

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

УДК 681.2

ВИДІЛЕННЯ КОНТУРУ ОБЕРТОВОЇ КРАПЛІ МЕТОДОМ РАДІАЛЬНОЇ РОЗГОРТКИ ПРИ ВИМІРЮВАННІ МІЖФАЗНОГО НАТЯГУ

© Порєв В. А., Порєв Г. В., 2000
НТУ У "Київський політехнічний університет"

© Кісіль Р. І., 2000

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

Описаний алгоритм виділення контуру обертової краплі, зображення якої формується телевізійною камерою і передається на програмно-технічний комплекс. Доведено, що найкращим методом розпізнавання контуру у вигляді еліпсу є метод радіальної розгортки.

Визначення низьких значень міжфазного натягу (МН) можна здійснювати лише методом обертової краплі, який передбачає вимірювання певних геометричних параметрів краплі рідини, що обертається в середовищі більш тяжчої із досліджуваних рідин. Існує декілька методик визначення МН методом обертової краплі, кожна із яких передбачає вимірювання або довжини краплі і її діаметру, або тільки діаметру тощо. Відома також методика [1], яка передбачає вимірювання співвідношення діаметрів краплі у певних фіксованих її точках, а також довжини краплі. Перевагою вказаної методики є відсутність у формулі для визначення МН коефіцієнта збільшення оптичної системи M , який виникає внаслідок проходження променів через капіляр із досліджуваними рідинами. При цьому вимірювання геометричних розмірів обертової краплі запропоновано здійснювати за допомогою телевізійної системи контролю (ТСК). Однак, при цьому постає проблема чіткого виділення контуру краплі, на основі якого можна здійснити усі необхідні вимірювання. Контур краплі – це лінія перепаду інтенсивності освітленості між освітленою зоною (зовні краплі) і затемненою (сама крапля).

Суть методу пошуку контуру краплі полягає в обробці зображення, яке отримується від телевізійної камери у градаціях сірого (256 відтінків від білого до чорного). Якщо зображення є абсолютно білим, то інтенсивність сигналу (цифрове значення певного пікселу) дорівнює 255. Якщо зображення у точці (пікселі) є абсолютно чорним, то інтенсивність дорівнює 0. Усі інші інтенсивності є відтінками сірого кольору. Зображення, яке отримується від телевізійної камери має розмір 640×480 точок, кожна з яких має певну інтенсивність освітленості.

В загальному випадку задача виділення конту-

рів зображень складної форми зводиться до визначення відносних перепадів сигналу (ВПС) по вибраній групі послідовних піксел [2].

Базовими одиницями алгоритму, що автоматично здійснює пошук ВПС, є чутливий маркер (ЧМ) - об'єкт, який складається з одновимірного масиву даних M певної довжини, підпрограма визначення перепадів інтенсивності сигналу *GetDiff* в ЧМ та підпрограма знаходження центру мас інтенсивності сигналу *GetCenter* в ЧМ.

Алгоритм із отриманого зображення краплі за спеціальними правилами формує масив сигналів L , в якому, імовірно, присутній відносний перепад величин інтенсивності сигналу, що відповідає границі краплі. Для запуску алгоритму викликаюча програма повинна задати такі параметри: показник довжини масиву L_L , напрямку руху ЧМ (прямий чи зворотній), потрібну довжину ЧМ L_M , крок руху ЧМ S_M , величину відносного перепаду інтенсивності сигналу D .

Масиви L і M уявляють собою вибірки певної довжини із оброблюваного зображення, кожний елемент якого є точка зображення, а значенням цього елемента є інтенсивність освітлення у вказаній точці.

