набору зображень релевантних (подібних) до образу-запиту користувача, розташованих в порядку зменшення релевантності, при цьому необхідно вибрати оптимум між мінімізацією часу пошуку та максимізацією релевантності образів.

Для опису математичної моделі задачі пошуку візуальних образів використовуються:

1. Множина P всіх зображень у базі даних, що складається з n класів зображень:

$$P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\} = \{\{p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1k}\}, \dots, \{p_{n1}, p_{n2}, \dots, p_{nm}\}\}. \quad (1)$$

Під класом зображень P_i ($i = \overline{1, n}$) розуміємо набір із m візуальних образів p_{ij} ($j = \overline{1, m}$), згрупованих за вибраними ознаками.

2. Множина I відповідних індексів зображень:

$$I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\} = \{\{i_{11}, i_{12}, \dots, i_{1k}\}, \dots, \{i_{n1}, i_{n2}, \dots, i_{nm}\}\}. \quad (2)$$

Кожен індекс являє собою набір із g ключів образу, де кожен ключ – набір із r характеристик зображення:

$$i = \{i_1, \dots, i_g\} = \{\{k_{11}, k_{12}, \dots, k_{1r_1}\}, \dots, \{k_{g1}, k_{g2}, \dots, k_{gr_g}\}\}. \quad (3)$$

Пошук зображень здійснюється за одним із ключів.

3. Вхідний образ-запит користувача p_u , що належить певному класу P_u :

$$p_u \in P_u. \quad (4)$$

Оптимізаційна задача полягає у знаходженні за образом-запитом користувача p_u множини образів P_{res} ($P_{res} \subseteq P$):

$$P_{res}(p_u) = \{P_1(I_1), \dots, P_v(I_v)\} = \{\{p_{11}(i_{11}), \dots, p_{1q}(i_{1q})\}, \dots, \{p_{v1}(i_{v1}), \dots, p_{vs}(i_{vs})\}\}, \quad (5)$$

що задовільняє одну з умов:

$$f(P_{res}, P_u) \rightarrow \max, \quad v \rightarrow \min, \quad d(i_u(p_u), i(p)) \rightarrow \min, \quad \overline{q, s} \rightarrow \max, \quad (6)$$

$$t \rightarrow \min, \quad (7)$$

де $p \in P$, $i \in I$; f – функція релевантності класів набору P_{res} щодо класу образу-запиту P_u ; v – кількість результативних класів зображень; d – функція відстані між характеристиками ключів образу-запиту p_u та зображенням p у базі даних; q, s – кількості зображень в кожному результативному класі; $p(i)$ (або $P(I)$) – отримання образу p (групи образів P) з бази даних за індексом i (групою індексів I); $i(p)$ (або $I(P)$) – отримання, або формування нового у випадку його відсутності у базі індексів індексу i (групи індексів I) для образу p (групи образів P); t – час отримання результативного набору P_{res} .

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання таких задач: декомпозиція образу, отримання структурних коефіцієнтів, оптимізація алгоритмів для зменшення їх складності, класифікація образів, формування ключа образу, індексування образів, пошук образів за ключами.

Об'єкти зображення позначено в порядку від найвищого до найнижчого ступеня як: зв'язні області (їх кількість позначено IA), замкнуті регіони (CR), кластери (C), мікрокластери (MC). Фрагмент ієрархічного дерева та 3-ступенева кластеризація образу показана на рис. 1. Декомпозицію біомедичного зображення (рентген знімок людського органу) наведено на рис. 2.

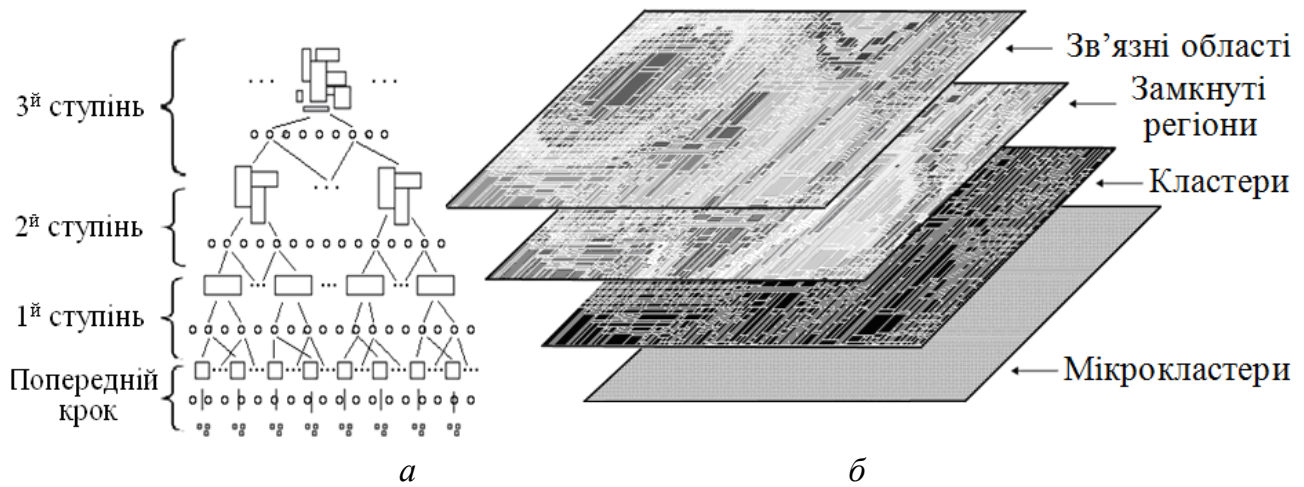


Рис. 1. Фрагмент ієрархічного дерева (а) та 3-ступенева декомпозиція образу (б)

На підготовчому кроці розв'язано оптимізаційну задачу: необхідно отримати множину \bar{O} , що складається з мікрооб'єктів $O = \{o_1, o_2, \dots, o_N\}$:

$$\bar{O} = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}, \quad (8)$$

$$n \rightarrow \min,$$

що задовольняє таку умову:

$$F_k^- \leq F_k(X_i) \leq F_k^+, \quad (k = \overline{1, m}; i = \overline{1, n}), \quad (9)$$

де n – число мікрокластерів O_1, O_2, \dots, O_n ; F_k^-, F_k^+ – граничні значення функцій ознак кластерів, що формуються. Це, наприклад, яскравість, колір, співвідношення заповнених та порожніх клітинок тощо.

