УДК 004.942

М.Є. Сердюк, Д.О. Челядін
Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

МЕТОДИ ОБРОБКИ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ВІДБИТКІВ ОКА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВНУТРІШНЬООЧНОГО ТИСКУ

Розглянуто методи обробки та аналізу цифрового зображення відбитку ока під дією тонометра з метою виділення контурів об'єктів та визначення даних, необхідних для обчислення внутрішньоочного тиску.

Рассмотрены методы обработки и анализа цифрового изображения отпечатка глаза под действием тонометра с целью выделения контуров объектов и определения данных, необходимых для вычисления внутриглазного давления.

Methods for processing and analyzing of digital image of eye under the action of a tonometer are considered. The purpose of processing is edge detection of objects and determination of the data necessary for calculating the intraocular pressure.

Ключові слова: обробка зображень, виділення контурів об'єктів, градієнт яскравості зображення, тонометрія, глаукома, внутрішньоочний тиск.

Вступ. Комп'ютерні технології набувають все ширшого застосування в медицині, зокрема в офтальмології. У методах діагностики корисним виявляється використання комп'ютерної графіки, яка інтегрує різноманітні можливості візуалізації об'єктів на графічних зображеннях та дозволяє проводити аналіз досліджуваного об'єкта за його цифровим знімком. Актуальним питанням у сучасній офтальмології є удосконалення профілактичних та діагностичних заходів з виявлення глаукоми. Тонометрія, або вимірювання внутрішньоочного тиску, є необхідним заходом в обстеженні пацієнтів з підозрою на глаукому. Одним із розповсюджених, точних та недорогих методів тонометрії є тонометрія за Маклаковим [3]. Суть цього методу полягає в отриманні зображення відбитку ока під дією тонометра з подальшими вимірюваннями та обчисленнями за цим зображенням. Упровадження комп'ютерних технологій дозволяє удосконалити цю методику. Зокрема, зображення може бути отриманим у цифровому вигляді за допомогою веб-камери чи інших аналогічних засобів, а аналіз та вимірювання може здійснюватися відповідним програмним забезпеченням. Значною проблемою є якість знімків, оскільки нечіткі розмиті контури або їх дуб-

© М.Є. Сердюк, Д.О. Челядін, 2014

лювання ускладнює процес вимірювання та впливає на точність результатів. У даній статті розглядаються методи обробки та аналізу цифрового зображення відбитку ока під дією тонометра з метою виділення певних контурів, необхідних для обчислення внутрішньоочного тиску.

Постановка задачі. Цифровий знімок відбитку ока містить дані, які використовуються для визначення внутрішньоочного тиску. Приклади знімків наведені на рис. 1а, 2а. Внутрішньоочний тиск у методі тонометрії за Маклаковим обчислюється таким чином [3]:

$$T = \frac{P}{13{,}6\pi r_m^2},$$

де T – внутрішньоочний тиск (мм рт. ст.), P – вага тонометра, r_m – мінімальний радіус відбитка ока. Вага тонометра відома, є константою та дорівнює 0,01 кг. Отже, використовуючи цифровий знімок ока під дією тонометра, необхідно знайти величину r_m. Як тонометр, так і відбиток ока на зображеннях по формі близькі до кола (рис.1а, 2а). Радіус тонометра відомий і дорівнює 5,75 мм. Аналізуючи знімок, необхідно виділити на ньому межі тонометра та контури відбитка ока та визначити відповідні радіуси в пікселях. Після цього можна буде обчислити радіус відбитка в одиницях довжини за допомогою простої пропорції

$$r_m = R_t \cdot \frac{r_{pm}}{R_{pt}},$$

де R_t – радіус тонометра в одиницях довжини, r_{pm} і R_{pt} – радіуси відбитка та тонометра у пікселях відповідно.

Отже, ставиться задача обробити цифровий знімок відбитка ока під дією тонометра, виділити на ньому контури тонометра, відбитка ока та знайти радіуси відповідних кіл у пікселях.

Проблема полягає в тому, що якість знімків не завжди задовільна. Тому пропонуються чотири методи виділення меж на вибір користувача-офтальмолога. Один із методів повністю автоматичний і не потребує участі користувача у процесі виділення меж. Інші три призначені для випадків неякісних знімків і працюють під контролем та з участю користувача.

