

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ГУРАЛЬНИК АРТЕМ БОРИСОВИЧ

УДК 658.512

**МЕТОД І УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ЗАСІБ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ
КУЛЬШОВОГО СУГЛОБА**

05.11.17 – біологічні та медичні прилади і системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті, Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Білинський Йосип Йосипович
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри електроніки та наносистем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Аврунін Олег Григорович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки, завідувач кафедри біомедичної
інженерії

кандидат технічних наук, доцент
Яворська Євгенія Богданівна,
Тернопільський національний технічний університет
імені «Івана Пулюя», завідувач кафедри біотехнічних
систем.

Захист відбудеться «30» квітня 2021 року о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.06 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210 ГНК.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Вінницького національного технічного університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий «30» березня 2021р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С. В. Тимчик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Рання діагностика стану кульшового суглоба (СКС) і його лікування надзвичайно важливі, тому що несвоєчасна діагностика та/або неправильне лікування можуть призвести до значних ускладнень захворювання. В Україні на дисплазію кульшового суглоба (ДКС) страждає 2-4% дітей, у екологічно несприятливих районах — до 12%. В усьому світі захворюваність варіюється до приблизно 1%.

На сьогодні найбільш поширеним методом дослідження є рентгенівський метод візуалізації кульшового суглоба (КС). Даний підхід неможливо використовувати як основний через шкідливість рентгенівського випромінювання. Тому широкого використання набуває ультразвукове дослідження КС. Але в основному результат ультразвукового діагностування, залежить від кваліфікації лікаря, орієнтирів дослідження КС, зробленого при неправильному положенні дитини, що призводить до неправильного вимірювання кутових показників, а також має місце достатньо велика похибка при ручному визначенні кутів на зашумленому ультразвуковому зображенні. На основі аналізу обстеження 2400 дітей, проведеного у Київському і Харківському регіонах, при дослідженні кульшових суглобів в 39% випадків виявили 9% випадків порушення технології виконання сонограм і в 67% помилки в «інтерпретації». Тому одним, із основних шляхів підвищення достовірності досліджень КС є створення нового методу та апаратно-програмних засобів вторинної обробки ультразвукових зображень на основі комп'ютерних технологій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 2014-2019 рр. за планами наукових робіт кафедри електроніки та наносистем ВНТУ. Дисертаційна робота виконувалась у рамках держбюджетної науково-дослідної роботи «Інформаційна технологія низько інтенсивної світлової стимуляції і корекції функціонального стану вояків Збройних Сил України» (Державний реєстраційний номер 0117U000572), яка виконувалась у 2017-2019 рр.

Теоретичні та практичні результати використано у навчальному процесі для вивчення дисциплін «Електронні системи» «Біомедичні пристрої і системи» кафедри електроніки та наносистем Вінницького національного технічного університету акт впровадження від 21.01.2020р.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення достовірності оцінювання стану кульшового суглоба шляхом розробки нових моделей і методів аналізу ультразвукових зображень та автоматичного апаратно-програмного засобу на їх основі.

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі розв'язуються такі завдання:

- проаналізувати існуючі методи діагностування ДКС;
- провести огляд методів ультразвукового дослідження СКС, біомедичні зображення яких придатні для комп'ютерного аналізу;

- вдосконалити метод попереднього оброблення ультразвукових зображень на предмет виявлення анатомічних орієнтирів кульшового суглоба;
- розвинути структуру нейронної мережі, придатну оцінювати положення кульшового суглоба;
- розробити метод автоматичного визначення кутів за Графом як основних ознак прийняття рішення про стан кульшового суглоба;
- розробити апаратно-програмний засіб оцінки СКС;
- провести експериментальні дослідження.

Об'єкт дослідження. Процеси опрацювання ультразвукових зображень кульшового суглоба.

Предмет досліджень. Методи попереднього оброблення зображень, програми діагностування стану кульшового суглоба з використанням класифікації за Графом, структура та моделі нейронних мереж.

Методи дослідження. При виконанні поставлених задач використовувались: математичний апарат теорії дискретних сигналів, цифрового представлення зображень для розробки теоретичних засад фільтрації спекл-шуму та методи просторової обробки зображень для розробки фільтра приглушення спекл-шуму; теорії вимірювань для оцінювання метрологічних характеристик запропонованих методів і систем; методи математичного моделювання з використанням сучасних комп'ютерних технологій, реалізованих в пакетах NI Vision Assistant, Labview, Matlab.

Наукова новизна отриманих результатів. В роботі отримані такі наукові результати.

1. Вперше запропоновано метод автоматичного оцінювання стану кульшового суглоба на основі 2D ультразвукових зображень, який дозволяє виконати класифікацію стану кульшового суглоба за Графом шляхом відбраковування зображень неправильного положення кульшового суглоба, візуалізації його анатомічних орієнтирів та вимірювання кутових показників, що дозволило підвищити достовірність оцінювання СКС на 10-15% .

2. Удосконалено метод фільтрації ультразвукових зображень, який відрізняється від відомих послідовністю використання процедур морфологічних перетворень, що дозволило враховувати рівень зашумленості та рівень перепадів інтенсивності, та відповідно до цього змінювати глибину фільтрації й отримати більш високі показники кількісної оцінки якості фільтрації (показники PSNR та MSE на 5-7 % вищі порівняно з відомими).

3. Отримала подальший розвиток математична модель виділення заданого фрагмента на ультразвуковому зображенні за його спектральними ознаками, яка на відміну від відомих використовує функцію еквівалентності, що дозволило отримати більш точні координати реперних точок (відносна похибка становить 6,25%), за якими виконується формування ліній, а отже кутів для класифікації стану кульшового суглоба.

4. Вперше запропоновано автоматичний метод визначення певного кадру 2D ультразвукового зображення, що відповідає правильному положенню ультразвукової головки на тілі дитини, шляхом застосування адаптивного

нейромережевого аналізу, що дозволило забезпечити відбракування хибних зображень і мінімізувати невизначеність положення суглоба з подальшим опрацюванням правильного кадру для візуалізації анатомічних орієнтирів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблено:

- алгоритми функціонування та апаратно-програмний засіб діагностування стану кульшового суглоба на основі УЗД-зображень;
- програмне забезпечення для автоматичного відбраковування зображень неправильного положення кульшового суглоба;
- програмне забезпечення фільтрації та візуалізації анатомічних орієнтирів та вимірювання кутових показників кульшового суглоба ультразвукового зображення.