Оптимізаційну задачу (8) розбито на три підзадачі:

$$\begin{aligned} \bar{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}, & \quad \bar{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_l\}, & \quad \bar{I} = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}, \\ k \rightarrow \min, & \quad l \rightarrow \min, & \quad m \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (10)$$

що задовольняють умову (9), причому: множина \bar{C} складається з кластерів $C = \{c_1, c_2, \dots, c_L\}$, множина \bar{R} , складається з регіонів $R = \{r_1, r_2, \dots, r_K\}$, множина \bar{I} , складається зі зв'язних областей $I = \{i_1, i_2, \dots, i_M\}$. Кожний рівень триступеневого методу розв'язує відповідну свою задачу.

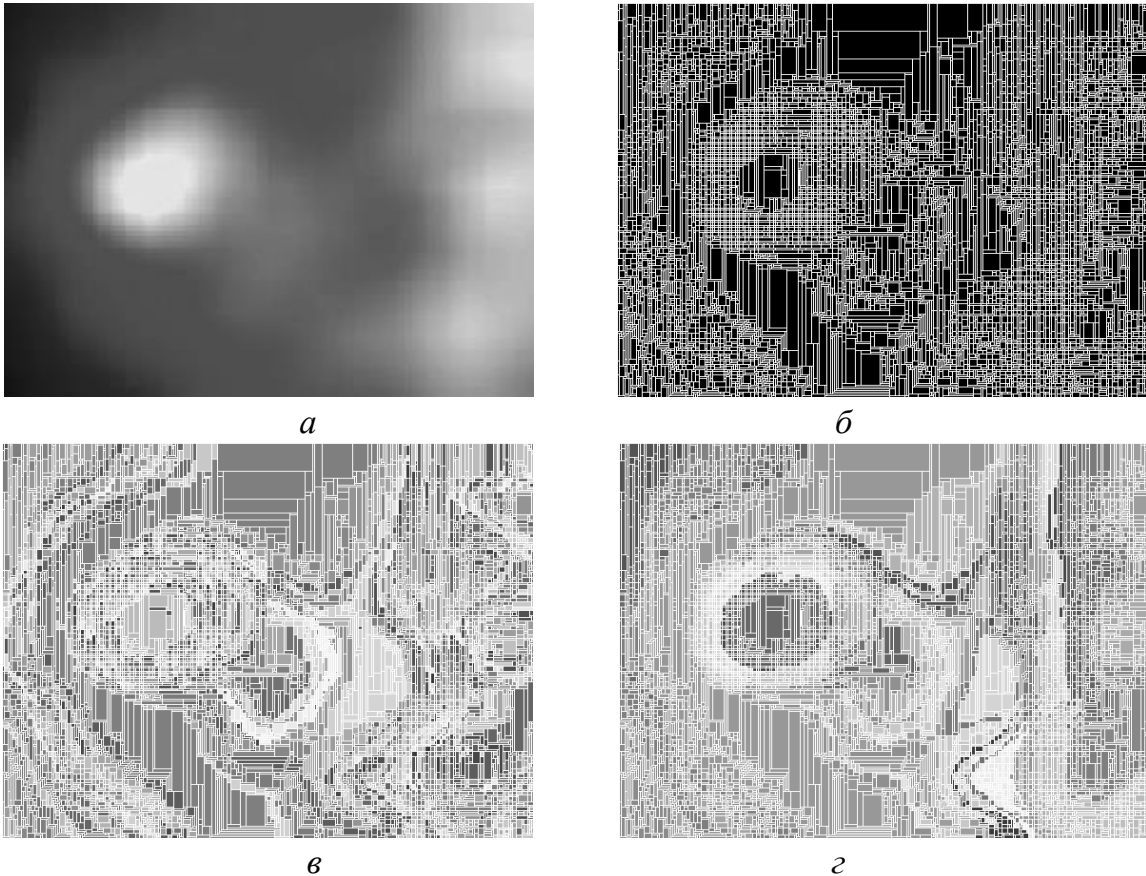


Рис. 2. Біомедичне зображення (а) покрите кластерами (б), регіонами (в) та зв'язними областями (г)

На підготовчому кроці із мікрооб'єктів формуються мікрокластери скануванням зображення із заданим кроком сітки. На основних ступенях формуються прямокутні кластери, регіони та зв'язні області застосуванням алгоритму кластеризації із заданими обмеженнями на яскравість кластера та відстань між кластерами.

Для покращення характеристик декомпозиції зображень в межах сітки більших розмірів розроблено такі методи сканування: *однонапрямлений*, *одноосьовий*, *повний із формуванням нечітких кластерів*, *повний із формуванням чітких кластерів*.

У цьому ж розділі розроблено методи для декомпозиції чорно-білих, сірих та кольорових зображень. Досліджено параметри кластеризації та їх вплив на якісні результати опрацювання візуальних образів. Наведено практичне

застосування параметрів керування декомпозицією. Для візуалізації результатів алгоритму згортання розроблено спосіб розфарбування кластерів.

Для виділення фрагментів зображення, що характеризуються різною яскравістю, розроблено метод ітераційної декомпозиції, який полягає у послідовній зміні параметра яскравості кластера в певному діапазоні значень, в межах якого із заданим кроком зміни величини цього параметра здійснюється декомпозиція зображення. Отримані сегменти зображення заносяться послідовно до масиву результату і видаляються із поточного зображення.