Функціонування алгоритму протікає в тілі умовного циклу, умовою виходу з якого є або знаходження ВПС, або помилка, пов'язана з виходом ЧМ за межу масиву сигналів L . На початку циклу у масив M завантажуються частина масиву L з позиції $P_M = 0$ (для прямого напрямку руху) або з позиції $P_M = L_L - L_M$ (для зворотного), вказується довжина цієї частини та викликається підпрограма *GetDiff*. Якщо підпрограма *GetDiff* визначила, що у ЧМ при-

сутній перепад інтенсивності, що перевищує або дорівнює заданому перепаду D , то вважається, що ЧМ знайшов ВПС. При цьому алгоритм припиняє своє виконання і повертає у програму визначення МН значення координати, враховуючи результат, повернений підпрограмою *GetCenter*. Якщо величина, що повернута підпрограмою *GetDiff* є менша від D , то в кожній наступній n -ій ітерації у масив M завантажуються частина масиву L , починаючи з

позиції $P = S_M \cdot n$ (для прямого напрямку руху) і $P = L_L - L_M - S_M \cdot n$ (для зворотного). Якщо $P_M > L_L - L_M$ (для прямого напрямку руху) або $P < 0$ (для зворотного), то алгоритм також припиняє своє виконання та повертає повідомлення про неможливість знаходження ВПС. Ілюстрація роботи цього алгоритму наведена на рис. 1.

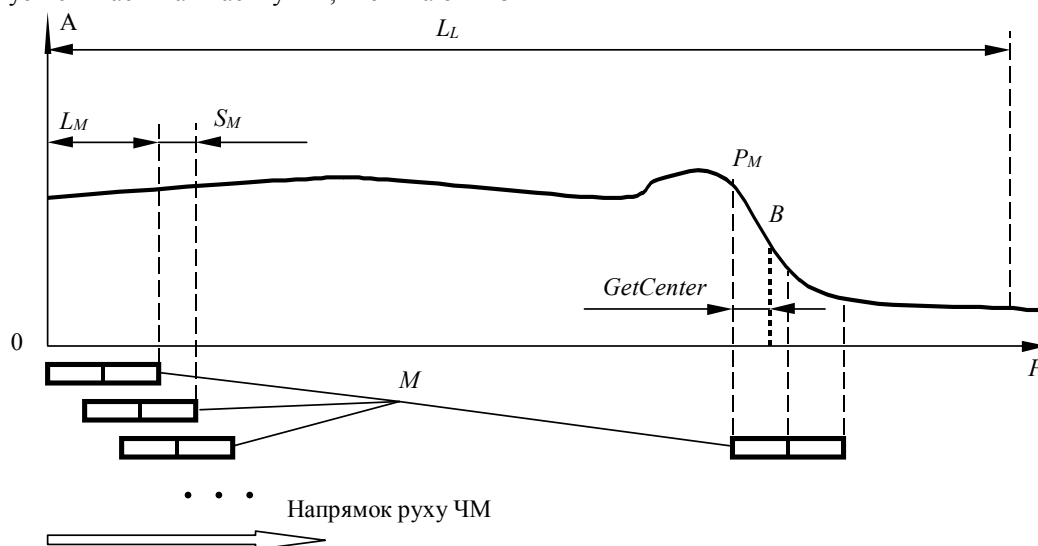


Рис. 1. Ілюстрація роботи алгоритму при проході у прямому напрямку.

Підпрограма *GetDiff* умовно розділяє масив M на дві рівні частини та обчислює середнє значення інтенсивності сигналу в кожній з них. Різниця між цими значеннями і є перепадом інтенсивності сигналу вздовж ЧМ.

Підпрограма *GetCenter* призначена для знаходження межі ВПС. Оскільки різкі бінарні перепади (тобто перепади інтенсивності сигналу в сусідніх пікселях) в задачах аналізу зображень зустрічаються порівняно рідко, то постає питання про встановлення позиції, яку можна з певною точністю вважати межею ВПС. В даному алгоритмі застосовується принцип центру мас, тобто межею призначається така позиція B в масиві M (рис. 1), при якій функція $\Delta(B)$ приймає найменше значення, тобто

$$\Delta(B) = \left| \sum_{i=0}^B M[i] - \sum_{i=B}^{L_M} M[i] \right| \Rightarrow \min. \quad (1)$$

Незважаючи на видиму простоту функціонування алгоритму, необхідно зробити певні застереження щодо ефективності його застосування. Наприклад, в алгоритмі передбачається два можливі напрямки руху — з початку масиву L та з його кінця. Можна довести, що при деякому значенні параметрів L_M та D ми можемо отримати різні значення позиції зупинки ЧМ для різних напрямків. Зокрема, при вирішенні задачі визначення геометричних роз-

мірів обертової краплі за допомогою телевізійних систем контролю [3] нами було проаналізовано вплив значень параметрів на позицію зупинки ЧМ. Типовий розподіл інтенсивності сигналу A для цього випадку зображено на рис. 2.