За результатами роботи розроблено та впроваджено апаратно-програмний засіб діагностування стану кульшового суглоба в медичному діагностичному центрі «Вінницька обласна дитяча клінічна лікарня», (м. Вінниця) та на кафедрі хірургії Вінницького національного медичного університету імені М. І. Пирогова, акт провадження від 2020р.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. Роботи із експериментальних досліджень та впровадження розробок, їх програмної підтримки виконувались разом із співавторами. Із робіт, що виконувались у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем. Авторіві належить: розробка методу визначення певного кадру 2D ультразвукового зображення КС [1], що відповідає правильному положенню ультразвукової головки на тілі дитини [2]; вдосконалено метод фільтрації спекл-шуму [3], який використовує процедури обробки зображень морфологічними операціями [4]; вдосконалено математичну модель виділення заданого фрагмента на ультразвуковому зображенні КС за його спектральними ознаками [5]; розробка математичної моделі крайового детектування КС на УЗД-зображенні [6]; розробка алгоритмів автоматичного вимірювання кутових показників на зображенні кульшового суглоба для подальшої класифікації за Графом [7]; покрокова обробка реального зображення задля діагностування СКС [8],[9]; огляд можливих шляхів обробки УЗД [9]-[13].

Апробація матеріалів дисертації. Викладені в дисертації результати досліджень були апробовані та представлені на 7 наукових конференціях: зокрема науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів ВНТУ з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних підприємств; Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи» (МТН-2015), Вінниця: 2015р.; Науково-технічна конференція, м. Суми: 2015 р.; XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (ВОТТП), м. Одеса 2015р.; XV Міжнародна науково-технічна конференція «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (ВОТТП), м. Затока: 2015р.; I Міжнародна

науково-технічна конференція «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» СПРН-2019, м. Вінниця: 2019 р..

Результати дисертаційної роботи, починаючи з 2015 року, представлялись і обговорювались на щорічних науково-технічних міжнародних конференціях, конференціях кафедри біомедичної інженерії та кафедри електроніки та наносистем Вінницького національного технічного університету.

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 11 наукових працях, з них: в 5 статтях у науково-технічних журналах, внесених до переліку фахових наукових видань України, що входять до міжнародних науково-метричних баз та в 6 збірниках праць науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу і 4-х розділів, списку 72 використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації 159 сторінка, з яких основний зміст викладений на 136 сторінках друкованого тексту, містить 61 рисунок, 12 таблиць, 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, її наукова і практична значущість, сформульовані мета та задачі роботи, наведено її загальну характеристику, наведені відомості про апробацію та впровадження отриманих результатів.

У першому розділі проведено огляд методів дослідження стану КС дитини. Встановлено, що на сьогодні в основному використовують рентгенологічний та ультразвуковий метод дослідження.

Проаналізовано типові ультразвукові зображення стану кульшового суглоба, виявлено їх характерні особливості, визначені можливі шляхи підвищення їх діагностичної цінності.

Проведено аналіз та вибір програмної платформи для побудови ультразвукового засобу для оцінювання КС дитини. На основі проведеного аналізу оптимальним варіантом є програмна платформа Matlab.

Розглянуто високотехнологічні комп'ютерні методи згорткових нейронних мереж для дослідження стану кульшового суглоба дитини. Згорткові нейронні мережі (Convolutional neural networks) широко використовуються як інструменти для глибокого навчання на спеціалізованих базах медичних зображень. Проаналізовано загальну структуру згорткових нейронних мереж.

В другому розділі сформульовано вимоги до методів цифрової обробки ультразвукових зображень КС та до зображення КС, що досліджується. Встановлено, що при недотриманні критеріїв стандартного зрізу і, відповідно, косому напрямку променя по відношенню до тазостегнового суглоба виникають спотворення зображення суглоба і здійснювати його оцінку некоректно. Крім цього на УЗ-зображенні необхідно виконати ряд послідовних операцій, до яких відноситься придушення спекл-шуму, розмежування досліджуваного зображення суглоба і фону, встановлення реперних точок і визначення лінійних і кутових розмірів КС.

Запропоновано удосконалений метод класифікації ДКС шляхом його повної автоматизації, алгоритм якого включає такі кроки: введення ультразвукового зображення КС; виконання фільтрації зображення; перевірка та відбракування ультразвукових зображень кульшового суглобу при відхиленні сенсора УЗД від стандартного положення тіла дитини; формування та ідентифікація кутів в корональній площині КС; розрахунок кутових показників; класифікація ДКС за отриманими значеннями кутових показників.

Для виконання фільтрації спекл-шуму ультразвукових зображень в роботі запропоновано використовувати послідовності морфологічних операцій: Розширення, що додає пікселі (встановлює їх значення 1) до межі частинок або об'єктів. Ерозія, що в основному видаляє (встановлює значення 0) пікселів з межі частинок або предметів. Відкриття, що визначається як ерозія з подальшим розширенням з використанням того ж структуруючого елемента. Закриття, що визначається як розширення з подальшим розмиванням з використанням того ж структуруючого елемента.

В табл. 1 наведені кількісні показники оцінки якості обробки ультразвукового зображення КС різними типами фільтрів, з якої можна зробити висновок, що фільтрація на основі морфологічних операцій за показниками PSNR та MSE, показує результати на 5-7 % вищі в порівнянні з відомими, а також дає змогу отримати більш інформативне зображення. PSNR, SNR і MSE є загальними критеріями, що використовуються для оцінки якості спотвореного зображення

Таблиця 1 - Кількісні показники якості запропонованого фільтру та порівняння з відомими

Фільтр	MSE	\sqrt{MSE}	PSNR	SNR	Кластер
Медіанний фільтр	983.923	31.368	18.201	2.933	2
Фільтр з віком низькочастотної фільтрації (LowPass з вікном 5×5 частота відсікання 50%)	1517	38.952	16.32	1.058	3
Фільтр з швидким перетворення Фур'є (FFT), частота відсікання 50%	1040	32.245	17.962	2.694	2
Фільтр Гауса, з вікном 5×5	890.836	29.847	18.633	3.365	1
Фільтр з усередненою фільтрацією, згладжування, з вікном 5×5	868.447	29.469	18.743	3.476	1
Метод фільтрації на основі морфологічних операцій	940.914	30.674	18.395	3.128	1

Удосконалено метод виділення контуру шляхом використання подвійної операції ОЦУ, за якою після знаходження спільних точок примезових кривих до і після низькочастотної фільтрації і підвищення різкості, автоматичного здійснюється визначення двох порогів бінаризації. Перший поріг встановлюється шляхом віднімання двох зображень

$$t = U_{oij} - U_{fij}, \text{ при умові } U_{oij} \geq U_{fij}, \quad (1)$$

де U_{oij} та U_{fij} – напруга на комірках фото матриці, що відповідає освітленості i -го та j -го пікселя зображень дослідженого об'єкта.

Автоматичне визначення другого порогу бінаризації здійснюється за методом Оцу

$$T = \sigma_b^2(t)_{MAX} = w_1(t)w_2(t)[\mu_1(t) - \mu_2(t)], \quad (2)$$

де $w_1(t)$ та $w_2(t)$ – ймовірність двох класів, що розділені порогом t , $\mu_1(t)$ та $\mu_2(t)$ – середнє арифметичне 1-го та 2-го класу.