На основі розробленого методу триступеневої декомпозиції образу обґрунтовано оцінку точності алгоритму кластеризації. Яскравість кластера є засобом виявлення: 1) кількості кластерів, що не взяли участі в жодному об'єднанні з іншими об'єктами згортання; 2) кількості білих пікселів, що належать до кластерів кінцевого розбиття образу; 3) кількості кластерів, на які він розбивається. Розглянуто точність алгоритму кластеризації для зображення покритого регіонами або зв'язними областями:

$$E_{CR} = CR_b / CR_{100}, \quad E_{IA} = IA_b / IA_{100}, \quad (11)$$

де CR_b – кількість регіонів, отриманих кластеризацією із заданим користувачем параметром яскравості b , CR_{100} – кількість регіонів, отриманих кластеризацією із параметром яскравості $b = 100\%$, IA_b – кількість зв'язних областей, отриманих кластеризацією із заданим користувачем параметром яскравості b , IA_{100} – кількість зв'язних областей, отриманих кластеризацією із параметром яскравості $b = 100\%$.

У **третьому розділі** наведено результати розроблення понад 95 4-D структурних інтегральних та розподілених властивостей зображення та метод отримання їх за допомогою алгоритму його триступеневої кластеризації.

Структурні властивості (1-D). Для оцінки ступеня структуризації зображення або частини, що підлягає декомпозиції, введено структурні коефіцієнти ступеня трансформації кластерів різних рівнів (мікрокластерів – MC , кластерів – C , регіонів – CR , зв'язних областей – IA): між сусідніми рівнями, через один сусідній рівень та через два сусідні рівні (верхній індекс позначає рівень):

$$K_s^1 = C / MC, \quad K_s^{12} = CR / MC, \quad K_s^{123}(MC) = IA / MC. \quad (12)$$

Аналогічно визначаються решта структурних коефіцієнтів для кластерів різних рівнів. Їх обернені значення характеризують *ступінь розмитості* зображення.

Щоб характеризувати структуру кластерів різних рівнів введено функції питомого об'єму кластера і обернену функцію питомої густини кластерів.

Просторові властивості (2-D). Розроблено статистичні характеристики простору, базовані на структурних властивостях: 1) середній розмір регіону і зв'язної області; 2) середнє квадратичне відхилення розміру регіону і зв'язної

області; 3) відношення середнього розміру регіону (зв'язної області) до середнього квадратичного відхилення розміру регіону (зв'язної області).

Властивості яскравості (I-D). Введено коефіцієнти яскравості для кожного ступеня розгляду образу: 1) середня точкова яскравість регіону і зв'язної області; 2) точкове середнє квадратичне відхилення яскравості регіону і зв'язної області; 3) інтегральна середня зважена яскравість регіону та зв'язної області; 4) інтегральне середнє квадратичне відхилення зваженої яскравості регіону і зв'язної області.

Для формування *розподілених структурних характеристик* образу використано гістограмну модель із 8 позицій. Введено кількість розподілених структурних параметрів як залежність їх від яскравості BI_M :

$$CL_d(BI_M) = \{CL_{d1}(BI_M), CL_{d2}(BI_M), \dots, CL_{d8}(BI_M)\}, \quad (13)$$

де CL – регіони або зв'язні області та їх кількості, $\Delta CL(BI_M) = 256 / 8$.

Гістограмна модель для структурних коефіцієнтів має таку характеристику залежності від розміру кластерів S :

$$CL_d(S) = \{CL_{d1}(S), CL_{d2}(S), \dots, CL_{d8}(S)\}, \quad (14)$$

де CL – регіони або зв'язні області та їх кількості, інтервал гістограми $\Delta = S(P)/8$, P – розмір всього образу.

Для формування *розподілених в просторі характеристик* образу за гістограмною моделлю зображення покривається сіткою із кроком 4×2 . Для кожного кроку сітки обчислюється кількість регіонів або зв'язних областей, що покривають його. Обчислюючи інтегральні яскравості для кожного кроку сітки з відповідним структурним об'єктом, отримуємо для образу його розподілені в просторі характеристики яскравостей. Обчислюючи кількість структурних об'єктів, що покривають крок сітки, отримуємо розподілені в просторі кількісні структурні властивості.

На рис. 3 зображено гістограмні моделі характеристик структурних властивостей: *а* – розподіл кількості регіонів за зваженою яскравістю; *б* – розподіл зваженої яскравості регіонів за секціями зображення; *в* – розподіл кількості регіонів за секціями зображення.

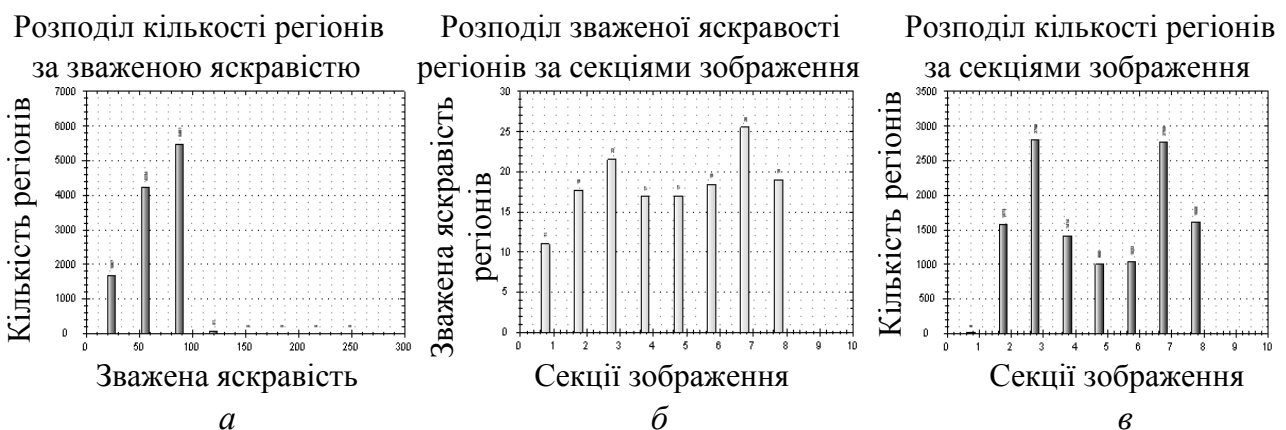


Рис. 3. Гістограмні моделі характеристик структурних властивостей

В четвертому розділі розроблено методи підвищення ефективності алгоритму ієрархічної кластеризації: багатокаскадну декомпозицію даних та двокаскадну декомпозицію простору.