Алгоритм знаходження ВПС передбачає рух ЧМ і в одному випадку і в протилежному напрямках. При русі ЧМ в одному напрямку підпрограма *GetDiff* може відзначити, що вздовж ЧМ досягнуто заданий перепад інтенсивності D , а при русі ЧМ в протилежному напрямку підпрограма *GetDiff* може зупинитись в іншій точці. Такий випадок може мати місце, якщо границя краплі не є досить контрастною при значенні величини D , яка є набагато меншою від існуючого перепаду інтенсивності на границі краплі. Також такий випадок може виникати при заданій великій довжині ЧМ (найменша і найкраща для визначення границі краплі довжина ЧМ є 2).

Залежність відстані між зупинками ЧМ у різних напрямках руху від параметрів L_M та D для вказаної задачі на рис. 2 наведена на рис. 3.

Як видно з рис. 3 найменша різниця, а отже, і найбільша точність визначення ВПС досягається при $26 < D < 32$ та $2 < L_M < 4$. В той же час відстань між зупинками маркерів зростає як при збільшенні L_M , так і при зменшенні D .

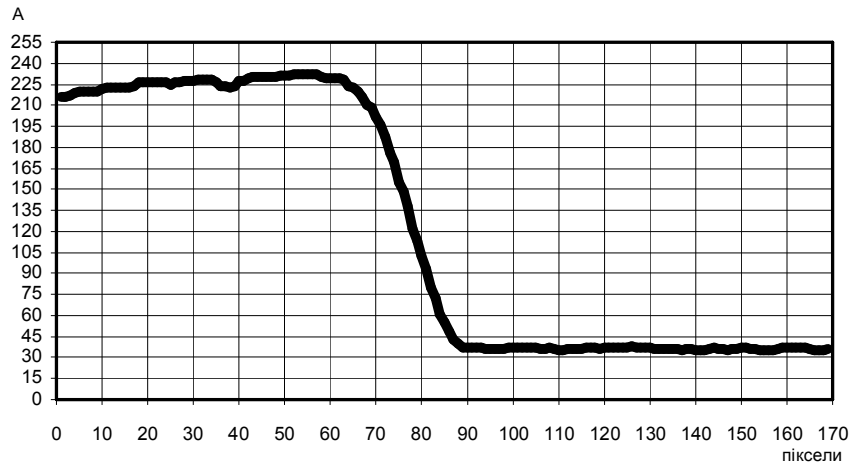


Рис. 2. Типовий розподіл інтенсивності сигналу A вздовж лінії, що містить ВПС.

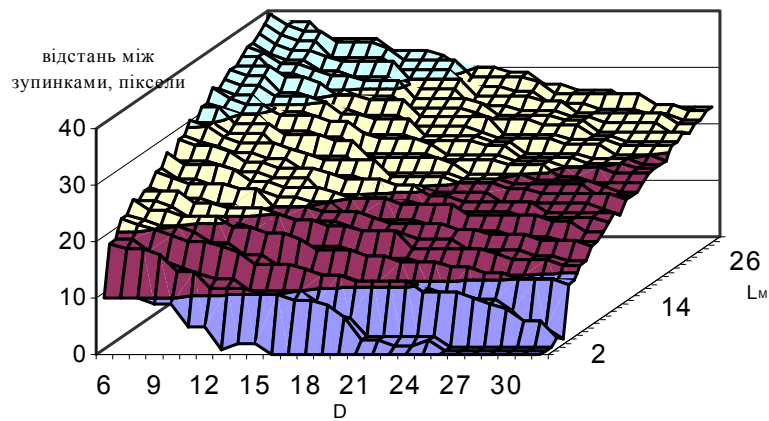


Рис. 3. Залежність відстані між зупинками ЧМ у різних напрямках руху від параметрів L_M та D .