На рис.1 показано виділення контуру КС за допомогою удосконаленого методу виділення контуру.



Рисунок 1 – УЗД зображення КС після виділення контуру

Таке УЗД зображення дає можливість визначити та нанести автоматично реперні точки для побудови ліній для визначення кутів, за допомогою, яких можна оцінити стан КС за відповідною класифікацією

Запропоновано модифікацію еквівалентної моделі, що була спеціально адаптована для розпізнання області клубової кістки та верхньої губи, за допомогою якої визначаються реперні КС шляхом формування кутів за Графом.

Еквівалентна модель представляє собою міру близькості між вибраним в якості еталона фрагментом та всіма іншими можливими фрагментами зображення. В подальшому робиться операція «Resample an Image» - підвищення вибірки пікселів з розмірів (ROI) еталонного зображення до розмірів вхідного зображення. На першому етапі виконується додавання пікселів шляхом інтерполяції по вибраному закону

$$Resample [Image (etalon)] = I_e R \quad (3)$$

Міра близькості між вибраним в якості еталона фрагментом та всіма іншими можливими фрагментами з використанням вдосконаленої просторової нормованої еквівалентної функції визначається як.

$$F_{eq} = \min\{\max(I_{inp}, \overline{I_e R}), \max(\overline{I_{inp}}, I_{inp} R)\}, \quad (4)$$

де $\overline{I_{inp}} = A - I_{inp}$, $\overline{I_e R} = A - I_e R$, A – матриця, всі елементи якої мають значення 255; $\overline{I_{inp}}$, $\overline{I_e R}$ – доповнювальна матриця вхідного зображення та

зображення еталона, відповідно, $\max(I_{inp}, \overline{I_e R})$ виконує логічну операцію АБО, чи об'єднання, між початковим вхідним зображенням I_{inp} та зображенням доповнювальної матриці еталона.

Для нормального сприйняття зображення виконують нормалізацію за формулою

$$f(I_p, I_{min}, I_{max}) = \frac{I_p - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \times 255, \quad (5)$$

де f – функція нормалізації, I_p – значення яскравості конкретного пікселя зображення, розпізнаного функцією еквівалентності, I_{min} та I_{max} – мінімальне та максимальне значення яскравості пікселя еталонного зображення, відповідно.

Для ультразвукового зображення КС нормалізація має вигляд.

$$f(F_{eq}, I_e R, A) = \frac{F_{eq} - I_e R}{A - I_e R} \times 255. \quad (6)$$

Операції з матрицями виконуються попіксельно.

Побудовано алгоритм розпізнання області клубової кістки та верхньої губи для визначення реперних точок і отримані результати моделювання в програмі NI VisionAssistant (рис. 2) при визначенні міри близькості між вибраним в якості еталона фрагментом та всіма іншими можливими фрагментами аналізованого зображення.

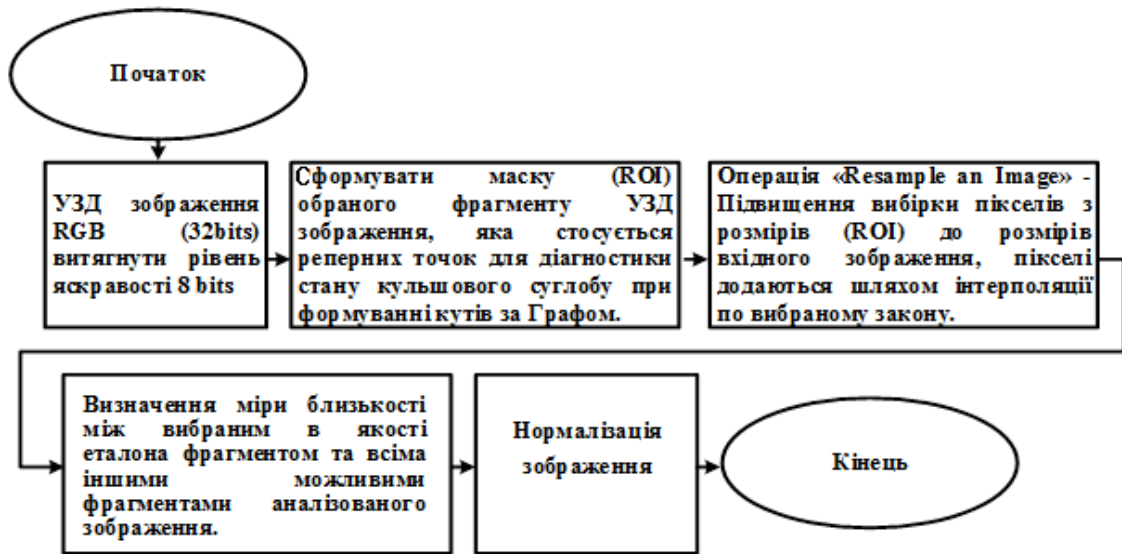


Рисунок 2 – Алгоритм розпізнавання області клубової кістки та верхньої губи для визначення реперних точок

Результати моделювання з використанням еталонного об'єкту показали, що використання модифікованої еквівалентної моделі, адаптованої для розпізнання області клубової кістки та верхньої губи, забезпечує вищу точність визначення геометричних параметрів об'єктів на УЗ-зображенні (відносна похибка становить 6,25%). Результати представлені у табл.2.

Таблиця 2 - Визначення розмірів фантому

Тип детектора	Без обробки	CA NY	Previtt	Convolution Custom	Roberts	еквівалентної функції
Визначений розмір	14	13	15	13	виділення не коректне	15
Відносна похибка	12,5%	18,75%	6,25%	18,75%	до 100%	6,25%

Із представлених результатів видно, що використання еквівалентної моделі, що була спеціально адаптована для розпізнання області клубової кістки та

верхньої губи, забезпечує вищу точність визначення координат реперних точок, а отже певних кутів, значення яких дають змогу класифікувати за Графом стан кульшового суглобу.

В третьому розділі на основі запропонованих методів фільтрації, виділення контуру та визначення реперних точок розроблено алгоритми та процедури комп'ютерної обробки зображень для оцінки геометричних параметрів КС. На рис. 3 наведено алгоритм з використанням інструмента визначення центрів кіл на бінарному зображенні.