Розроблено метод *каскадної кластеризації*, який полягає у багатоступеневій декомпозиції множин ключів і кластерів. Вхідна множина ключів розбивається на p підмножин O_1, O_2, \dots, O_p (їх названо множинами нульового каскаду), до кожної з яких застосовується алгоритм кластеризації. Об'єднання відповідних результативних множин K_1, K_2, \dots, K_p названо множиною кластерів 1-го каскаду. Перемішавши елементи цієї множини та застосувавши повторно алгоритм кластеризації, сформується результативна множина кластерів 2-го каскаду. При отриманні кореня дерева згортання на 2-му каскаді матимемо *двокаскадну декомпозицію*, на третьому каскаді – *трикаскадну* і т.д. Кількість каскадів визначається кількістю рівнів ієрархічного дерева згортання, на яких здійснюється поділ кластерів на множини (без рівня ключів). Схема поділу та згортання є рекурсивною (рис. 4).

Перемішування і поділ елементів

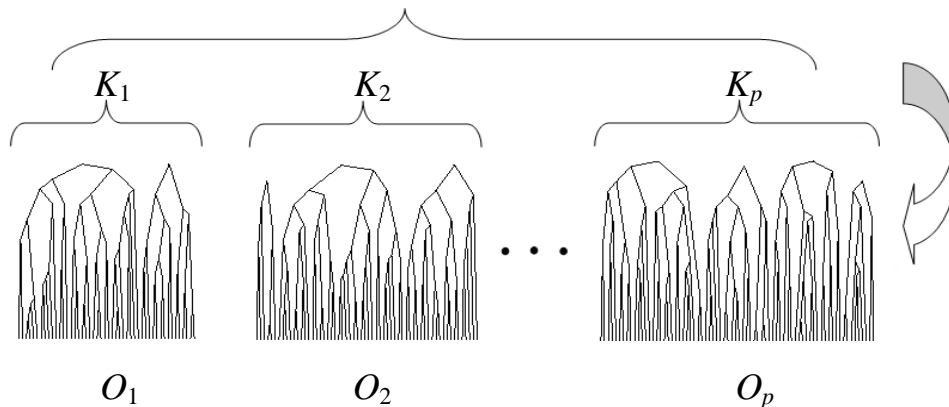


Рис. 4. Згортання каскадного дерева для формування кластерів

Для зменшення часових затрат при кластеризації n -вимірних даних розроблено двокаскадний метод декомпозиції, що полягає в розбитті простору згідно з координатними осями гіперкубів. Розроблено два способи поділу простору: на гіперкуби різних розмірів, але з однаковою кількістю значень даних; другий – на гіперкуби з неконтрольованими кількостями значень даних, але контрольованими розмірами сторін, що задаються користувачем. Відповідне керування алгоритмом дає змогу об'єднувати кластери – результати з підмножин – у кінцеві при незначних втратах точності. Як приклади практичних даних використані зображення із значними кількостями пікселів.

Для найкращої точності, що досягається перебором, універсальний ієрархічний алгоритм має поліноміальну складність $O(N^3)$. Для зменшення алгоритмічної складності задаються допуски на значення функції відстані для об'єднання тих пар вершин (кластерів), що задовольняють таку умову:

$$F(x_i, x_j) \geq F_0(1 - k_v), \quad (15)$$

де F_0 – мінімальне значення відстані на рівні згортання, k_v ($k_v < 1$) – коефіцієнт допуску, що вказує на відстань між кандидатами для об'єднання на поточному рівні дерева (k_v названо коефіцієнтом швидкості та точності).

Оптимізаційна задача полягає в знаходженні найкращого значення коефіцієнта швидкості та точності k_{vopt} , яке можна використати в алгоритмі для конкретної вибірки даних. Найкраще значення коефіцієнта k_{vopt} таке, для якого алгоритмічна складність приймає мінімальне значення, а похибка результатів алгоритму прямує до нуля. За цим коефіцієнтом результативні кластери є такі самі, як при точній кластеризації з параметром $k_v = 0$. Для його знаходження вказано три наближені методи, що базуються на аналізі функції відстані між точками вибірки: *динамічний*, *статичний* та *емпіричний*.

Для зменшення складності алгоритму і покращення характеристик декомпозиції візуального образу розвинено метод застосування ковзної області, що досягається динамічним керуванням розміру області, в якій ведеться пошук кластерів. У цьому ж розділі розроблено методи пошуку кандидатів для об'єднання в процедурі згортання.

У **п'ятому розділі** описано розроблений пакет прикладних програм (ППП) для опрацювання візуальних образів: його архітектуру, використані структури даних, моделі кластера та ключа образу. В додатку наведено опис інформаційної моделі створеної системи.

Розроблений ППП складається з функціонально завершених та взаємопов'язаних частин – ядра (бібліотеки класів), підсистеми кластеризації образів, підсистеми кластеризації ключів образів. Крім цього, ППП використовує збірки з відкритим кодом AForge.NET для обробки зображень та збірку ZedGraph для відображення графічних результатів.

Розроблені підсистеми кластеризації образів та ключів образів призначені для інтерактивної взаємодії з користувачем: введення та коригування даних і параметрів, перегляду звітів та статистики, графічних результатів. Ці підсистеми є незалежними, що дає змогу проводити незалежні дослідження згортання ключів образів та декомпозицію образів.

