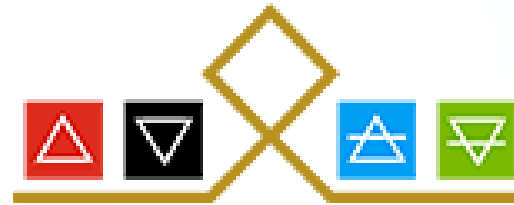




НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ



Теорія розпізнавання образів та класифікації в системах штучного інтелекту

*Тема №5. Методи ідентифікації елементів
графічних об'єктів*

Київ - 2025

Зміст

- 1. Аналіз методів ідентифікації об'єктів у системах відеонагляду.*
- 2. Комбінований адаптивний метод ідентифікації об'єктів на основі ієрархічного принципу.*
- 3. Метод класифікації даних на основі кластерного аналізу.*

Мета

Вивчення та дослідження основних методів контурної сегментації на основі методу Канні та виділення характерних точок контуру

Література

1. Загородня Д.І., Биковий П.Є., Ліп'яніна-Гончаренко Х.В., Дорош В.І., Кім І.Р., Каньовський А.А. *Методи та засоби ідентифікації та класифікації об'єктів за характерними точками їх контурів: монографія / за заг. ред. А.О.Саченка. Тернопіль: ЗУНУ, 2020. 165 с.*
2. Люгер Джордж Ф. *Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем, 4-е изд. : пер. с англ. / Джордж Ф. Люгер – М. : Вильямс, 2005. – 864 с.*
3. Поспелов Г.С. *Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии / Г. С. Поспелов – М. : Наука, 1988. – 289 с.*
4. Рассел С. *Искусственный интеллект: современный поход, 2-е изд. : пер. с англ. / С. Рассел, П. Норвиг. – М. : Вильямс, 2016. – 1408 с.*
5. Дуда Р., Харт П. *Распознавание образов и анализ сцен. — М.: Мир, 1976.*
Фукунага К. *Введение в статистическую теорию распознавания образов. — М.: Наука, 1979.*
6. Главач В., Шлезингер М.И. *Десять лекций по статистическому и структурному распознаванию образов. К.: Наукова думка, 2004.*
www.irtc.org.ua/image/Files/Schles/esh10_full.pdf.
7. Местецкий Л.М. *Математические методы распознавания образов. (Курс лекций). ВмИК МГУ: Москва, 2004).* www.ccas.ru/frc/papers/mestetskii04course.pdf.
8. Лепский А.Е., Броневиц А.Г. *Математические методы распознавания образов. (Курс лекций). Южный федеральный университет: Таганрог, 2009.*
http://www.lepskiy.ucoz.com/lect_Lepskiy_Bronevich_pass.pdf
- Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. *Теория распознавания образов М.: Наука, 1974. — 416 с.*

1. Загородня Д.І., Биковий П.Є., Лип'яніна-Гончаренко Х.В., Дорош В.І., Кім І.Р., Каньовський А.А. *Методи та засоби ідентифікації та класифікації об'єктів за характерними точками їх контурів: монографія / за заг. ред. А.О.Саченка. Тернопіль: ЗУНУ, 2020. 165 с.*

2. Люгер Джордж Ф. *Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем, 4-е изд. : пер. с англ. / Джордж Ф. Люгер – М. : Вильямс, 2005. – 864 с.*

3. Поспелов Г.С. *Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии / Г. С. Поспелов – М. : Наука, 1988. – 289 с.*

4. Рассел С. *Искусственный интеллект: современный поход, 2-е изд. : пер. с англ. / С. Рассел, П. Норвиг. – М. : Вильямс, 2016. – 1408 с.*

5. Дуда Р., Харт П. *Распознавание образов и анализ сцен. — М.: Мир, 1976.*

Фукунага К. *Введение в статистическую теорию распознавания образов. — М.: Наука, 1979.*

6. Главач В., Шлезингер М.И. *Десять лекций по статистическому и структурному распознаванию образов. К.: Наукова думка, 2004.*

www.irtc.org.ua/image/Files/Schles/esh10_full.pdf.

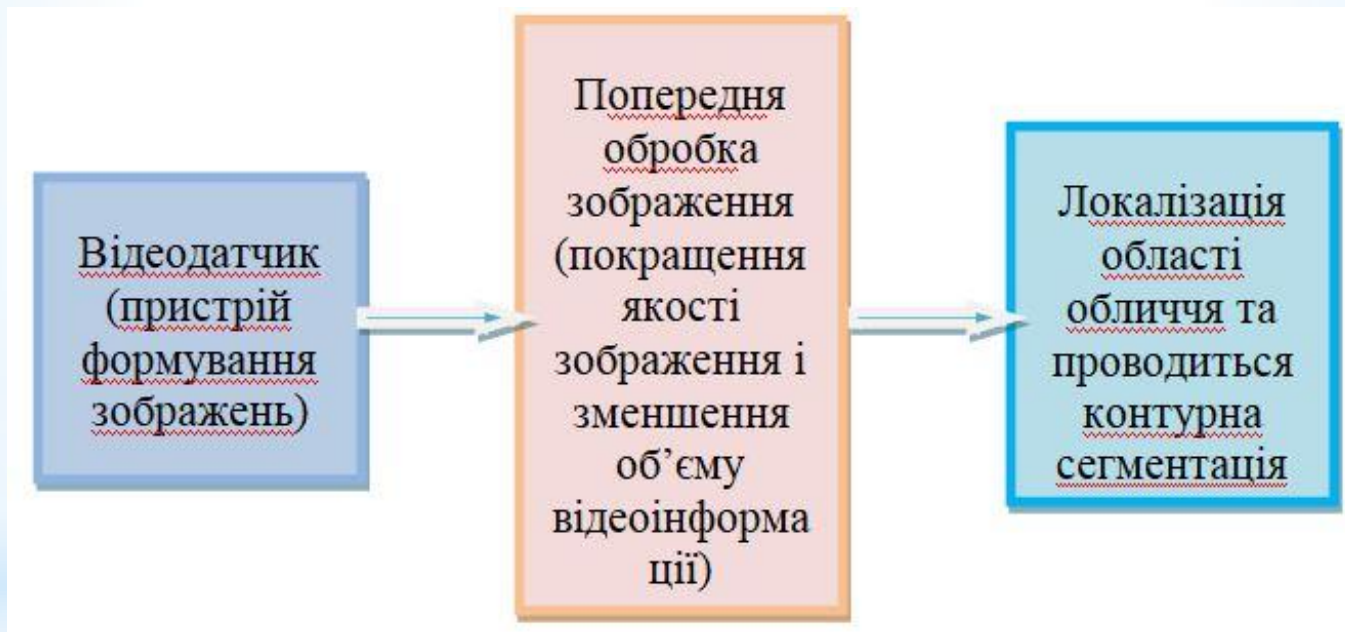
7. Местецкий Л.М. *Математические методы распознавания образов. (Курс лекций). ВмиК МГУ: Москва, 2004).* www.ccas.ru/frc/papers/mestetskii04course.pdf.