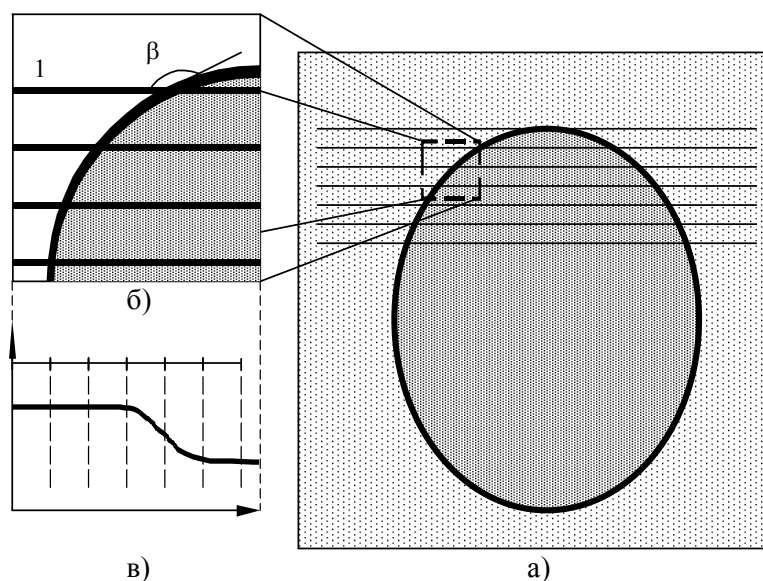
Певні похибки визначення можуть бути пов'язані також з параметрами S_M та L_M . Очевидно, що ЧМ може зупинитися тільки в позиціях масиву L . Найбільша точність визначення досягається при $S_M = 1$, проте значно зростає навантаження на обчислювальні ресурси програмно-технічного комплексу. Параметр L_M також суттєво впливає на точність визначення, оскільки ЧМ може видати сигнал про зупинку до того моменту, як середина ЧМ співпаде з позицією ВПС, і чим більше параметр L_M , тим імовірніша така ситуація. З іншого боку, збільшення величини цього параметру підвищує фільтраційні властивості ЧМ, тобто зменшує імовірність помилкової реакції ЧМ на завади в зображенні.

Якщо зображення являє собою двовірний масив даних, то і виявлення точок ВПС провадять найчастіше за напрямком строкової розгортки, послідовно заповнюючи масив L відповідними лініями розгортки та ініціюючи два незалежних ЧМ: на початку та на кінці лінії. Таке рішення, на перший по-

гляд, забезпечує досить швидке визначення контуру фігури, до того ж, враховуючи спорідненість послідовності формування масиву L з послідовністю формування рядків розгортки в зображенні, можливо деяку частину математичного навантаження перенести на пристрій введення відеосигналу. Проте під час сканування може виникнути така ситуація, коли ширина ділянки ВПС перевищить довжину маркера. Це, очевидно, буде тоді, коли кут β між дотичною до контуру геометричної фігури та лінією вибірки суттєво відхилиться від прямого, наприклад, в задачі ідентифікації контуру замкненої геометричної фігури типу "еліпс" (рис. 4).

Можливим наслідком такої ситуації стає те, що ЧМ не знайде ВПС, отже частина контуру втрачається.

Досвід практичного вирішення таких задач показує, що цими наслідками можна знехтувати, якщо припустити, що дотична до контуру фігури не має різких змін, відповідно, втрачені ділянки можна апроксимувати. Але надійна апроксимація контуру



а) — схема сканування за строковою розгорткою; б) — фрагмент контуру;
в) — розподіл сигналу по лінії сканування 1

Рис. 4. Причина помилкової ситуації.