Метод автоматичного виділення меж. Детектування контурів тонометра та відбитка ока на зображенні без участі користувача складається з кількох етапів. На першому етапі здійснюється перетворення вихідного зображення у відтінки сірого та виділення на ньому контурів детектором країв Кенні [1]. Алгоритм Кенні базується на обчисленні градієнтів яскравості у пікселях зображення. Краї відмічаються там, де градієнт набуває максимального значення. Для обчислення градієнтів

використовується дискретний диференціальний оператор Собеля. Цей оператор базується на згортці зображення невеликими сепарабельними цілочисельними фільтрами у вертикальному та горизонтальному напрямках. Зазвичай для обчислення наближених значень частинних похідних по горизонталі та вертикалі оператор Собеля використовує ядра розміром 3x3, з якими згортає зображення. У методі, що розглядається, пропонується використовувати оператор Собеля з розміром 5x5. Відповідні матриці S_x та S_y мають такий вигляд:

$$S_x = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & -2 & -1 \\ 4 & 8 & 0 & -8 & -4 \\ 6 & 12 & 0 & -12 & -4 \\ 4 & 8 & 0 & -8 & -4 \\ 1 & 2 & 0 & -2 & -1 \end{bmatrix}, \quad S_y = \begin{bmatrix} -1 & -4 & -6 & -4 & -1 \\ -2 & -8 & -12 & -8 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 8 & 12 & 8 & 2 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix}.$$

Використання оператора Собеля з ядром 5x5 приводить до появи набагато більшої кількості «зайвих» країв, але ті краї, які відповідають межам відбитка ока та тонометра, виходять довшими.

Градієнт у кожній точці зображення обчислюється за формулою

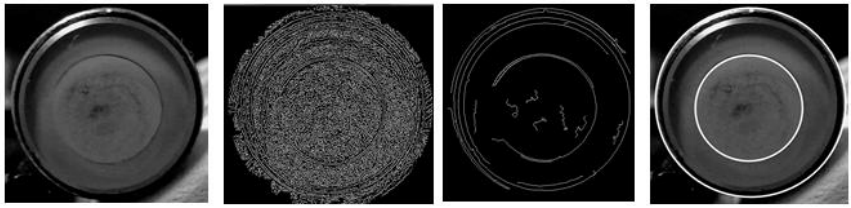
$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2},$$

де G_x та G_y – значення дискретних частинних похідних по x та по y відповідно:

$$G_x = S_x * P_{xy}, \; G_y = S_y * P_{xy} \quad \forall x = \overline{2, N-2}, \; y = \overline{2, M-2},$$

де N – ширина зображення в пікселях, M – висота зображення в пікселях. Матриці S_x та S_v наведені вище, P_{xv} – матриця яскравостей пікселів розміру 5 x 5, де центральним є піксель з координатами x,y. Значення градієнта для двох рядів зовнішніх точок на зображенні не обчислюється. Краї на зображенні відмічаються в тих пікселях, де градієнт набуває найбільші значення. Для виділення країв використовуються два пороги фільтрації: якщо значення градієнта в пікселі вище верхньої межі – він набуває максимальне значення (край вважається достовірним), якщо нижче нижньої – піксель пригнічується, точки зі значенням, що потрапляють в діапазон між порогів, приймають фіксоване середнє значення. У нашому випадку використовуються мінімальні пороги, тобто обидві межі встановлюються в нуль. З одного боку, це також приводить до появи великої кількості «зайвих» країв на зображенні. Але з іншого боку такий вибір надає можливість отримати більш довгі краї, які характеризують саме межі відбитку та межі тонометра. На наступних етапах обробки зображення зайві лінії будуть відфільтровані. Результатом першого етапу методу є бінарне зображення, де кожен піксель позначений як крайовий

або не крайовий (рис.1б). Крайові пікселі утворюють на бінарному зображенні криві, з якими проводяться подальші обчислення.



а) б) в) г)

Рис. 1. а – вихідний знімок з відбитком ока; б – результат роботи детектора меж Кенні; в – результат групування та фільтрації контурних точок; г – результат автоматичного виділення контурів тонометра та відбитку ока