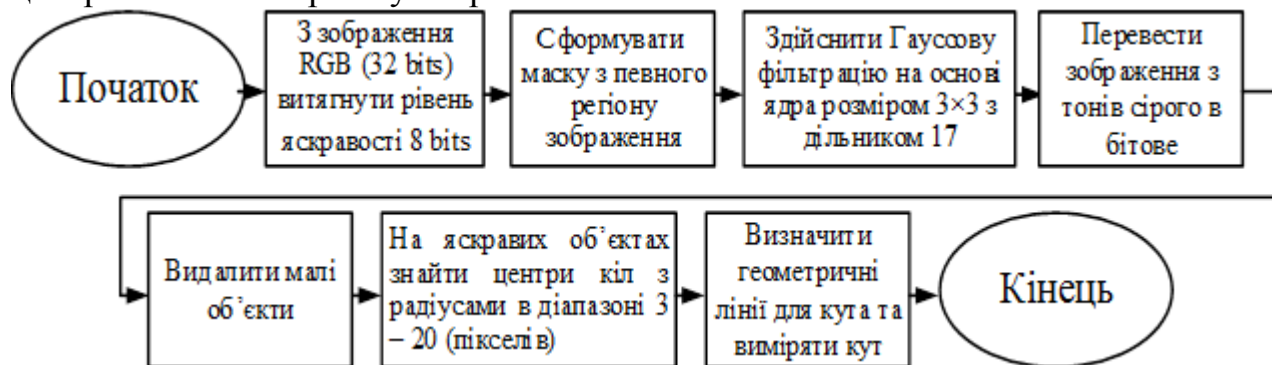


Рисунок 3 – Алгоритм діагностики 2d ультразвукових зображень стану кульшового суглобу з використанням інструмента визначення центрів кіл на бінарному зображенні

На рис. 4 зображено розроблений алгоритми обробки зображень для оцінки геометричних параметрів КС з використанням інструмента виділення контуру «FindStraightEdge»

На рис. 5 наведено результати покрокового перетворення ультразвукового зображення КС згідно запропонованого алгоритму для оцінки геометричних параметрів кульшового суглобу з використанням інструмента визначення центрів кіл на бінарному зображенні.

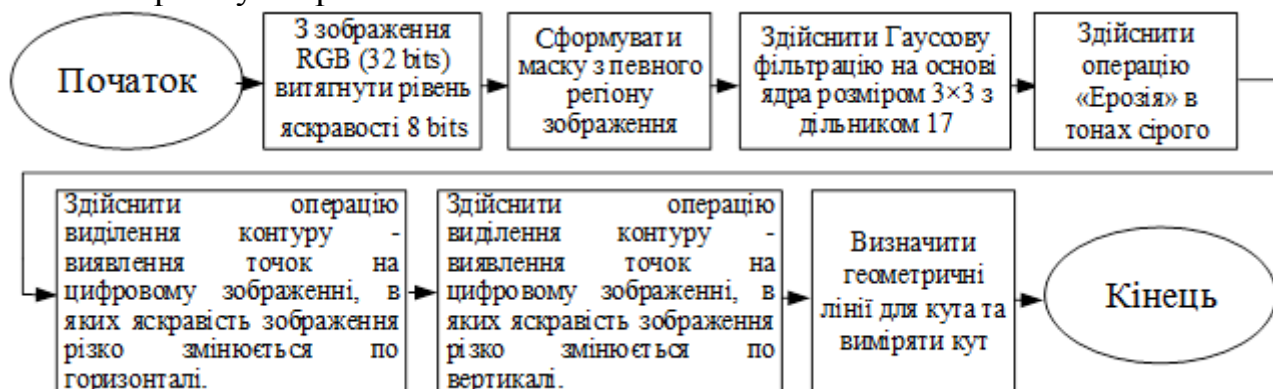
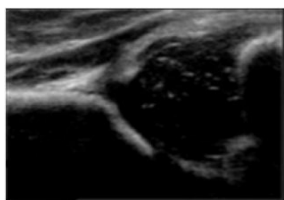
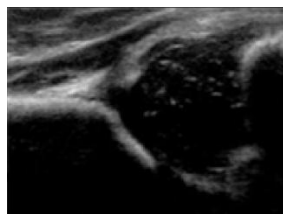


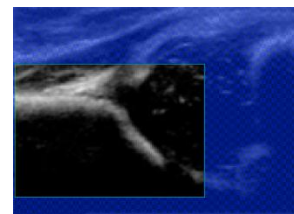
Рисунок 4 – Алгоритм дослідження 2d ультразвукових зображень стану кульшового суглобу з використанням інструмента виділення контуру «Find Straight Edge»



а) Вхідне ультразвукове зображення кульшового суглобу RGB (32 bits) 533×444



б) Color Plan Extraction: Витягує план кольору (із зображення витягує HSL - рівень яскравості 8 bits)



в) Формування маски з певного регіону зображення



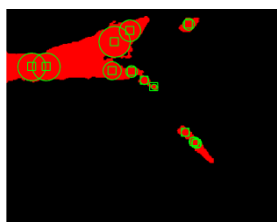
г) Гауссова фільтрація на основі ядра розміром 3×3 з дільником 17



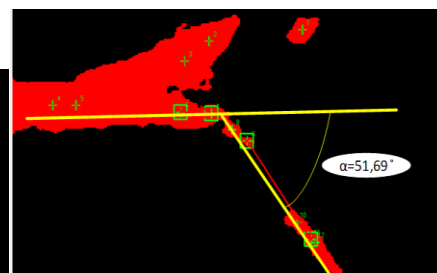
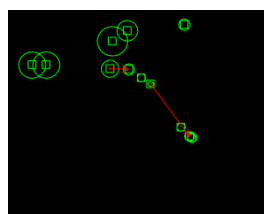
д) Поріг зображення. Використаний інструмент «Threshold a Grayscale Image» з параметрами (Manual Threshold: Bright Object)



е) Операція «Advanced Morphological» (Remove small objects) видалення малих об'єктів - з кількістю ітерацій –3



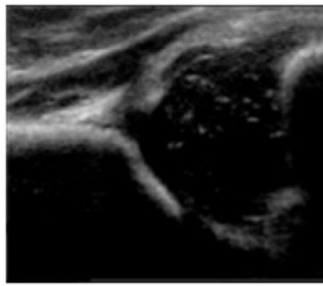
ж) Інструмент «CircleDetection» знаходження центрів кіл з радіусами в діапазоні 3 – 20 (пікселів)



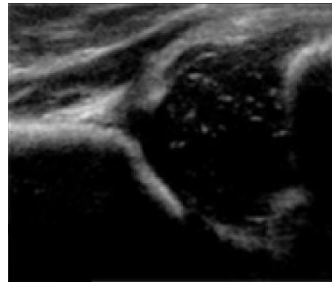
з) Інструмент «CaliperTool»

Рисунок 5 – Процедури покрокового перетворення ультразвукового зображення КС згідно запропонованого алгоритму для оцінки геометричних параметрів кульшового суглобу з використанням інструмента визначення центрів кіл на бінарному зображенні

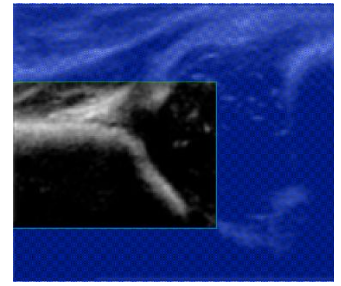
Результати роботи алгоритму наведено на рис. 6.