можлива лише тоді, коли по обидва боки від втраченої частини присутні визначені правильно частини контуру. А в ситуації, яка виникає, коли лінії розгортки вперше досягають контуру фігури або тоді, коли лінія розгортки проходить останню частину зображення, зайняту фігурою, дотична до її контуру та напрям лінії розгортки практично збігаються. Поведінку алгоритму в такому разі важко передбачити, особливо з урахуванням того, що невідомо, де відносно середини скануючої лінії знаходиться група сигналів з контуру фігури.

Для вирішення цієї проблеми можна застосувати аналіз по додатковій розгортці (наприклад, вздовж осі Y зображення, Y -сканування) зображення за напрямом, перпендикулярним напрямку основної розгортки (X -сканування). Очевидно, що саме там, де результати одного сканування будуть певні та нечіткі, результати іншого будуть практично безпомилкові.

Такий спосіб дещо збільшує потрібний час на аналіз фігури за рахунок двох проходів сканування, проте він дозволяє повністю виділити контур геометричної фігури. Але практична реалізація цього способу потребує значних зусиль від розробників програмного забезпечення, оскільки гостро постає питання про встановлення зв'язку між незалежними масивами координат ВПС. Це питання пов'язане насамперед з тим, що дані про координати X і Y в зображенні для однієї і тієї самої точки контуру виявляються рознесеними по різним незалежним масивам даних.

Більш ефективним методом аналізу геометричних фігур типу "еліпс" за допомогою алгоритмів

визначення ВПС може бути розроблений нами метод радіальної розгортки (МРР). Цьому методу, як буде показано нижче, не властиві помилки, спричинені відхиленням дотичної, а на його базі можливо побудувати однопрохідний алгоритм з однозначним визначенням координат точок за ВПС.

МРР базується на заміні в адресації піксел зображення декартових координат на полярні. Початок координат вибирається приблизно в центрі фігури. Навколо фігури умовно проводиться контрольне коло, що обмежує зону сканування. Зображення сканується радіус-вектором ρ , що формує масив L (рис. 5).

Кількість радіус-векторів або кутовий крок вибираються виходячи з того, що кожен піксел контуру має бути врахований. Якщо радіус контрольного кола R пікселів, то кутовий крок сканування буде $\Delta\alpha = 1/R$ радіан, а кількість вимірних радіусів $N = \alpha / \Delta\alpha$.

Для подальших обчислень, якщо необхідно, можна застосувати перехід до декартової системи координат.

Як видно з рис. 5, саме завдяки застосуванню радіальної розгортки відхилення кута між дотичною до контуру та радіусом від прямого несуттєво по всьому периметру фігури незалежно від величини α .

Даний алгоритм дозволяє також ввести критерій правильності виділення контуру γ в межах кута α , яким можна користуватися для виявлення різноманітних дефектів. Визначимо сукупність вимірних радіусів фігури як деяку функцію $\rho(\alpha)$. Зформуємо числовий ряд різниць суміжних радіусів

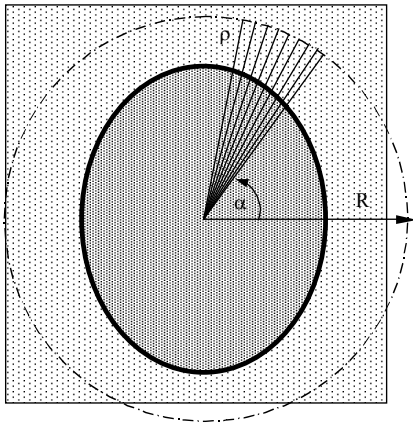
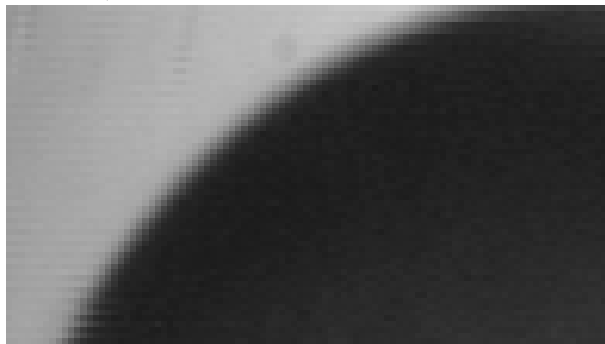


Рис. 5. Ілюстрація роботи алгоритму радіальної розгортки.