У цьому ж розділі розроблено програмні алгоритми формування кластерів різного рівня та алгоритм згортання ключів образів.

У **шостому розділі** наведено результати тестування розроблених структурних властивостей та методів під час опрацювання зображень лінійчастих спектрів, біомедичних зображень, аналізу зображень структури і поверхні. Це дало змогу запропонувати нові методи автоматизованої оцінки структури матеріалів, кількісного металографічного аналізу поверхні металів, аналізу спектрів тощо на заміну існуючим операторним методам.

У цьому ж розділі розроблено методи індексування та пошуку візуальних образів. На рис. 5 зображено схеми процесів індексування та пошуку візуальних образів.

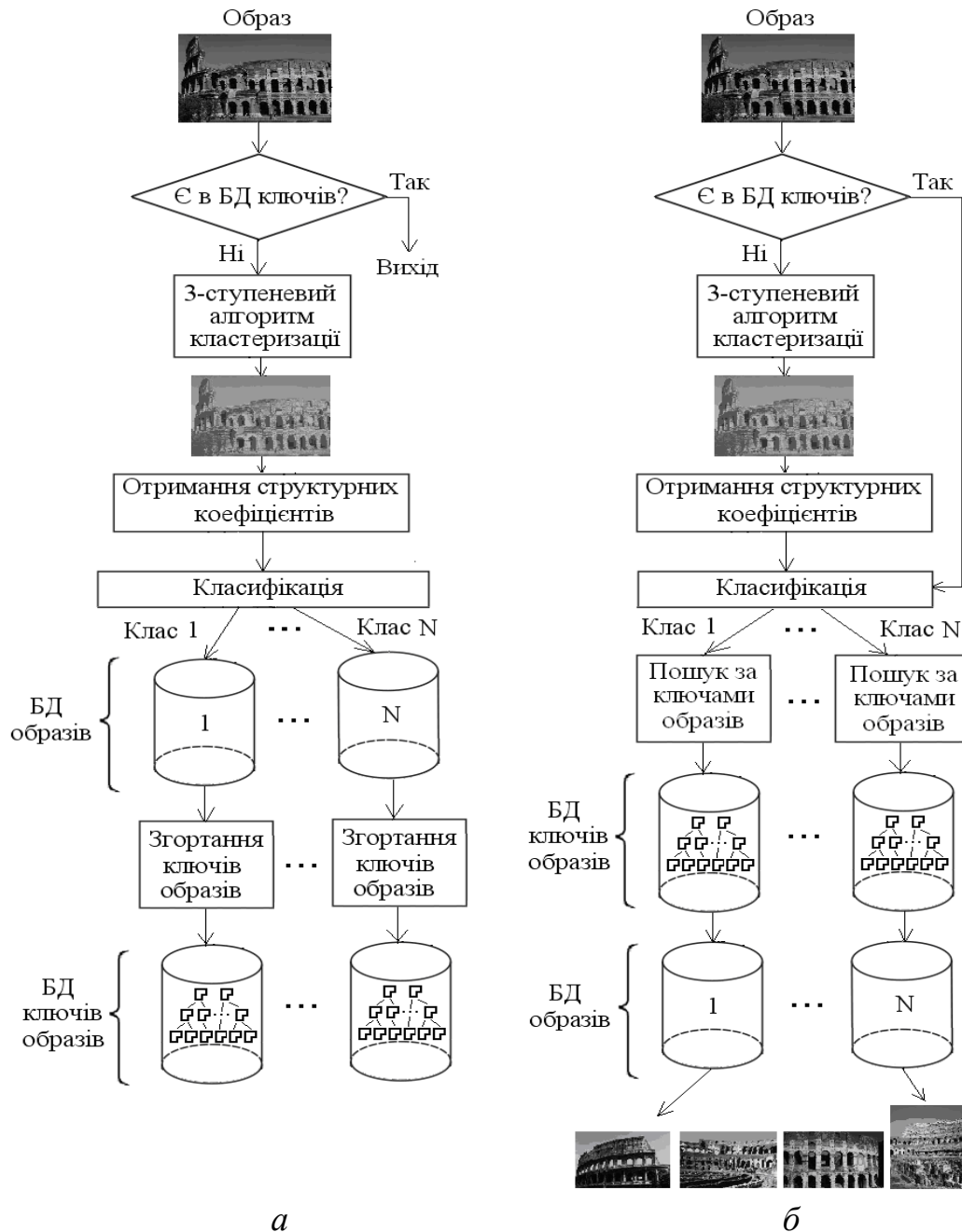


Рис. 5. Схеми процесів індексування (*a*) та пошуку (*б*) візуальних образів

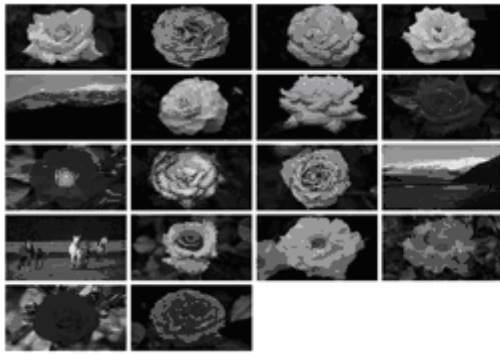
При цьому використано дві бази даних: одну базу даних для зображень, іншу – для ключів. Кожна з них «ділиться» в процесі класифікації на відповідні класи зображень, наприклад: структурні зображення, слабкоструктурні біомедичні зображення, лінійчасті спектри, текстурні зображення тощо. Використання дерева згортання ключів дає змогу обійти процес його формування при кожному пошуку образів. Крім цього даний метод дає змогу уникнути використання матриці сусідства розміром $N \times N$, де N – кількість образів.