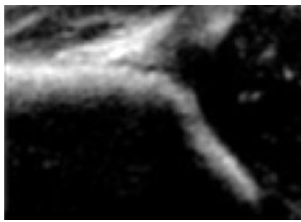
а) Вхідне ультразвукове зображення кульшового суглоба RGB (32 bits) 533×444



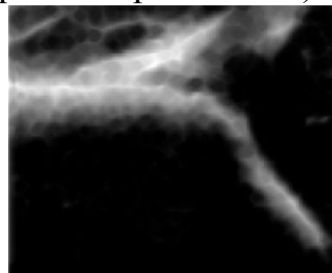
б) Color Plan Extraction: Витягує план кольору (із зображення витягує HSL - рівень яскравості 8 bits)



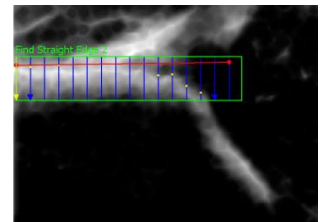
в) Формування маски з певного регіону зображення



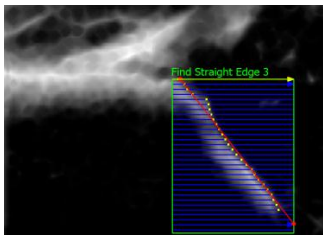
г) Гауссова фільтрація на основі ядра розміром 3×3 з дільником 13



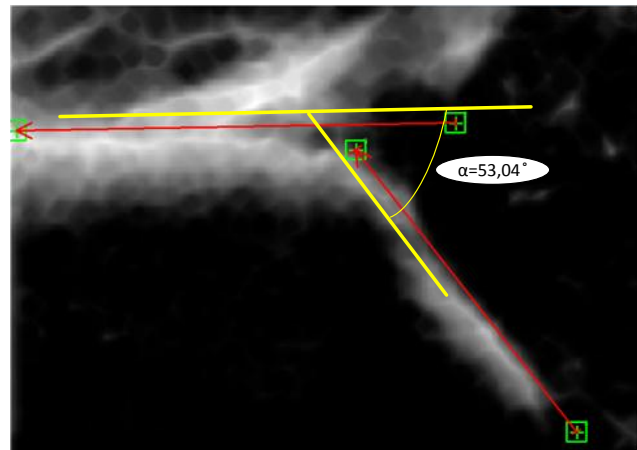
д) Операція Ерозія в «Gray Morphology» з кількістю операцій 3



е) Операція «Edge Detector»: Виділення контуру - по горизонталі.



ж) Операція «Edge Detector»: Виділення контуру - виявлення точок на цифровому зображенні, в яких яскравість зображення різко змінюється по вертикалі.



з) Інструмент «Caliper Tool» Вимірювання кута.

Рисунок 6 – Процедури покрокового перетворення ультразвукового зображення СКС згідно запропонованого алгоритму для оцінки геометричних параметрів кульшового суглоба з використанням інструмента виділення контуру «Find Straight Edge»

Проведено порівняння отриманих геометричних розмірів при використанні «ручного режиму» визначення кутів та комп'ютерного — з використанням запропонованих алгоритмів. Дослідження проводились з використанням фантома, геометрія якого відома. Показано, що в «ручному режимі» значення кута α (ацетабулярний кут) складає – 55° , з використанням інструмента визначення центрів кіл на бінарному зображенні – $51,69^\circ$, з використанням алгоритму

виділення контуру – 53,04°. Результати досліджень показали, що алгоритм з використанням інструмента виділення контуру «Find Straight Edge» дає більш точні значення ацетабулярного кута.

Запропоновано узагальнену структуру програмного забезпечення для класифікації УЗ за типом ДКС за Графом, яка включає блок загорткових нейронних мереж, блок попередньої обробки виділеного зображення КС, блоки виконання геометричних вимірювань та класифікації ДС за Графом (рис. 7).