8. Лепский А.Е., Броневиц А.Г. *Математические методы распознавания образов. (Курс лекций). Южный федеральный университет: Таганрог, 2009.*

http://www.lepskiy.ucoz.com/lect_Lepskiy_Bronevich_pass.pdf

Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. *Теория распознавания образов М.: Наука, 1974. — 416 с.*

1. Аналіз методів ідентифікації об'єктів у системах відеонагляду



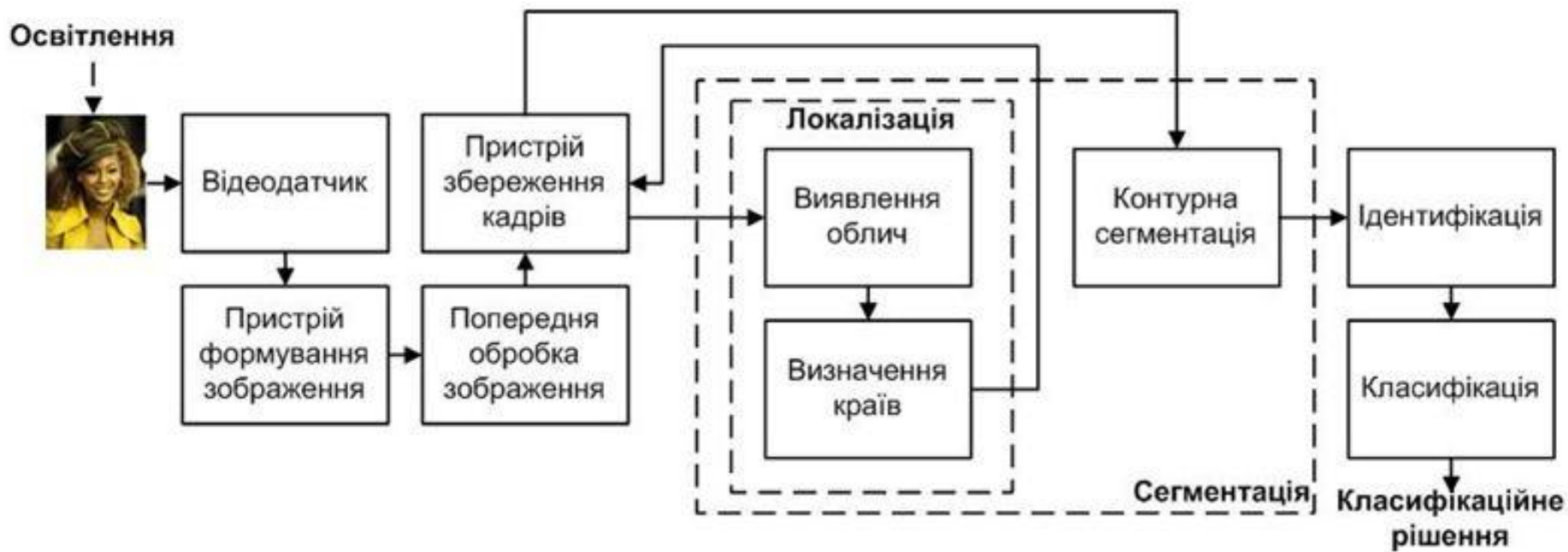
Контурна сегментація:

- виділення контуру (потрібно отримати зовнішній контур у вигляді замкнутої кривої, тому часто застосовують методи апроксимації);
- прослідковування (використовувати для контурної сегментації шляхом підбору аналітично заданої кривої до сукупності точок контурного препарату; можна застосувати апроксимацію поліномами, використовуючи ітеративні методи підбору);
- виділення характерних точок (точки на ділянках значної кривизни, будується ідентифікаційний вектор (процедура ідентифікації) на основі якого далі проводиться класифікація – процедура віднесення (присвоєння) досліджуваного об'єкта (зображення) до певного класу).

Бібліотека комп'ютерного зору з відкритим вихідним кодом OpenCV містить алгоритми комп'ютерного зору, обробки зображень та алгоритми загального призначення з відкритим кодом (реалізована на C/C++) для Python, Java, Ruby, Matlab, Lua та інших мов програмування.

Для роботи із відео та зображеннями OpenCV містить основні модулі:

- `opencv_imgproc` – для обробки зображень (фільтрація, геометричні перетворення, перетворення кольорових просторів і т. д.);
- `opencv_features2d` – розпізнавання та опис плоских примітивів;
- `opencv_video` – аналіз руху та відстеження об'єктів (оптичний потік, шаблони руху, видалення фону);
- `opencv_objdetect` – виявлення об'єктів на зображенні (виявлення осіб за допомогою алгоритму Віола-Джонса, розпізнавання людей HOG і та ін.).



Структурна схема автоматизованої систем відеонагляду

Після оцифрування кожен піксель однозначно відноситься або до фону, або до зображення. Існують різні види критеріїв прийняття рішення про приналежність кожного з пікселів до фону або контуру зображення.

Контурні пікселі відрізняються від внутрішніх пікселів зображення наявністю в якості однієї або декількох сусідніх фонових комірок. В якості сусідніх розглядаються тільки горизонтальні та вертикальні сусідні комірки, або тільки діагональні. Контур бінарного зображення задається точками в центрах клітин що межують. Якщо змістити решітку на величину половини довжини сторони квадрата вправо і вгору, то контурні точки зображення опиняться у вузлах решітки. В результаті сприйняття контуру спрощується.

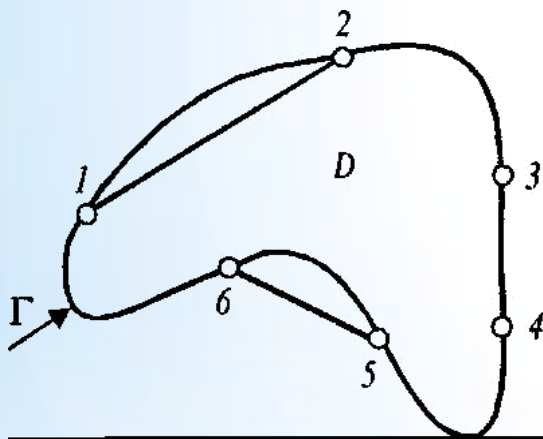
Результатом виділення контурів є контурний препарат – вторинне зображення того ж розміру, що й вихідне. У початковий момент всі точки цього зображення мають чорний колір, а в процесі виділення контурів пікселі, що відповідають виявленим граничним точкам зображення, зафарбовуються білим кольором.

Контур на кольоровому зображенні відповідає перепад інтенсивності. Проте, це визначення виключає контури, пов'язані з різкими змінами кольору тону та інтенсивності в областях з постійною яскравістю.

Представлення (кодування) контуру – це етап отримання дискретного сигналу, що описує границі оцифрованого зображення.

Вимоги до алгоритмів представлення контурів:

- зменшення обсягів використовуваної пам'яті, для зберігання;
- зменшення часу та складності подальшої обробки;
- отримання інформативних ознак об'єкта.



Фрагменти контуру Γ : 1, 2 – опуклий; 3, 4 – невизначений; 5, 6 – увігнутий

При вирішенні задачі виділення контурів знаходять компроміс між числом помилкових контурів та числом і величиною розривів контуру. На результат операції прослідковування набагато менше впливають невеликі розриви. Їх легше усунути, ніж помилкові контури, в яких легко заплутатися. Співвідношення між числом помилкових контурів та числом і величиною розривів визначається завадостійкістю методу виділення контурів.