Розроблено три методи автоматизованої класифікації образів: 1) сортуванням суми місць образів, отриманих класифікацією тільки за одним із параметрів; 2) поділом на класи за градієнтами функції, яка виражає

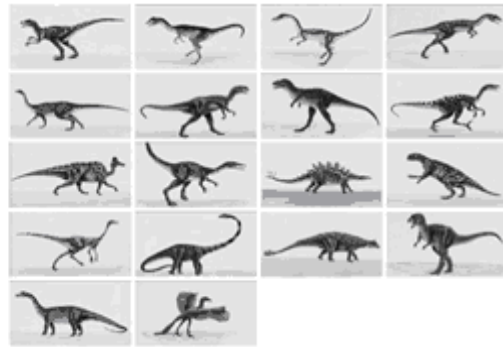
структурний коефіцієнт; 3) згортанням ключів образів і поділом на класи відсіканням піддерев на передостанніх рівнях дерева згортання.

Описано задачу класифікації образів, застосування ППП для пошуку образів за ключами. Наведено експериментальні результати досліджень.

На рис. 6 наведено приклад пошуку образів за структурними властивостями, де першим образом подано зображення-запит користувача. Крім цього вказано характеристики точності P та ефективності R системи пошуку зображень.



Отримано 18 образів: 15 образів
відповідають запиту, 3 – ні
 $P = 0,83$; $R = 0,75$



Отримано 18 образів: 18 образів
відповідають запиту, 0 – ні
 $P = 1$; $R = 0,9$



Отримано 28 образів: 11 образів
відповідають запиту, 17 – ні
 $P = 0,93$; $R = 0,55$



Отримано 23 образи: 13 образів
відповідають запиту, 10 – ні
 $P = 0,57$; $R = 0,65$

Рис. 6. Приклади пошуку образів

У цьому ж розділі досліджено використання відносного та абсолютного критеріїв згортання ключів. Для графічного подання результатів згортання ключів образів використано дендрограми, кожен вузол яких з'єднаний із базою даних класифікованих зображень. Користувач має змогу вибрати вузол і отримати повну інформацію про зображення, розміщені на відповідному рівні дерева згортання.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язано наукову задачу розроблення математичного і програмного забезпечення ієрархічної декомпозиції, індексування, класифікації та аналізу візуальних образів для пошуку їх у графічних базах даних, що забезпечує підвищення ефективності опрацювання зображень. При цьому отримані такі результати:

1. Проведено аналіз актуальності, потреб і стану систем пошуку зображень на основі їх вмісту, огляд сучасних засобів проектування систем індексування та пошуку візуальних образів, що показало необхідність розроблення нових і вдосконалення існуючих моделей і методів для забезпечення отримання необхідної точності результатів за прийнятний час.

2. Вперше розроблено метод розв'язання задачі пошуку візуальних образів з допомогою 4-D структурних коефіцієнтів, які отримані в результаті кластерного аналізу, що дало змогу у порівнянні з іншими підходами підвищити точність пошуку образів в середньому на 15%.

3. Вперше розроблено методи класифікації візуальних образів за згортанням ключів образів, та за їхніми структурними властивостями. Це дало змогу зменшити область пошуку і уникнути сортування графічних даних.

4. Удосконалено класичний ієрархічний агломеративний алгоритм за рахунок триступеневої кластеризації, що дало змогу адаптуватись до характерних особливостей зображень при їх опрацюванні.

5. Розроблено методи багатокаскадної декомпозиції даних та двокаскадної декомпозиції простору, що дало змогу зменшити область пошуку оптимальних розв'язків, збільшити швидкодію алгоритмів та зменшити обчислювальні ресурси для розв'язання задач кластеризації зображень з кращими показниками точності декомпозиції, ніж відомі.

6. Комплекс прикладних програм, створений на основі розроблених математичних моделей, відкриває можливості для декомпозиції, індексування та пошуку зображень в галузі обробки та розпізнавання образів.

7. Результати верифікації розроблених математичних моделей, методів та алгоритмів аналізу шляхом тестових досліджень і визначення точності та достовірності одержаних результатів підтверджують ефективність розроблених методів декомпозиції та аналізу зображень, а також підтверджує ефективність розроблених програмних засобів для індексування, класифікації та пошуку візуальних образів на основі сформованих 4-D структурних властивостей.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Мельник Р. А. 4-вимірні інтегральні та розподілені структурні властивості для класифікації та пошуку зображень / Р. А. Мельник, Р. Б. Тушницький // Вісник Національного університету "Львівська

політехніка”: Комп’ютерні науки та інформаційні технології. – 2009. – № 650. – С. 61–67.

2. Melnyk R. Image structure analysis by 3-stages clustering / R. Melnyk, R. Tushnytskyu // Intern. Journal of Computing. – 2009. – Vol. 8, Issue 2. – P. 86–94.

3. Melnyk R. Image classification by pattern and structure features clustering / R. Melnyk, R. Tushnytskyu // Intern. Journal of Computing. – 2009. – Vol. 8, Issue 3. – P. 53–60.

4. Мельник Р. А. Алгоритм триступеневої кластеризації для класифікації зображень за їх структурними властивостями / Р. А. Мельник, Р. Б. Тушницький // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Комп’ютерні науки та інформаційні технології. – 2008. – № 629. – С. 46–52.

5. Мельник Р. А. Пошук зображень у базах даних за структурними коефіцієнтами на основі алгоритму триступеневої кластеризації / Р. А. Мельник, Р. Б. Тушницький // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 2009. – № 651. – С. 190–196.

6. Тушницький Р. Б. Система пошуку зображень на основі їх вмісту з використанням 4-D структурних властивостей / Р. Б. Тушницький // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2009. – № 6/7(42). – С. 49–54.

7. Мельник Р. А. Застосування пакета кластеризації образів для оцінювання показників стану крові / Р. А. Мельник, Р. Б. Тушницький // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 2007. – № 591. – С. 28–33.

8. Мельник Р. А. Керування яскравістю кластера при декомпозиції зображень спектрів / Р. А. Мельник, Р. Б. Тушницький // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Комп’ютерні науки та інформаційні технології. – 2007. – № 598. – С. 3–8.