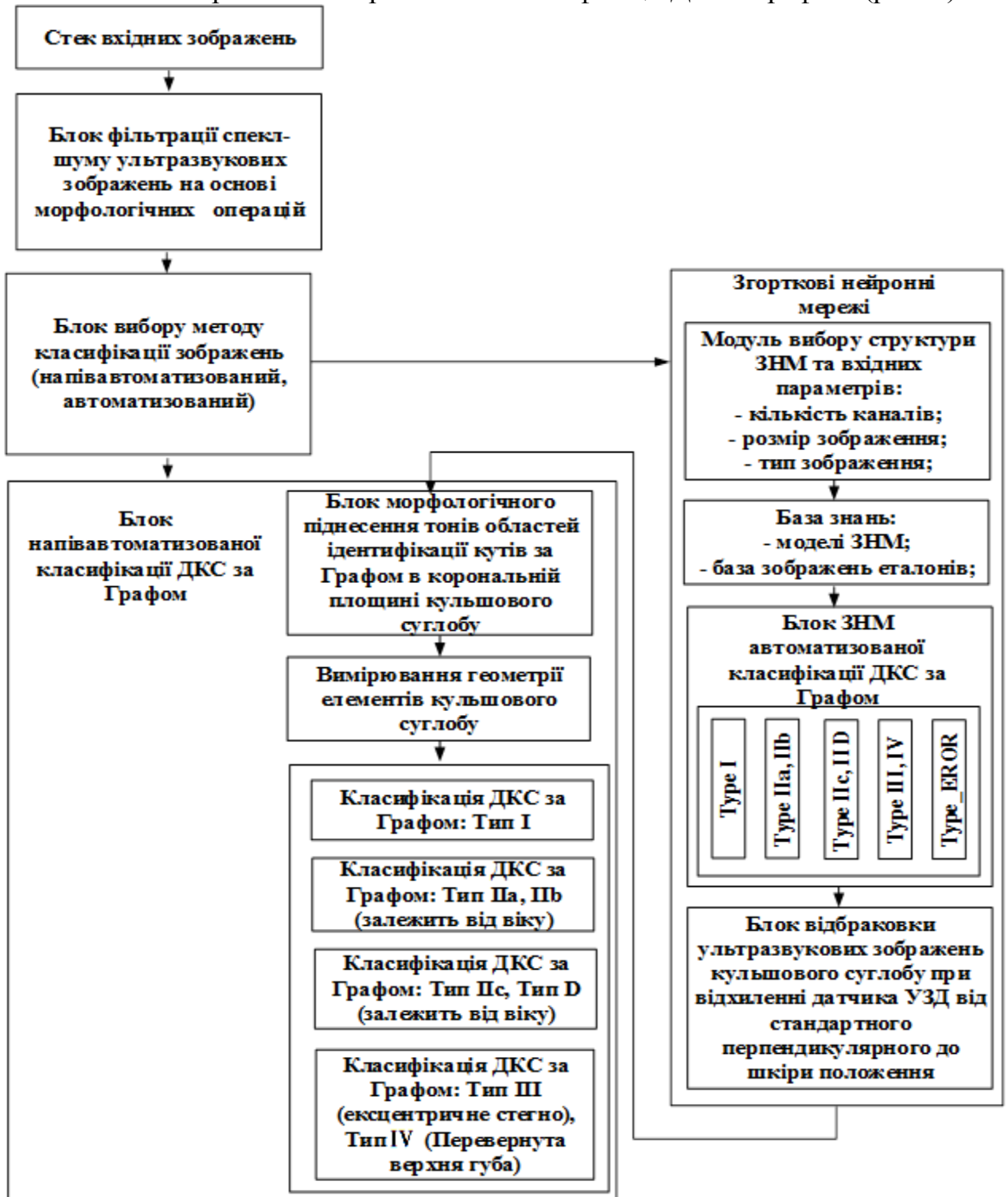


Рисунок 7 – Узагальнена структура програмного забезпечення для класифікації ультразвукових зображень за типом стану КС за Графом

Програмне забезпечення для класифікації ультразвукових зображень типу стану кульшового суглобу може працювати в двох режимах: автоматизованому та автоматичному.

В четвертому розділі побудовано апаратно-програмний засіб класифікації ультразвукових зображень стану кульшового суглобу, структурна схема якого показано на рис.8. Особливістю засобу для прискорення обробки та класифікації зображень за станом КС використовується GPU відеокарта за технологією CUDA, а також згортова нейронна мережа (ЗНМ).

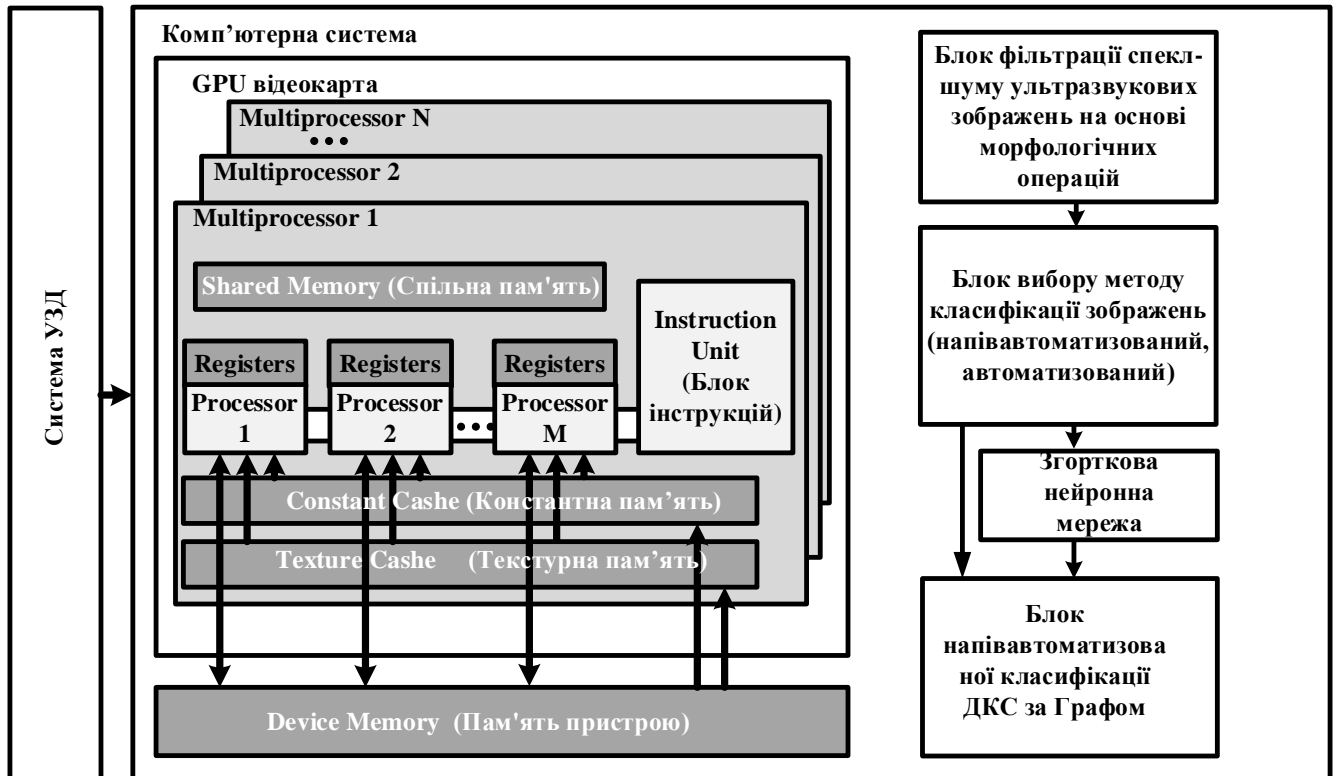


Рисунок 8– Структурна схема апаратно-програмного засобу класифікації УЗ СКС

Здійснено реконструкцію ЗНМ GoogLeNet, SqueezeNet та AlexNet для завдань класифікації ультразвукових зображень стану кульшового суглобу.

Побудовано загальна структура ЗНМ та її деталізація для класифікації бази даних кульшового суглоба за п'ятьма класами, які передбачені за Графом.

Для проведення навчання ЗНМ побудовано базу еталонів ультразвукових зображень КС. Для бази еталонів для нейронної мережі використано бібліотеку КС, яку надала Дмитрієва К. Ю. (лікар вищої категорії, доцент Вінницького національного медичного університету ім. М.І Пирогова). Для експериментів вибрано ультразвукові зображення, що мають ознаки дисплазії кульшового суглобу 5 класів. При побудові бази еталонів підготовлено 97 ультразвукових зображень КС розмірністю 210×300 пікселів, тип зображення RGB, глибина

кольору 32 біт. Проведено вибір імовірнісним чином еталонів з кожного класу по 15 для навчання та 3 для тестування.

В табл. 3 зведені показники бази еталонів для навчання та тестування.