Будь-яка область D площини комплексної змінної містить внутрішні точки і точки контуру (граничні точки). Перші з них мають ту властивість, що не тільки вони самі, а й їх деякий окіл цілком належить області D . Точки контуру не є внутрішніми, але в будь-якому малому околі таких точок знаходяться внутрішні точки області D і точки, які не належать області D , – зовнішні (фонові) точки. Область D має властивість зв'язності, яка полягає у тому, що будь-які її точки з'єднуються лінією, яка повністю знаходиться в середині D .

Лінія контуру Γ називається опуклою, якщо прямолінійний відрізок, що з'єднує дві її будь-які точки, цілком складається з внутрішніх точок області D . Ділянка контуру буде увігнутою, якщо такий відрізок буде включати зовнішні (фонові) точки.

Внутрішній елемент (піксель) бінарного оцифрованого зображення $\omega (m_1, m_2)$ має властивість чотирьох-зв'язності, тобто суміжні з ним елементи – верхній, нижній, лівий і правий (уалежать $\omega (m_1, m_2)$).

Для обробки контуру аналітичним шляхом потрібно провести його кодування, тобто поставити у відповідність кожному контурному елементу певне число. Послідовність таких чисел називається кодом контуру.

На квадратній решітці можливі вісім різних стандартних розміщень.

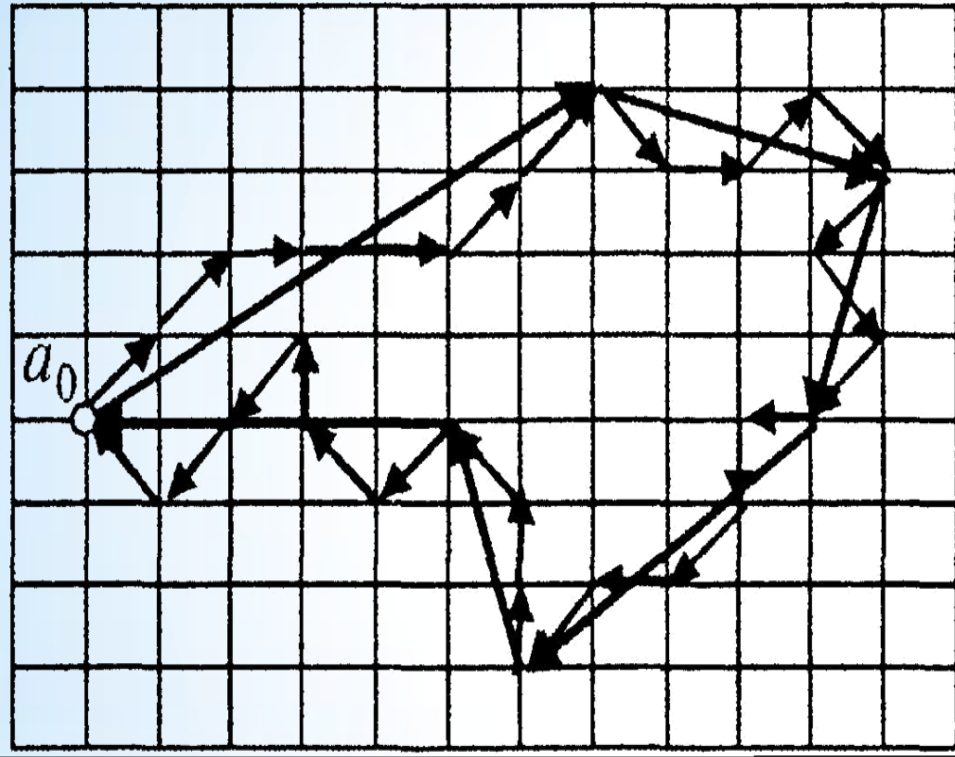
Способи кодування контурів

1. Кодування за трьома ознаками: довжині поточного елементарного вектора, напряму повороту при переході до наступного елементарного вектора і куту між сусідніми елементарними векторами.

2. Кодування поточного елементарного вектора трьохрозрядним двійковим кодом (числа від 0 до 7). Даний код був запропонований Фріменом отримав широке поширення в задачах обробки зображень.

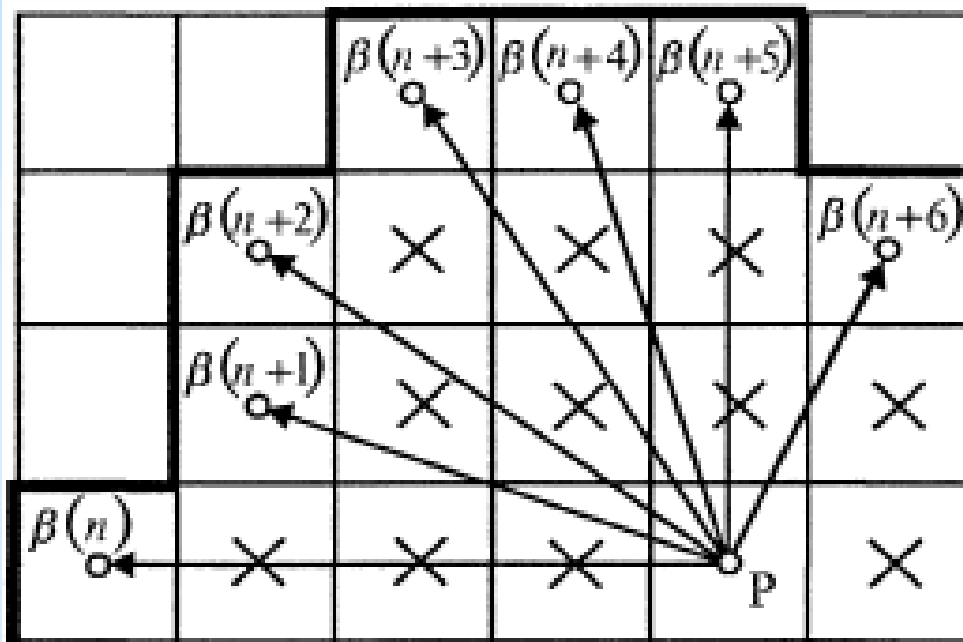
3. Кодування поточного елементарного вектора двома його проекціями на осі координат з початком відліку, поєднаним з початком елементарного вектора – двовимірний код.

4. Полігональне представлення контуру, що отримується при його апроксимації лінійними сегментами.



*Полігональне представлення
контуру за допомогою
апроксимації контуру лінійними
сегментами*

Кодування полягає у фіксації координат кінців цих сегментів (завдяки компактності одержуваних описів отримав широке поширення). При цьому виникає проблема сегментації, подібна з проблемою дискретизації сигналів. У реальних випадках проблема зазвичай пов'язана з втратою інформації про форму зображень.



Приклад задання фрагмента контуру в полярній системі координат

5. Подання лінії контуру полярним кодом. На зображенні $\omega (m_1 , m_2)$ вибирається полюс – початок відліку (т. P) звичайної (власної) системи координат (системи відліку, пов'язаної з цим зображенням). Центри всіх граничних точок зображення з'єднуються з точкою P . У результаті виходить послідовність радіус-векторів $\beta (n)$, що однозначно задають контур зображення. Часто центр суміщається з центром ваги зображення.