На другому етапі методу здійснюється об'єднання зв'язаних крайових точок у групи з подальшою фільтрацією тих груп, які не задовольняють певним умовам. Для об'єднання точок у групи використовується ідея із роботи [4]. Точки контурів об'єднуються в групи за ознакою зв'язності: контурна точка вважається зв'язною з іншою контурною точкою, якщо вони стикаються стороною чи кутами. Треба зазначити, що оскільки для фотографування тонометра було розроблено спеціальний штатив, а тонометри мають однаковий діаметр, то центр фотографії завжди буде співпадати з центром тонометра. Тому можна стверджувати, що контурні точки, які розташовані на відстані, більшій ніж половина меншої сторони зображення, знаходяться за межами тонометра. Тому їх можна виключити з розгляду ще до групування з метою прискорення алгоритму. Групи, які мають невеликі розміри (менше 70 пікселів), розцінюються як шум, їх теж можна відкинути. Крім того, відкидаються групи, дві крайні точки яких знаходяться від центра зображення (та центра тонометра) на відстанях, які дуже відрізняються. Значення різниці відстаней визначено емпіричним шляхом і дорівнює половині меншої сторони зображення, поділеної на 6. Очевидно, що точки таких груп не можуть належати фрагментам шуканих кіл. Проведена фільтрація значно прискорює роботу подальших етапів обробки зображення при незначних втратах точності. Після групування та фільтрації отримаємо нове зображення з групами (рис. 1в).

На третьому етапі здійснюється почерговий перебір пар груп. По всіх точках кожної пари груп прямим методом найменших квадратів апроксимується еліпс [2]. У залежності від результату апроксимації приймається рішення про те, чи підходить еліпс під можливий результат меж тонометра або під можливий результат меж відбитка. Береться до уваги різниця між довжинами осей та розмірами зображення, відстань центра еліпса до

центра зображення, різниця між довжинами осей еліпса. Вважається, що еліпс підходить як кандидат до меж відбитка ока, якщо виконуються такі умови:

– модуль різниці між осями еліпса не перевищує середньої довжини осей, поділеної на 10, тобто еліпс має бути близьким до кола;

– довжини осей не перебільшують двох третіх довжини меншої сторони зображення. Ця умова потрібна, щоб для меж відбитку не обирались еліпси, які утворені з груп, що відносяться до меж тонометра або внутрішніх контурів між межами тонометра та відбитка;

– відстань від центра еліпса до центра зображення не перевищує розміру меншої сторони зображення, поділеної на 10. Ця умова потрібна, оскільки відомо, що відбиток повинен розташовуватися приблизно в центрі зображення (тонометра).

В якості кандидатів до меж тонометра обираються еліпси, для яких виконуються такі умови:

– модуль різниці між осями еліпса не перевищує середньої довжини осей, поділеної на 75. Це означає, що еліпс має бути майже колом, бо межі тонометра є колом у дійсності;

– довжини осей перебільшують дві треті довжини меншої сторони зображення;

– відстань від центра еліпса до центра зображення не перевищує розмір меншої сторони зображення, поділеної на 10.

Еліпси, які не відповідають вказаним умовам, відкидаються. Усі величини, що використані в наведених умовах, знайдені емпіричним шляхом на основі аналізу значної кількості зображень.

Отже, результатом третього етапу є два набори еліпсів: можливі межі тонометра та можливі межі відбитка ока.

Четвертий етап методу полягає у виборі з кожного набору найбільш прийнятного еліпса (рис.1г). Серед еліпсів, які є кандидатами на роль меж відбитка, обирається, фактично, той, для якого загальна кількість точок у групах, по яких він був апроксимований, максимальна. Вибір саме цього критерію можна пояснити тим, що серед тих груп, які можуть бути обраними для апроксимації еліпса для відбитка ока, майже завжди реальні краї відбитку є найдовші.

Як межі тонометра обирається найбільший еліпс з усіх інших у наборі. Це можна пояснити тим, що максимальне майже ідеальне коло ми можемо отримати тільки з тими точками, які лежатимуть на краях тонометра.

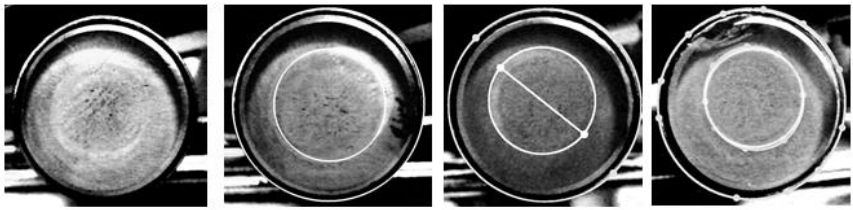
Отже, в результаті всіх виконаних дій маємо усі необхідні дані про два еліпси, один із яких описує межі тонометра, інший – межі відбитка ока.

Половина довжини меншої осі внутрішнього еліпса приймається за мінімальний радіус відбитка ока у пікселях. За радіус тонометра приймається середнє між довжинами осей великого еліпса. Отже, усі величини для обчислення внутрішньоочного тиску знайдено.