9. Мельник Р. А. Сегментування зображень алгоритмом ієрархічної кластеризації / Р. А. Мельник, Р. Б. Тушницький // Відбір і обробка інформації. – 2008. – Вип. 28 (104). – С. 97–102.

10. Мельник Р. А. Керування параметрами кластера в алгоритмі декомпозиції зображень / Р. А. Мельник, Р. Б. Тушницький // Відбір і обробка інформації. – 2007. – Вип. 27 (103). – С. 58–62.

11. Мельник Р. А. Каскадна декомпозиція множин великої розмірності при кластеризації ключів образів / Р. А. Мельник, Р. Б. Тушницький // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Комп’ютерні науки та інформаційні технології. – 2007. – № 604. – С. 249–254.

12. Мельник Р. А. Дослідження впливу розмірів мікрокластерів на ступінь декомпозиції зображень / Р. А. Мельник, Р. Б. Тушницький // Вісник

Національного університету “Львівська політехніка”: Комп’ютерні науки та інформаційні технології. – 2008. – № 616. – С. 33–40.

13. Мельник Р. А. Керування точністю та складністю алгоритму кластеризації даних великої розмірності допуском на функцію подібності та декомпозицією / Р. А. Мельник, Р. Б. Тушницький // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Комп’ютерні науки та інформаційні технології. – 2009. – № 638. – С. 248–254.

14. Мельник Р. А. Декомпозиція простору під час кластеризації даних великої розмірності / Р. А. Мельник, Р. Б. Тушницький // Відбір і обробка інформації. – 2009. – Вип. 31 (106). – С. 65–72.

15. Melnyk R. Image processing by distributed pattern structure features / R. Melnyk, R. Tushnytskyu // Proceedings of the 5th International Conference-Forum on Information Systems and Technologies (IST’2009). – Minsk, Belarus, 2009. – Part 1. – P. 199–202.

16. Melnyk R. Patterns analysis by clustering / R. Melnyk, R. Tushnytskyu // Proceedings of the Fifth International Conference “Neural Networks and Artificial Intelligence” (ICNNAI-2008). – Minsk, Belarus, 2008. – P. 160–163.

17. Мельник Р. А. Індексуння та пошук зображень за структурними коефіцієнтами / Р. А. Мельник, Р. Б. Тушницький // Праці 9-ї Всеукраїнської міжнародної конференції “Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів” (УкрОБРАЗ’2008). – Київ, 2008. – С. 143–146.

18. Melnyk R. Image classification by their structural properties / R. Melnyk, R. Tushnytskyu // Proceedings of the III International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT’2008). – Lviv, 2008. – P. 37–40.

19. Melnyk R. Pattern Structure Features Extraction and Analysis / R. Melnyk, R. Tushnytskyu // Proceedings of the IV International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT’2009). – Lviv, 2009. – P. 229–232.

20. Melnyk R. Iterative clustering for spectrums processing / R. Melnyk, R. Tushnytskyu, L. Druchok // Proceedings of the 2nd International Conference of Young Scientists “Computer Science and Engineering” (CSE-2007). – Lviv, 2007. – P. 168–170.

21. Melnyk R. Decomposition of visual patterns by clustering / R. Melnyk, R. Tushnytskyu // Proceedings of the IXth International Conference “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” (CADSM’2007). – Lviv-Polyana, 2007. – P. 278–279.

22. Melnyk R. Threshold and brightness control for grey patterns decomposition by clustering / R. Melnyk, R. Tushnytskyu // Proceedings of the International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT’2007). – Lviv, 2007. – P. 133–136.

23. Melnyk R. Clustering of visual pattern keys by cascading decomposition / R. Melnyk, R. Tushnytskyu // Proceedings of the International Conference “Modern

Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science” (TCSET’2008). – Lviv-Slavsko, 2008. – P. 295–296.

24. Melnyk R. Algorithm accuracy and complexity optimization by inequality merging for data clustering / R. Melnyk, R. Tushnytskyy // Proceedings of the Xth International Conference “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” (CADSM’2009). – Lviv-Polyana, 2009. – P. 453–455.

25. Melnyk R. Large-scale dataset cascading clustering by item set and space decomposition / R. Melnyk, R. Tushnytskyy // Proceedings of the Vth International Conference “Perspective Technologies and Methods in MEMS Design” (MEMSTECH’2009). – Lviv-Polyana, 2009. – P. 93–95.

26. Melnyk R. Space decomposition control for large-scale dataset clustering / R. Melnyk, R. Tushnytskyy // Proceedings of the 4-th International Conference “Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application” (ACSN-2009). – Lviv, 2009. – P. 90–93.

27. Мельник Р. А. Обробка зображень об’єктів розвідки засобами ієрархічної кластеризації / Р. А. Мельник, Р. Б. Тушницький // Тези доповідей Першої Всеукраїнської науково-практичної конференції “Перспективи розвитку озброєння і військової техніки в збройних силах України” (ВНТК ЛІСВ НУ “ЛП”). – Львів, 2008. – С. 188.

28. Melnyk R. Circuit board image analysis by clustering / R. Melnyk, R. Tushnytskyy // Proceedings of the IVth International Conference of Young Scientists “Perspective Technologies and Methods in MEMS Design” (MEMSTECH’2008). – Polyana, 2008. – P. 44–45.

АНОТАЦІЇ

Тушницький Р. Б. Математичне та програмне забезпечення ієрархічної декомпозиції, індексування, класифікації та аналізу візуальних образів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем. – Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2010.