Методи виділення контурів можна розділити на дві великі групи:

- диференціальні (перепади інтенсивності підсилюються за допомогою чисельного диференціювання, потім виділяється контур за допомогою порогового пристрою, після чого бінарне зображення піддається вторинній обробці, мета якої – потоншення контуру до одного пікселя);
- кореляційно-екстремальні.

Диференціальні методи прості в реалізації і мають високу швидкодію, але мають низьку завадостійкість. Головним критерієм при оцінці завадостійкості виділення контурів є положення перепаду яскравості. Для визначення та опису контуру використовують два підходи: виділення країв або виділення області точки якої утворюють об'єкт.

До найбільш популярних методів відносять: оператор Робертса, Собеля, Превітта, Кірша, Робінсона, алгоритм Канні і LoG-алгоритм (алгоритми базуються на підкресленні різких перепадів яскравості, які характерні контурам об'єктів).

Оператор Собеля – дискретний диференціальний оператор, який обчислює наближене значення градієнта яскравості зображення. Використовується в області обробки зображень, зокрема, часто застосовується в алгоритмах виділення контурів. Результатом застосування оператора Собеля в кожній точці зображення є або вектор градієнта яскравості в цій точці, або його норма, що обчислюються за формулами:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * A \quad \text{і} \quad G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} * A$$

де A – вхідне зображення.

Оператор Канні – оператор виявлення контурів зображення (використовує багатоступінчастий алгоритм для виявлення широкого спектра контурів на зображеннях).

Канні дослідив математичну проблему отримання фільтра з оптимальними критеріями виділення, локалізації і мінімізації (фільтр є сумою чотирьох експонент і може бути добре наближений першою похідною Гауссіана, ввів поняття *Non-Maximum*, яке означає, що пікселями контурів оголошуються пікселі, в яких досягається локальний максимум градієнта в напрямку вектора градієнта).

Результатом роботи алгоритмів є набір незв'язних областей. Для отримання зв'язного контуру необхідно провести додаткову обробку, наприклад морфологічну для отримання зв'язного краю об'єкта, який і називається контуром об'єкта.

Оцінка характеризується низкою метрик, які показують наскільки точно збігається отримане зображення із оригіналом (середньоквадратичне відхилення (MSE) та пікове відношення сигналу до шуму (PSNR)).

Порівняльний аналіз роботи детекторів виділення контурів зображень

Критерії	Методи				
	Робертса	Лапласа	Превіта	Собеля	Канні
Середньоквадратичне відхилення	3508,14	11239,01	7297,56	11159,82	103,96
Пікове відношення сигнал/шум	12,68	7,62	9,5	7,65	42,16

Точки контуру представляють незначну частину всього зображення. Серед точок контуру існують такі, за допомогою яких можна ефективно описувати контур зображення об'єктів, оскільки при їх сполученні відрізками форма фігури зберігається .

Точки контуру, які передають суть фігури, знаходяться на ділянках значної кривизни контуру (ХТ контуру). Можна переходити до розпізнавання зображень використовуючи тільки інформацію про ХТ.

Дослідження можливості ідентифікації зображень за допомогою набору ХТ почалися в минулому столітті з робіт по стереоприв'язці з використанням детектора кутів.

ХТ –точки зображення, що володіють високою локальною інформативністю, тобто це точки максимуму, мінімуму, перегину і максимальної кривизни. ХТ називають точками інтересу, ключовими точками, точками уваги, особливими точками, точковими особливостями (*salient, keypoints, representative, feature points, characteristic points, inflection points*). Нариклад, кінці відрізка, вершини многокутників, точки перегину ламаної, точки перегину сплайнів, кінцеві точки півосей еліпса.

Вимоги до ХТ:

- відмінність (distinctness) – ХТ повинна явно виділятися на фоні і бути унікальною у своїй околиці;
- інваріантність (invariance) – визначення ХТ повинно бути незалежне від афінних перетворень;
- стабільність (stability) – визначення ХТ повинне бути стійким до шумів помилок;
- унікальність (uniqueness) – крім локальної відмінності, ХТ повинна володіти глобальною унікальністю для поліпшення розрізнення повторюваних елементів;
- інтерпретованість (interpretability) – ХТ повинні визначатися так, щоб їх можна було використовувати для аналізу відповідностей і виявлення інтерпретованої інформації із зображення.

Афінне перетворення ([лат.](#) *affinis*, «пов'язаний з») — відображення площини або простору в собі, при якому паралельні прямі переходять у паралельні прямі, пересічні — в пересічні, мимобіжні — в мимобіжні ($f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$).

$$f(x) = M \cdot x + v,$$

де M — невироджена матриця і $v \in \mathbb{R}^n$.

Властивості, якими повинні володіти ХТ:

- повторюваність (repeatability) – ХТ знаходиться в одному і тому ж місці сцени або об'єкта зображення, незважаючи на зміни точки огляду і освітленості;
- відмінність / інформативність (distinctiveness / informativeness) –
- повинен бути окіл ХТ, де вона повинна мати великі відмінності від решти точок в цьому околі, так, щоб можливо було виділити і зіставити особливі точки;
- локальність (locality) – ХТ повинна займати невелику область зображення, щоб зменшити ймовірність чутливості до геометричних і фотометричеським спотворень між двома зображеннями, знятих в різних точках огляду;
- кількість (quantity) – число виявлених ХТ має бути достатньо великим, так щоб їх вистачило для виявлення навіть невеликих об'єктів (оптимальна кількість ХТ залежить від предметної області, кількість виявлених ХТ має адаптивно визначатися з використанням простого й інтуїтивного порога, щільність розташування ХТ повинна відображати інформаційний вміст зображення, щоб забезпечити його компактне представлення;
- точність (accuracy) – виявлені ХТ повинні точно локалізувати, як у вихідному зображенні, так і взятому в іншому масштабі;
- ефективність (efficiency) – час виявлення ХТ на зображенні має бути допустимим в критичних за часом додатках.

Виділення ХТ на зображенні відноситься до процедури контурної сегментації (КС). Основною перевагою використання ХТ для задач ідентифікації є відносна простота і швидкість їх виявлення.

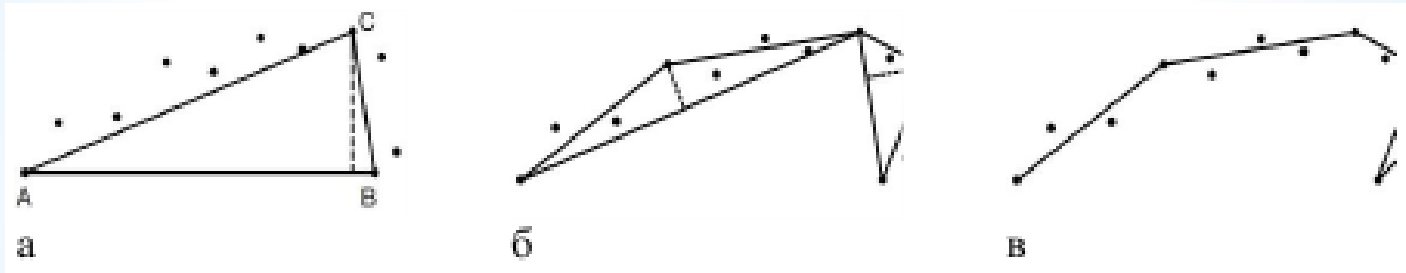
Методи виділення ХТ:

- диференціальний;
- полігональний;
- інтерполяційний.