Таблиця 3 - Кількісні показники бази еталонів для навчання та тестування

tbl = 5×2 table (Наявність еталонів у навчальній вибірці)			ans = 5×2 table (Вибір імовірнісним чином еталонів з кожного класу)		
	Label	Count		Label	Count
1	Type I	18	1	Type I	18
2	Type III, IV	18	2	Type III, IV	18
3	Type IIa, IIb	25	3	Type IIa, IIb	18
4	Type IIc, II D	18	4	Type IIc, II D	18
5	Type_ ROR	18	5	Type_EROR	18

Класифікація об'єкта — номер або найменування класу, що видається алгоритмом класифікації ЗНМ в результаті його застосування до даного конкретного об'єкту. Формування навчальної вибірки є складним та важливим етапом, оскільки від її якості залежить точність результату. При побудові ЗНМ для класифікації даних в більшості випадків єдиною апріорною інформацією є навчальна вибірка, що містить дані про значення ознак об'єктів розпізнавання і відповідно класи, що відносяться до цих об'єктів. Класифікація об'єктів навчальної вибірки в загальному випадку здійснюється експертом і вважається вірною, оскільки перевірити її правильність неможливо.

Для розв'язання проблеми неправильно підбраної навчальної вибірки найбільш часто використовується два підходи. У першому відбувається відмова від наявної класифікації об'єктів, виконується кластеризація об'єктів навчальної вибірки і за її результатами кожному об'єкту ставиться у відповідність номер класу, який отриманий автоматично. Даний підхід застосовують у тих випадках, коли немає можливості отримання додаткових даних. Відповідно до другого підходу, використовуються дані про класифікацію об'єктів колективом незалежних експертів, і класифікація об'єктів визначається за допомогою обробки результатів класифікацій кожним експертом.

Вхідними елементами навчальної вибірки є цифрові зображення, отримані від апарату УЗД. Зображення характеризується такими показниками:

- тип зображення (RGB, в градаціях сірого, тощо);
- глибина кольору (32 біт, 8 біт);
- роздільна здатність (640x480, 800x600, 1024x768, 1600x1200).

Проведено тонке налаштування ЗНМ GoogLeNet, SqueezeNet та AlexNet, а також виконано їх навчання на навчальній вибірці з перевіркою на тестованій групі. Отримано так звану плитки образів вхідного зображення кульшового суглоба дитини, які формуються фільтрами першого шару згортки conv1 ЗНМ.

Виконано порівняння результатів моделювання розглянутих ЗНМ, які пройшли процес навчання для класифікації ДКС. Результати моделювання показали, що за основними параметрами таких як кількість шарів, точність при

класифікації на тестовій групі, вага мережі після навчання ЗНМ SqueezeNet має якісніші показники.

В табл. 4 приведені показники бази еталонів для навчання та тестування.

Таблиця 4 - Характеристики ЗНМ Squeeze Net, Google Net та Alex Net при навчанні та тестуванні на вибірці 97 зображень СКС

	SqueezeNet	ЗНМ GoogLeNet	AlexNet
Кількість шарів	68	144	25
Кількість епох	30	30	12
Кількість ітерацій	270	210	216
Час навчання (хвилин)	2,16	4,7	0,46
Достовірність (точність) при класифікації на навчальній групі (%)	до 100%	до 100%	до 75%
Достовірність (точність) при класифікації на тестовій групі (%)	83	84.5	62.7
Базова швидкість навчання (коефіцієнт)	6.4×10^{-7}	6.4×10^{-7}	8.0×10^{-5}
Вага мережі після навчання (МБ)	13	87,739	68.4

На рис. 9 показано гістограмний варіант порівняння основних параметрів ЗНМ

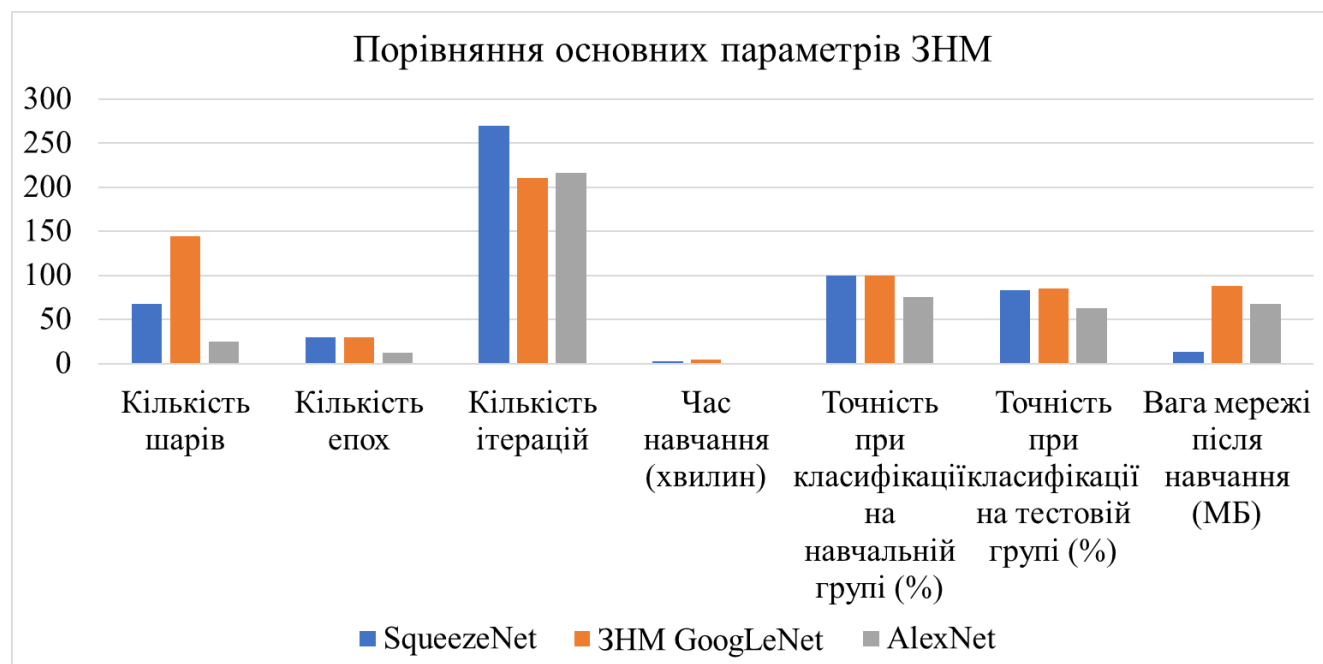


Рисунок 9 - Порівняння основних параметрів ЗНМ SqueezeNet, GoogLeNet, AlexNet

Як видно з табл. 4 достовірність при використанні всього 97 зображень найбільш висока для мережі Squeeze NetGoog LeNet: при класифікації на навчальній групі становить до 100%, при класифікації на тестовій групі - 83%, та 84.5 % відповідно. З урахуванням збільшення бази навчальної вибірки зображень КС та підвищення точності вимірювання кутів за рахунок обробки зображень, про що було сказано в 3 розділі досягається можливість підвищити достовірність дослідження стану КС в порівнянні з даними, що існують на сьогодні на 10%-15%.