Дисертація присвячена розробленню математичного і програмного забезпечення ієрархічної декомпозиції, індексування, класифікації та аналізу візуальних образів для пошуку їх у графічних базах даних. Розроблено метод розв’язання задачі пошуку візуальних образів з допомогою 4-D структурних коефіцієнтів, які отримані в результаті кластерного аналізу, що дало змогу у порівнянні з іншими підходами підвищити точність пошуку образів в середньому на 15%. Розроблено структурні інтегральні та розподілені властивості образів для формування вектора ознак візуальних образів. Розроблено методи класифікації візуальних образів за згортанням ключів

образів, а також за їхніми структурними властивостями. Удосконалено класичний ієрархічний агломеративний алгоритм за рахунок триступеневої кластеризації, що дало змогу адаптуватись до характерних особливостей зображень при їх опрацюванні. Швидкодію методів згортання підвищено за допомогою розроблених методів багатокаскадної декомпозиції даних та двокаскадної декомпозиції простору, а також керуванням складністю та похибкою алгоритмів.

Комплекс прикладних програм, створений на основі розроблених математичних моделей, відкриває можливості для декомпозиції, індексування та пошуку візуальних образів у графічних базах даних. Розроблені 4-D структурні коефіцієнти дають змогу кількісно та якісно аналізувати візуальні образи, зокрема, біомедичні зображення, досліджувати зміни поверхні та структури матеріалів.

Ключові слова: алгоритм згортання, вектор ознак, класифікація зображень, кластеризація, пошук зображень на основі їх вмісту, структурні властивості.

Тушницький Р. Б. Математическое и программное обеспечение иерархической декомпозиции, индексирования, классификации и анализа визуальных образов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.03 – математическое и программное обеспечение вычислительных машин и систем. – Национальный университет “Львовская политехника”, Львов, 2010.

Диссертация посвящена разработке математического и программного обеспечения иерархической декомпозиции, индексирования, классификации и анализа визуальных образов для их поиска в графических базах данных. Разработан метод решения задачи поиска визуальных образов с помощью 4-D структурных коэффициентов, полученных в результате кластерного анализа, что позволило по сравнению с другими подходами повысить точность поиска образов в среднем на 15%. Разработаны структурные интегральные и распределенные свойства образов для формирования вектора признаков визуальных образов. Разработаны методы классификации визуальных образов за свертыванием ключей образов, а также за их структурными свойствами. Усовершенствован классический иерархический агломеративный алгоритм за счет трехступенчатой кластеризации, что позволило адаптироваться к характерным особенностям изображений при их обработке. Быстродействие методов свертывания повышена с помощью разработанных методов многокаскадной декомпозиции данных и двухкаскадной декомпозиции пространства, а также управлением сложностью и погрешностью алгоритмов.

Комплекс приложений, созданный на основе разработанных математических моделей, открывает возможности для декомпозиции, индексирования и поиска визуальных образов в графических базах данных. Разработанные 4-D структурные коэффициенты позволяют количественно и качественно анализировать визуальные образы, в частности биомедицинские изображения, исследовать изменения поверхности и структуры материалов.

Ключевые слова: алгоритм свертывания, вектор признаков, классификация изображений, кластеризация, поиск изображений на основе их содержимого, структурные свойства.

Tushnytskyy R. B. Mathematical and program tools for hierarchical decomposition, indexing, classification and visual patterns analysis. – Manuscript.

Thesis for a Ph.D. degree by the speciality 01.05.03 – mathematical support and software of computers and systems. – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2010.

Mathematical and program tools for hierarchical decomposition, indexing, classification and analysis of visual patterns are considered. The instruments are used for image searching in databases. The method for patterns retrieval problem using 4-D structural features from cluster analysis is developed. Comparison with other approaches demonstrates image searching accuracy higher in average 15%. The integrated, distributed and spatial image structural features are developed to form an image feature vector.

Methods for visual pattern classification by keys, as well as by their structural properties are developed. Modified hierarchical agglomeration algorithm by a three-stage clustering allowed to adapt image characteristic features for concrete processing type. To increase algorithm efficiency multi-cascading data decomposition and two-cascading space decomposition methods are developed. Facilities to control algorithm complexity and accuracy are proposed.

The first chapter reviews different types of existing content based image retrieval systems. The analysis of dissertation research goals are made.

In the second chapter image searching problem is formulated, the three-stages hierarchical clustering approach is developed. To solve main problem the following tasks are considered: decomposition, structural features extraction, algorithm optimization, image classification, image key forming, image indexing and searching. To improve the image decomposition characteristics the following scanning methods are developed: single directed, complex with the fuzzy clusters, complex with the distinct clusters.

The third chapter describes a technique to obtain the transformation degree coefficients, integrated and distributed images 4-D structural properties based on the three-stages clustering algorithm. To form the image distributed structural

characteristics histogram model with 8 positions are used. To form image space distributed characteristics by histogram model image is covered by a grid with 4×2 step. For each grid step image structural properties are calculated.

The fourth chapter describes the improving technique of hierarchical clustering algorithm: multi-cascading data decomposition and two-cascading space decomposition. To reduce the algorithm complexity and improve the image decomposition characteristics a sliding area was applied.

The fifth chapter describes the software package developed for visual images processing. Developed package consists of functionally closed and interrelated parts: a core (class library), the images clustering system, image key clustering system. In addition, the package uses the open source projects AForge.NET for image processing and ZedGraph to display graphical results.

The sixth chapter presents developed structural properties and testing results for line spectrum and biomedical image, structure and surface image analysis. In this chapter the visual patterns indexing and retrieval methods are developed. Three methods for automated image classification are developed: 1) by sorting the images place numbers, 2) according to function gradients, expressing the structural factor, 3) image keys rolling-up for a tree level.

Developed 4-D structural features allow to analyze biomedical images, to investigate changes in surface and material structure. Software is planned to be used for visual pattern classification, indexing and retrieval.

Keywords: rolling-up algorithm, feature vector, image classification, clustering, content based image retrieval, structural properties.

Підписано до друку 12.05.2010.
Формат 60x90 1/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 1,5. Обл.-видав. арк. 0,89.
Тираж 100 прим. Зам. 100419

Поліграфічний центр
Видавництва Національного університету “Львівська політехніка”
вул. Ф. Колесси, 2, 79000, Львів