Диференціальний метод полягає в аналізі функції кривизни контуру, як диференціальної функція координат контуру, яка має властивості інваріантності до зсуву, повороту. З математичної точки зору такий підхід пов'язаний з природнім рівнянням кривої, яке визначає її кривизну як функцію довжини дуги. Метод є еквівалентним встановленню природного рівняння кривої її екстремальними точками. ХТ є точки перегину та екстремуми функції кривизни та кінцеві точки. Для пошуку ХТ диференціальним методом потрібно побудувати функцію кривизни та дослідити її на екстремуми.

В силу своєї диференціальної природи цей метод *має низьку завадостійкість* (не стійкий до шумів), а також не можна регулювати кількість виділених ХТ.

Полігональний метод полягає у послідовному вписуванні многокутників контур зображення із наперед заданою точністю, а ХТ будуть вершини вписаного многокутника.



Ітеративний підбір кінцевих точок: а – перший етап; б – другий етап; в – третій етап

На першому етапі роботи алгоритму полігонального методу, представлені кінцеві точки A і B з'єднуються прямою лінією. Потім шукається точка, відстань від якої до прямої, що містить побудований відрізок є найбільшою (точка C). Якщо відстань велика (перевищує наперед задану точність), то ця точка відноситься до ХТ та береться в якості точки з'єднання двох відрізків (AC і CB). Дана процедура повторюється для кожного з відрізків до тих пір, поки всі точки контуру будуть знаходитись на відстані, яка менша за наперед задану точність.

Алгоритм полігональної апроксимації складний в реалізації і не володіє достатньо великою швидкістю.

Інтерполяційний метод виділення ХТ контуру зображення полягає в підборі найдовшого прямолінійного відрізка між двома точками контуру так, щоб відстань від проміжних точок контуру до прямолінійного відрізка не перевищувала наперед заданого порогу *DELTA*.

Основні кроки алгоритму:

1. Вводиться масив координат прослідкованих точок контуру (x та y), довжина інтерполяційного відрізка (n – кількість точок) та поріг (*DELTA* – відстань від інтерполяційного відрізка до точки контуру).

2. Визначається кількість точок (N – довжина) вхідного масиву та оголошуються додаткові змінні.

3. Поки не пройдено усі точки контуру виконуються наступні операції:

3.1. Вибирається дві точки у вхідному масиві ($v1$ та $v2$), що є початком та кінцем інтерполяційного відрізка довжиною в n точок. Через даний відрізок проводиться промінь з початком в точці $v1$.

3.1.1. В циклі послідовно (починаючи з наступної точки, що знаходиться після точки – початку інтерполяційного відрізка $v1$) обчислюється відстань ($delta$) від поточної точки контуру до інтерполяційного променя.

3.1.2. Якщо відстань від поточної точки до інтерполяційного відрізка ($delta$) перевищує заданий поріг (*DELTA*), то дана точка визначається як характерна, і заноситься в масив характерних точок (ХТ).

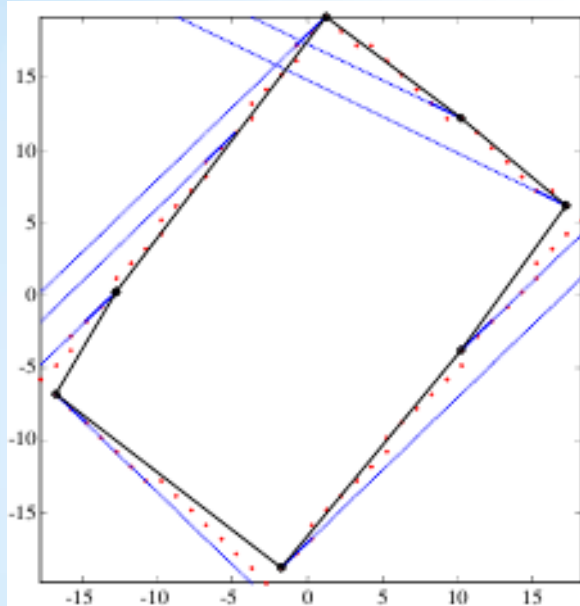
3.1.3. Здійснюється перехід до обробки наступних точок контуру (крок 3.1), під час якого знайдена характерна точка стає початком наступного інтерполяційного відрізка ($v1$).

4. Для графічного представлення, шляхом нанесення ХТ на контур зображення та їх послідовного сполучення, для замикання контуру перша характерна точка заноситься в кінець масиву та здійснюється вихід з алгоритму.

Демонстрація роботи інтерполяційного методу

Чотирикутник (розмір вхідного зображення 92x76 пікселів):

жирними точками позначено контур зображення (кількість точок – 82), інтерполяційні відрізки довжиною $n=2$ сполучені суцільною лінією, їх продовження зображено штриховою лінією. ХТ виділені даним алгоритмом додатково обведені (на представленому рисунку поріг $DELTA=2$).



Нехай $I = [(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)]$ – множина точок контуру зображення з центром $(0,0)$, впорядкована за їхнім кутом в полярних координатах $[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]$, $\theta_i \leq \theta_{i+1}$, $i = 1, 2, \dots, N - 1$; I_{EXT} , I_{INT} – підмножини точок контуру, що мають максимальні і мінімальні значення полярного радіусу для певного полярного кута:

$$I_{EXT} = \left[(x_i, y_i) \mid i = \arg \max_i \rho_i, \theta_i = \theta, \forall \theta \in \Theta \right],$$

$$I_{INT} = \left[(x_i, y_i) \mid i = \arg \min_i \rho_i, \theta_i = \theta, \forall \theta \in \Theta \right],$$

де Θ – підмножина унікальних значень полярних кутів $\Theta \subseteq [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]$; $\rho_i \in [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N]$ – множина полярних радіусів точок I .

Введемо підмножину ХТ контуру Γ ($\Gamma \subseteq I$), тоді якість множини ХТ можна оцінити за формулами:

$$Q_1 = \int_{-\pi}^{\pi} (F_{EXT}(\theta) - C(\theta))h(F_{EXT}(\theta) - C(\theta))d\theta,$$

$$Q_2 = \int_{-\pi}^{\pi} (C(\theta) - F_{INT}(\theta))h(C(\theta) - F_{INT}(\theta))d\theta,$$

Інтерполяцію функцій $F_{EXT}(\theta)$, $F_{INT}(\theta)$ та $C(\theta)$ можна виконати таким чином:

якщо $\theta > \theta_N$ або $\theta < \theta_1$, то шукаємо точку (x', y') перетину відрізка $(x_1, y_1) - (x_N, y_N)$ з бігучою прямою інтегрування $y = x \tan \theta$, тоді

$$\rho = \sqrt{(x')^2 + (y')^2}.$$

де ρ – це точкове значення однієї з функцій $F_{EXT}(\theta)$, $F_{INT}(\theta)$ чи $C(\theta)$;

інакше, якщо $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_N$, то знаходимо на множині полярних кутів $[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]$ інтервал $\theta_i \leq \theta \leq \theta_{i+1}$, $i = 1, 2, \dots, N - 1$ і шукаємо точку (x', y') перетину відрізка $(x_i, y_i) - (x_{i+1}, y_{i+1})$ з бігучою прямою інтегрування $y = x \tan \theta$, причому $\tan \theta = \text{tg}(\theta + \pi)$, якщо $\text{tg}(x)$ – функція тангенсу для $0 \leq x \leq 2\pi$.