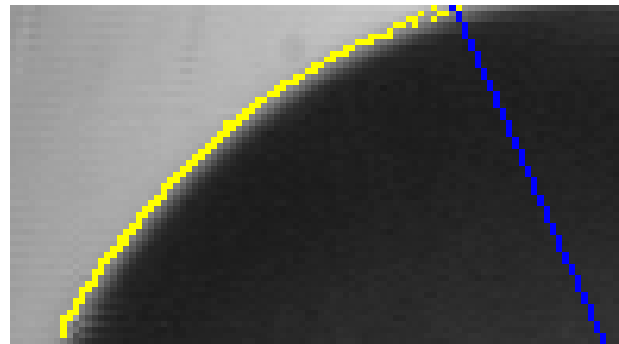
$$d(i) = |\rho(i \cdot \Delta\alpha) - \rho((i+1) \cdot \Delta\alpha)|. \quad (2)$$

Критерій γ визначимо, як середньоквадратичне відхилення числового ряду:

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \left(d(j) - \left(\sum_{i=1}^N d(i) / N \right) \right)^2}{N(N+1)}}. \quad (3)$$



а)



б)

а) — фрагмент вихідного зображення, б) — фрагмент зображення з виділеним контуром
Рис. 6. Фрагменти цифрового зображення типового об'єкту.

Таким чином, ефективне застосування телевізійних засобів контролю для визначення геометричних розмірів зображень складної форми і з малими значеннями контрасту можливе тільки при використанні МРР.

Існуючі алгоритми виділення контурів зображень складної форми, що базуються на визначенні відносного перепаду сигналу, можуть виявитися неефективними у випадку, коли кут β між дотичною до контуру геометричної фігури та лінією вибірки суттєво відхилиться від прямого. Застосування додаткової розгортки дозволяє повністю виділити контур зображення, але практична реалізація цього способу потребує значних зусиль від розробників програмного забезпечення, оскільки гостро постає питання про встановлення зв'язку між незалежними масивами координат

Зокрема, для фігури, зображеної на рис. 6а, на великому статистичному масиві було встановлено, що при $0 < \gamma < 0.03$ усі точки контуру визначені вірно.

Розглянутий вище МРР пройшов експериментальну перевірку в задачі визначення міжфазного натягу методом обертової краплі. В [3] було показано, що метод обертової краплі може бути реалізований на базі телевізійної системи контролю, що, в свою чергу, забезпечує високу потенційну точність та розширення функціональних можливостей за рахунок розширення спектрального діапазону телевізійної камери.

В той же час очевидно, що досягнення потенційної точності, яка обмежується шумами, можливе, якщо при даних умовах максимальне значення контрасту буде для сигналів, зформованих двома сусідніми пікселями. В інших випадках (наприклад, на рис. 6а) можливі значні похибки визначення координат точок контуру. А застосування МРР виключає неоднозначність в визначенні координат (рис. 6б).

нат відносних перепадів сигналу.

Методу радіальної розгортки не властиві помилки, спричинені відхиленням дотичної, а отже, на його базі можливо побудувати однопрохідний алгоритм з однозначним визначенням координат точок за відносними перепадами сигналу.

1. Кісіль Р. І., Чеховський С. А. Удосконалена методика і прилад для вимірювання міжфазного натягу методом обертової краплі // Методи та прилади контролю якості. - 1999. - № 4 - С. 36-40. 2. Кісіль Р. І., Порєв Г. В. Вимірювання геометричних розмірів обертової краплі за допомогою телевізійної системи контролю // Методи та прилади контролю якості. - 2000. - № 5 - С. 87-91. 3. Чен Ш. К. Принципи проектування систем візуальної інформації. - М.: Мир, 1994. - 408 с.