Метод автоматичного виділення контурів програмно реалізований та дає цілком прийнятні результати на великій кількості фотографій. Але зустрічаються зображення, на яких дуже погано видно відбиток (рис. 2а). Перепади яскравості в області меж є незначними, тому автоматичне детектування контурів дає незадовільні результати. Але візуально визначити відбиток ока все ж таки можна Для таких зображень розроблені інші три методи.

Методи виділення меж під контролем користувача. Описані нижче методи обробки знімків реалізовано в програмному забезпеченні, яке передбачає інтерактивну участь користувача у процесі виділення меж на цифровому зображенні та контроль з його боку. Такий підхід дозволяє уникнути неточностей, пов'язаних зі складностями обробки нечітких зображень.

Суть першого методу – методу «кіл» – в тому, що користувач за допомогою «миші» повинен розставити два кола на зображенні, маючи можливість змінювати їх розміри та рухати їх таким чином, щоб перше коло збігалося з межами тонометра, а друге – з межами відбитка ока так, щоб радіус відбитка був мінімальним (рис. 2б). Після отримання задовільного візуального результату обидва кола фіксуються, а їх радіуси у пікселях приймаються за радіус тонометра та радіус відбитка відповідно.



а) б) в) г)

Рис. 2. а – вихідний знімок з відбитком ока; б – метод «кіл»; в – метод «двох точок»; г – метод апроксимації за набором точок

У другому методі – методі «двох точок» – користувач повинен за допомогою «миші» поставити точку на межі тонометра. Далі від цієї точки до положення курсору формуватиметься коло, яке допомагає користувачеві поставити другу точку на протилежній межі тонометра так, щоб отримане коло було максимально близьким до межі тонометра. Аналогічні дії проводять для меж відбитка ока (рис. 2в). Після фіксації обох кіл визначаються їх радіуси у пікселях.

У третьому методі – методі апроксимації за набором точок – користувач за допомогою «миші» повинен розставити набори із не менш ніж шести точок на межі тонометра та на межі відбитка. По кожному з наборів апроксимується еліпс (рис. 2г). Апроксимація виконується таким же чином, як у автоматичному методі, але набір точок, фактично, задає сам користувач. Половина довжини меншої осі внутрішнього еліпса приймається за мінімальний радіус відбитка у пікселях. За радіус тонометра приймається середнє між довжинами осей великого еліпса.

Аналіз результатів. Усі представлені методи було реалізовано в програмному забезпеченні, яке передбачає, що вимірювання будь-яким методом можна проводити багаторазово. За результатами декількох вимірювань система обчислює середній очний тиск та стандартне відхилення тиску. Практичне застосування системи показало, що усі чотири методи для знімків достатньої якості дають приблизно однакові результати. Так, значення тиску для зображення (рис. 1а) – 22,74; 22,93; 23,09, 22,93 мм. рт. ст. автоматичним методом, методом «кіл», методом «двох точок» та методом апроксимації відповідно. У випадках неякісних знімків автоматичний метод не дає задовільного результату, детектор країв не знаходить межі відбитка ока. У цих випадках потрібно використовувати «ручні» методи. Детектування еліпсів під візуальним контролем користувача та з його участю дозволяє уникнути неточностей, пов'язаних зі складностями автоматичної обробки зображень невисокої якості. Результати вимірювань трьома методами і в цьому випадку мало відрізняються.

Висновки. Запропоновані методи обробки та аналізу цифрового зображення відбитку ока під дією тонометра дозволяють автоматично чи інтерактивно виділити необхідні контури на знімках різної якості і отримати таким чином дані для обчислення внутрішньоочного тиску. Реалізовані програмно, ці методи покращують класичну методику тонометрії за Маклаковим, значно економлять час та зменшують помилки вимірювань.

Бібліографічні посилання

1. **Горбань А.И.** Исследования поля зрения и внутриглазного давления у взрослых и детей / А.И. Горбань. – Ленинград, 1982 – С. 77–89.
2. **Хисамутдинов М.В.** Фильтрация изображений с целью выделения эллипсов / М.В. Хисамутдинов // Штучний інтелект. – 2008. – № 4. – С. 429–437.
3. **Canny J.A** Computational approach to edge detection / J. Canny // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1986. – Vol. 8, No. 6. – P. 679–698.
4. **Fitzgibbon A**. Direct Least Square Fitting of Ellipses / Andrew Fitzgibbon, Maurizio Pilu, Robert B. Fisher // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence – 1999 – Vol. 21, № 5 – P. 476–479.

Надійшла до редколегії 28.03.2014