Рівняння прямої $(x_i, y_i) - (x_{i+1}, y_{i+1})$ записується так:

$$\begin{cases} y_i = ax_i + b, \\ y_{i+1} = ax_{i+1} + b, \end{cases}$$

де $(x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1})$ – відомі координати крайніх точок відрізка, a, b – невідомі коефіцієнти.

Віднімаємо від першого рівняння друге:

$$y_i - y_{i+1} = a(x_i - x_{i+1}),$$

Звідки

$$\frac{y_i - y_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} = a,$$

$$y_i - \frac{y_i - y_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} x_i = b,$$

Точка перетину (x', y') знаходиться з рівняння

$$ax' + b = x' \tan \theta,$$

$$b = x'(-a + \tan \theta),$$

$$\frac{b}{-a + \tan \theta} = x',$$

$$y' = a \frac{b}{-a + \tan \theta} + b.$$

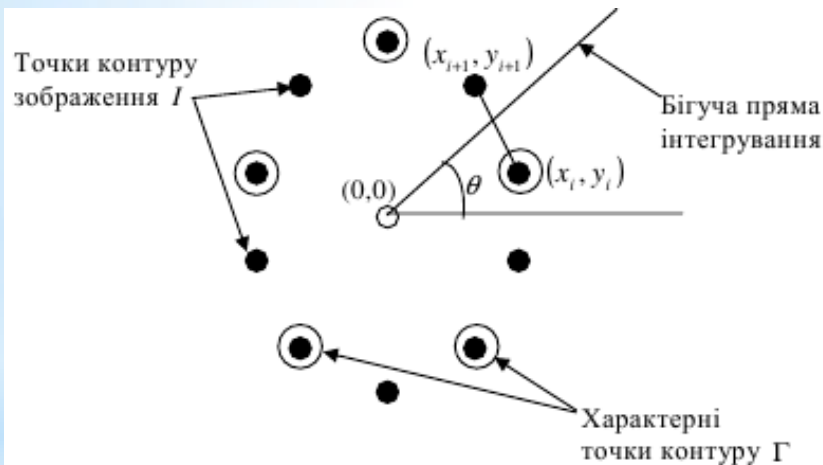
коли ж $\theta = \frac{\pi}{2}$ або $\theta = \frac{3\pi}{2}$, то бігуча пряма інтегрування є вертикальною і

тоді точка перетину визначається так:

$$x' = 0,$$

$$y' = b.$$

Поняття характерних точок та бігучої прямої інтегрування проілюстровано рисунком



Виділення ХТ залишається предметом активних досліджень. Основним алгоритмічним апаратом, що застосовується для виділення ХТ, є аналіз функції кривизни контуру. В силу своєї диференціальної природи вона має низьку завадостійкість. До недоліків полігонального методу відносять складність в реалізації та високі вимоги до обчислювальних затрат, а в інтерполяційному методі – низька точність виділення ХТ.

Поняття ХТ та бігучої прямої

Актуальною залишається задача розробки методу виділення ХТ, який має властивості:

- завадостійкий;
- простий в реалізації;
- висока швидкодія;

точний у визначенні координат характерних точок.

2. Комбінований адаптивний метод ідентифікації об'єктів на основі ієрархічного принципу

2.1. Метод контурної сегментації

Контури зображень є областями з високою концентрацією інформації, яка мало залежить від кольору та інтенсивності. При розгляді будь-якого об'єкта в свідомості людини формується зоровий образ. При сприйнятті очима відстежується лінія контуру, що призводить до створення в свідомості образу. Контурний аналіз є сукупністю методів виділення, опису та перетворення контурів зображень та розпізнавання зорових образів.

Контур цілком визначає форму зображення і містить всю необхідну інформацію для розпізнавання зображень за їх формою. Такий підхід дозволяє не розглядати внутрішні точки зображення і тим самим значно скоротити обсяг інформації, що обробляється. Наслідком цього часто стає можливість забезпечення роботи системи в режимі реального часу.

Контур – просторово-протяжний розрив, перепад або стрибкоподібна зміна значень інтенсивності. Існує ряд проблем при виділенні контурів зображення: розриви контуру в місцях, де інтенсивність змінюється не дуже швидко; наявність помилкових контурів внаслідок шуму на зображенні; широкі контурні лінії через розмитість або шум.

Контурний аналіз дозволяє описувати, зберігати, порівнювати і робити пошук об'єктів, представлених у вигляді своїх зовнішніх контурів, а також ефективно вирішувати основні проблеми розпізнавання образів - перенесення, поворот і зміна масштабу зображення об'єкта.

Однією з головних цілей обробки зображень є інтерпретація вмісту на зображенні. Для цього необхідно відокремити фон від об'єктів. Сегментація дозволяє розділити зображення на складові частини або об'єкти, вона відокремлює об'єкт від фону, щоб можна було легко обробляти зображення і ідентифікувати його вміст. Виділення контурів на зображенні є фундаментальним засобом для якісної сегментації зображення. Вони в значній мірі зменшують кількість даних для обробки зображення, зберігаючи при цьому важливу інформацію про об'єкти на зображенні, таку як їх форму, розмір, кількість. Ступінь деталізації, до якої проводиться такий поділ, залежить від мети поставленої задачі, тобто, сегментацію слід припинити, коли об'єкти, що цікавлять виявляються ізольованими.

Алгоритми сегментації зображень ґрунтуються на одному з двох базових властивостей яскравості сигналу: однорідності і перепадах інтенсивності.

На даний час не існує універсального методу чи алгоритму виділення контурів зображень. Кожен з алгоритмів вирішує свій клас завдань, якісно виділяючи лише контур певного типу, тому задача створення методів контурної сегментації зображення є актуальною.

Найбільш загальним способом пошуку контурів зображення є обробка зображення за допомогою накладання маски (замість маски Собеля, як зроблено в методі Канні, запропоновано використати вейвлети).

Вейвлет-перетворення (*wavelet*, вейвлет, хвильки, хвилькові перетворення). Усі вейвлет-перетворення розглядають функцію (взяту як функцією від часу) у термінах коливань, локалізованих за часом (простором) і частотою. Локальність у просторі означає, що енергія хвильок (вейвлетів) сконцентрована на скінченному інтервалі, так звана функція на компактному носії. Частотна локалізація означає, що перетворення Фур'є хвильки локалізоване. Частотна локалізація функції зводиться до понять гладкості та кількості зникаючих моментів. Вейвлет-перетворення звичайно поділяють на дискретне вейвлет-перетворення (DWT) та неперервне вейвлет-перетворення (CWT).

Ієрархічний метод КС полягає в реалізації наступних кроків:

1) Згортка рядка зображення вейвлет-функцією.

Для вейвлету розміром n , ця процедура заснована на обчисленні лінійної комбінації зі значеннями інтенсивності пікселів зображення, що покриваються вейвлетом.

Для покращення збіжності вейвлет-перетворення, виконується доозначення крайнього ряду пікселів, шляхом їхнього копіювання на довжину вейвлета:

$$z_{i,j} = \begin{cases} I_{i,1}, & \text{якщо } j < n, \\ I_{i,M}, & \text{якщо } j > M + n \\ I_{i,j-n+1}, & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

де $I_{i,j}$ - піксель оригінального зображення, $i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, M$; $z_{i,j}$ - піксель доозначеного зображення, $i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, M + 2n$; n - довжина вейвлета.

Для кожної точки зображення обчислюємо:

$$WX_{i,j} = \sum_{k=i-n}^{i-1} w_k z_{k,j} + \sum_{k=i+1}^{i+n} w_k z_{k,j}$$

де $z_{k,j}$ - значення яскравості (інтенсивності) пікселя, що відповідає коефіцієнту w_k вейвлету. Результат вейвлет-перетворення записується в центральний елемент.

Аналогічно доозначуємо зображення по осі ОУ:

$$z_{i,j} = \begin{cases} I_{1,j}, & \text{якщо } i < n, \\ I_{N,j}, & \text{якщо } i > N + n \\ I_{i-n+1,j}, & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

де $I_{i,j}$ - піксель оригінального зображення, $i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, M$; $z_{i,j}$ - піксель доозначеного зображення, $i = 1, 2, \dots, N + 2n$, $j = 1, 2, \dots, M$; n - довжина вейвлета.

Такі ж обчислення проводимо і по осі ОУ:

$$WY_{i,j} = \sum_{k=j-n}^{j-1} w_k z_{i,k} + \sum_{k=j+1}^{j+n} w_k z_{i,k}$$

В результаті отримаємо дві матриці того ж розміру, що й вхідне зображення: $WX_{i,j}$ та $WY_{i,j}$.

При згортці зображення вейвлет-функцією по осі OX , найбільші значення будуть на вертикальних лініях товщиною в 1 піксель. Причому, на областях зображення з постійною інтенсивністю значення буде дорівнювати 0, оскільки сума коефіцієнтів вейвлету дорівнює нулю. Аналогічно, при згортці стовпця зображення вейвлет-функцією по осі OY – найкраще будуть виділятися горизонтальні лінії.

Встановлення порогу (пороговий фільтр).

Поріг встановлюється для значення інтенсивності пікселів: якщо значення інтенсивності менші за поріг, то заміняємо її на 0, ту ж, що вища порогу – залишаємо без змін.

В результаті отримаємо дві матриці того ж розміру, що й вхідне зображення $WX'_{i,j}$ та $WY'_{i,j}$:

$$WX'_{i,j} = \begin{cases} WX_{i,j}, & \text{якщо } WX_{i,j} > P \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

$$WY'_{i,j} = \begin{cases} WY_{i,j}, & \text{якщо } WY_{i,j} > P \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

де P – значення порогу.

Після цього переходимо до пошуку перепадів інтенсивності. Перепад – це зв'язана тим чи іншим критерієм множина пікселів, що лежать на межі між двома областями.

3) Морфологічна обробка по градієнту.

Обчислюємо величину градієнта для визначення величини стрибка інтенсивності та його напрям. Контур відзначається там, де градієнт зображення набуває максимального значення.

Величина градієнта характеризує швидкість зміни функції f в точці (x, y) та обчислюється за формулою:

$$\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}$$

Напрямок вектора градієнта співпадає з напрямом максимальної швидкості зміни функції в точці та обчислюється за формулою:

$$\nabla f = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

Ця величина дорівнює значенню максимальної швидкості зміни функції f в точці, причому максимум досягається в напрямку вектора ∇f . Величину ∇f часто називають градієнтом. Напрямок вектора градієнта також є важливою характеристикою. Позначимо $\alpha(x, y)$ - кут між напрямком вектора ∇f в точці (x, y) і віссю Ox , отже:

$$\alpha(x, y) = \arctg\left(\frac{G_y}{G_x}\right)$$

Звідси легко знайти напрям контуру в точці (x, y) , що перпендикулярний до напрямку вектора градієнта в цій точці.

Тільки максимуми величини градієнта позначаються як границі. До контуру відносимо пікселі, в яких досягається максимум градієнта в напрямку вектора градієнта.

Дані кроки проводимо окремо для двох матриць $WX'_{i,j}$ та $WY'_{i,j}$, а отриманий контурний препарат складаємо за схемою логічного «або»

Після того як отримали перший контур (найвищого рівня ієрархії), для отримання контуру наступного рівня ієрархії, зменшуємо довжину вейвлета та переходимо до кроку 1. Але вже працюємо не із всім зображенням, а тільки з тою частиною, що знаходиться в середині контуру вищого на один порядок рівня ієрархії.

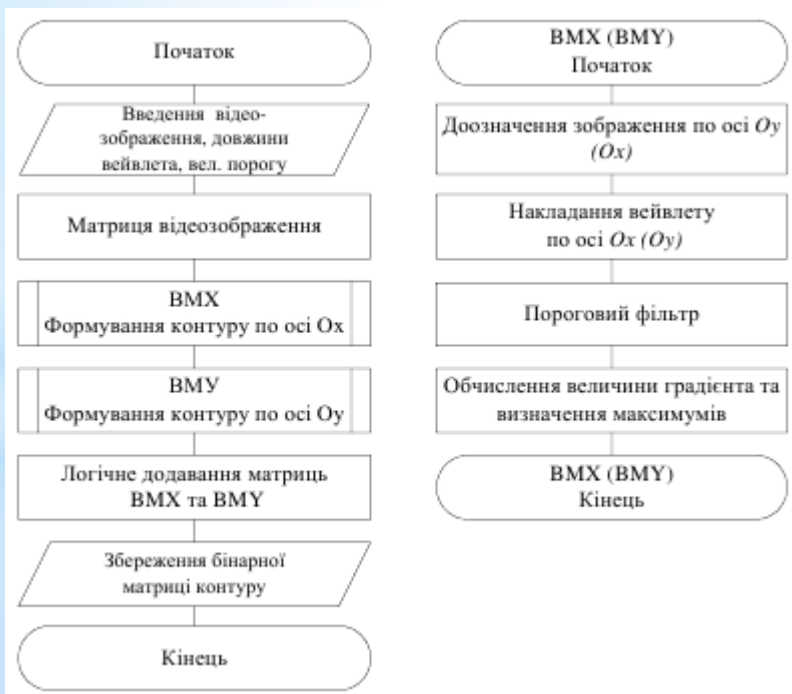


Схема методу виділення контурів

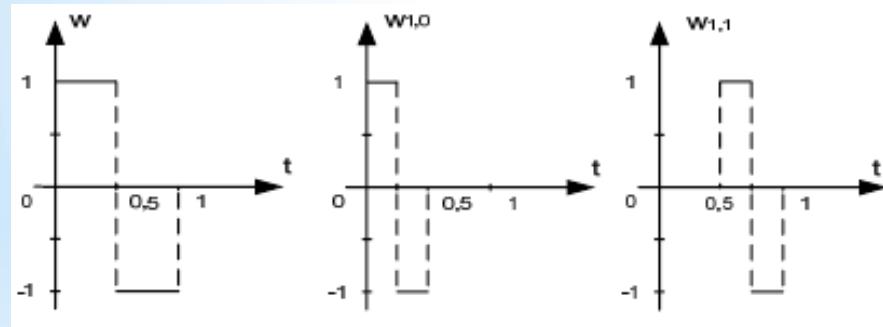
При виборі довжини вейвлета потрібно керуватись геометричними розмірами об'єктів, з яких складається зображення. На першому етапі довжина вейвлета повинна відповідати геометричним розмірам «найбільшого об'єкта» і з переходом на наступні рівні повинна зменшуватись відповідно до розмірів об'єкта. Критерієм виходу з циклу буде досягнення потрібного рівня деталізації. Ступінь деталізації, до якої проводиться такий поділ, залежить від мети поставленої задачі, тобто, сегментацію слід припинити, коли об'єкти, що цікавлять виявляються виділеними.

Перевага методу - замкнутість контурів, а також можливість ігнорування надлишковою відеоінформацією за допомогою згортки відеоінформації вейвлет-функцією (дозволяє розбити відеоінформацію на сукупність ієрархічних контурів деталізації «контур – підконтур»).

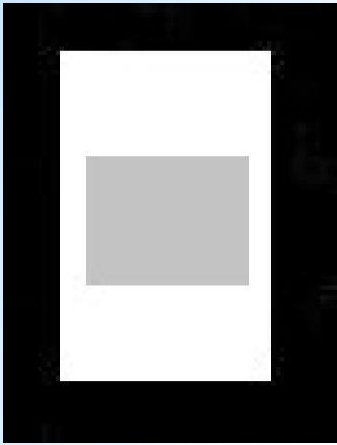
Перетворення зображення виконується за допомогою вейвлету Хаара (має низьку обчислювальную складність, реалізуючи множення на +1 та -1, що значно спрощує його апаратну реалізацію та, підвищує оперативність).

Функція $w(t)$ називається функцією Хаара (рисунок 2.2 а) одиничного масштабу і нульового зміщення (материнський вейвлет Хаара) – це функція, що дорівнює +1 на інтервалі $[0; 1/2)$ і -1 на інтервалі $[1/2; 1)$. А функції, що представлені на рисунках 2 б та 2 в можуть бути отримані перетвореннями (стисненням та розтягуванням відносно осі абсцис) і зсувом аргументу функції $w(t)$, що визначається формулою:

$$w(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, 1/2), \\ -1, & t \in [1/2, 1), \\ 0, & t \notin [0, 1). \end{cases}$$



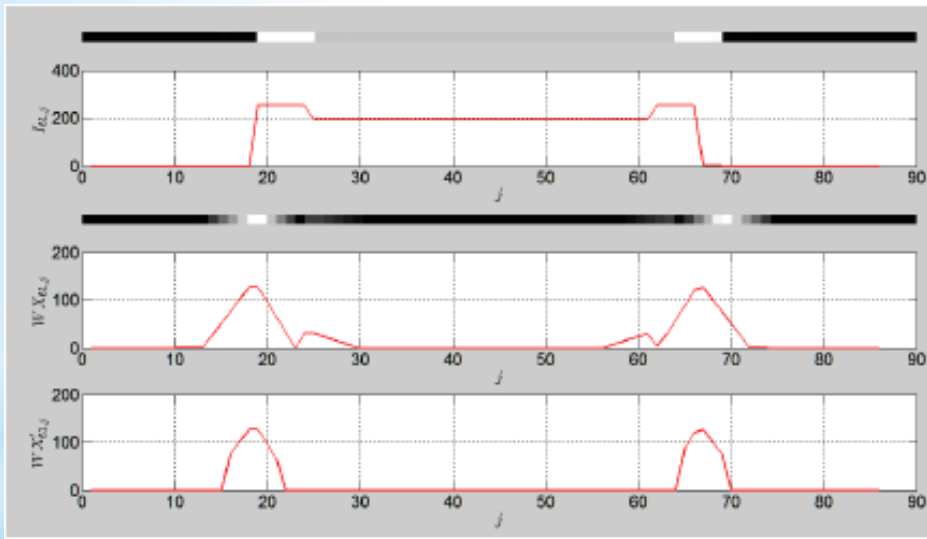
Вейвлети Хаара



Тестове зображення

Зображення підготоване з врахуванням особливостей предметної області (відтворює набір характерних ознак реальних об'єктів у областях чорного, білого та сірого кольору).

Зображення є репрезентативним (за показниками продуктивності і точності можна судити про середню якість опрацювання реальних об'єктів).

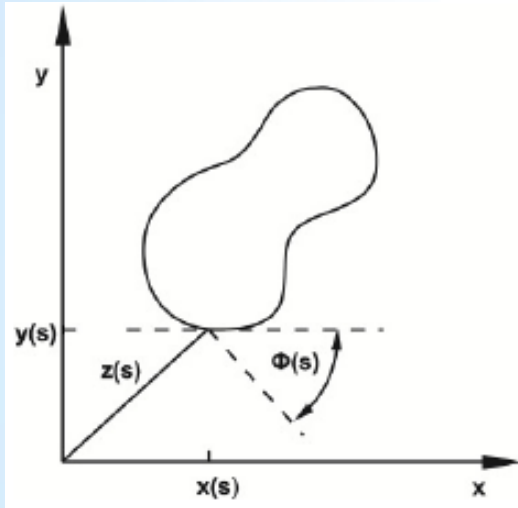


Стрічка зображення із накладеним на неї вейвлетом Хаара, графік інтенсивності її пікселів ($WX_{61, j}$), графік, що утворюється після встановлення порогу $WX'_{61, j}$.

Зображення отримано після накладання вейвлетів на всі пікселі зображення загалом: а) – по рядках, в) – по стовпцях; та встановлення порогу (б, г).

2.2. Аналіз функції кривизни

Основним алгоритмічним апаратом, що використовується для виділення характерних точок контуру є аналіз функції кривизни.



Безперервна замкнена крива в комплексній площині для якої положення точки на периметрі задається її координатою $z(s)$, залежною від довжини s .

Комплексну функцію $z(s)$ можна представити у вигляді її дійсної $x(s)$ та уявної $y(s)$ складових: $z(s) = x(s) + iy(s)$

Кут нахилу дотичної визначається виразом:

$$\Phi(s) = \operatorname{arctg} \left[\frac{dy(s)/ds}{dx(s)/ds} \right],$$

Кривизна $k(s) = d\Phi(s) / ds$

Знаючи функцію кривизни, координати точок $x(s)$ і $y(s)$ можна отримати за формулами:

$$\begin{aligned} x(s) &= x(0) + \int_0^s k(\alpha) \cos[\Phi(\alpha)] d\alpha, \\ y(s) &= y(0) + \int_0^s k(\alpha) \sin[\Phi(\alpha)] d\alpha, \end{aligned}$$

де $x(0)$ і $y(0)$ – координати початкової точки.

3. Метод класифікації даних на основі класстерного аналізу

В загальній теорії розпізнавання образів існує кілька різних підходів до