ВИСНОВКИ

В роботі проведено огляд методів дослідження СКС дитини. Встановлено, що на сьогодні в основному використовують рентгенологічний та ультразвуковий метод дослідження. Представлено процес діагностування патологій КС за допомогою зображень УЗД.

Проведено аналіз і вибір програмної платформи для побудови ультразвукового засобу для оцінювання СКС дитини. Оптимальним варіантом вибрана програмна платформа Matlab. Розглянуто високотехнологічні комп'ютерні методи згорткових нейронних мереж для дослідження СКС дитини. Проаналізовано загальну структуру ЗНМ. Запропоновано метод автоматичного оцінювання СКС на основі 2D ультразвукових зображень, який виконує класифікацію стану кульшового суглоба за Графом шляхом відбраковування зображень неправильного положення кульшового суглоба, візуалізацію анатомічних орієнтирів його та вимірювання кутових показників, формування та ідентифікацію кутів в корональній площині КС, розрахунок кутових показників, класифікацію СКС за результатами, отриманих кутових показників, що дало змогу підвищити достовірність оцінки стану КС на 10% -15%.

Удосконалено метод фільтрації ультразвукових зображень, що дало змогу враховувати рівень зашумленості та рівень перепадів інтенсивності, та відповідно до цього змінювати глибину фільтрації й отримати більш високі показники кількісної оцінки якості фільтрації (показники PSNR та MSE, на 5-7 % вищі в порівнянні з відомими).

Отримала подальший розвиток математична модель виділення заданого фрагмента на ультразвуковому зображенні за його спектральними ознаками, яка використовує функцію еквівалентності, що дало змогу отримати більш точні координати реперних точок (відносна похибка становить 6,25%), за якими виконується формування ліній, а отже кутів для класифікації стану кульшового суглоба. Абсолютна похибка вимірювання кутів становить не більше 2^0

Запропоновано модифікацію еквівалентної моделі, що була спеціально адаптована для розпізнання області клубової кістки та верхньої губи, де визначаються реперні точки для діагностики стану кульшового суглобу шляхом формування кутів за Графом. Побудовано алгоритм та наведені результати моделювання програми NI Vision Assistant при визначенні міри близькості між

вибраним в якості еталона фрагментом та всіма іншими можливими фрагментами аналізованого зображення.

Проведено експериментальні дослідження 2D ультразвукових зображень СКС шляхом покорокового перетворення з використанням інструмента виділення контуру «Find Straight Edge». Показано, що в ручному варіанті вимірювання кут $\alpha = 55^\circ$, алгоритм з використанням інструмента визначення центрів кіл на бінарному зображенні дає показники $\alpha = 51,69^\circ$, а з використанням алгоритму виділення контуру «Find Straight Edge» дає показники $\alpha = 53,04^\circ$.

На основі запропонованих методів розроблено алгоритми та процедури комп'ютерної обробки зображень для оцінки геометричних параметрів кульшового суглобу: з використанням інструмента визначення центрів кіл на бінарному зображенні; з використанням інструмента виділення контуру «Find Straight Edge». Для комп'ютерної оцінки геометричних параметрів кульшового суглобу використано, як засіб пакет NI Vision Assistant. Для тестування обрано ультразвукове зображення кульшового суглобу типу 2a+ за Графом. Проведені моделювання показали, що другий алгоритм більш точно вимірює α – кут і, відповідно, з більш високою достовірністю визначає стан кульшового суглобу.

Вперше запропоновано автоматичний метод визначення певного кадру 2D ультразвуковому зображенню, що відповідає правильному положенню ультразвукової головки на тілі дитини шляхом застосування адаптивного нейромережевого аналізу, що дозволило забезпечити відбракування зображень й, таким чином, мінімізувати невизначеність положення суглоба з подальшим опрацювання правильного кадру для візуалізації анатомічних орієнтирів.

Розроблено структуру, алгоритм та апаратно-програмний засіб класифікації ультразвукових зображень СКС. Показано, що для прискорення обробки та класифікації зображень за типом СКС використовується GPU відеокарта з CUDA технологією блоку фільтрації спекл шуму, виділення контуру, визначення реперних точок, ЗНМ та автоматична класифікація СКС за Графом.

Для проведення навчання ЗНМ побудовано базу еталонів ультразвукових зображень СКС, для цього використано бібліотеку КС. Для експериментів вибрано ультразвукові зображення з ознаками дисплазії кульшового суглобу, що розділені на 5 класів ДКС: Type I; Type IIa, IIb; Type IIc, II D; Type III, IV; Type_EROR, по Графу. При побудові бази еталонів підготовлено 97 ультразвукових зображень КС розмірністю 210×300 пікселів, тип зображення RGB, глибина кольору 32 біт. Проведено тонке налаштування ЗНМ GoogLeNet, SqueezeNet, AlexNet, та їх навчання на навчальній вибірці та перевірка на тестованій. Показано так звану плитку образів вхідного зображення кульшового суглоба дитини, які формує фільтрами перший згортковий шар conv1 ЗНМ. Виконано порівняння результатів моделювання розглянутих ЗНМ, які пройшли процес навчання для класифікації ДКС. З яких видно, що по ряду основних параметрів таких як: кількість шарів, точність при класифікації на тестовій групі, вага мережі після навчання ЗНМ SqueezeNet має якісніші показники. Виконано порівняння результатів моделювання розглянутих ЗНМ, які пройшли процес навчання для класифікації СКС. З них видно, що по ряду основних параметрів,

таких як кількість шарів, точність при класифікації на тестовій групі, вага мережі після навчання ЗНМ, Squeeze Net має якісніші показники.

Результати дисертаційної роботи впроваджено.

Теоретичні та практичні результати використано у навчальному процесі для вивчення дисциплін «Електронні системи» «Біомедичні пристрої і системи» кафедри електроніки та наносистем Вінницького національного технічного університету акт впровадження від 2020р.

За результатами роботи розроблено та впроваджено апаратно-програмний засіб діагностування стану кульшового суглоба в медичному діагностичному центрі «Вінницька обласна дитяча клінічна лікарня», (м. Вінниця) та на кафедрі хірургії Вінницького національного медичного університету імені М. І. Пирогова, акт провадження від 2020р.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] Й. Й. Білінський, І. В. Сухоцька, та А. Б. Гуральник, «Розробка засобу контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми», *Технологический аудит и резервы производства*, № 5(1), с. 51-55, 2015. (Index Copernicus)
- [2] Й. Й. Білінський, О. І. Урван, та А. Б. Гуральник, «Сучасні методи перинатальної діагностики дисплазії кульшового суглоба: світові тенденції», *Наукові праці Вінницького політехнічного інституту* № 4, с. 1-10, 2019. Режим доступу: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2019-4-1-10>. (Наказ МОН № 975 від 11.07.2019 р.)
- [3] Й. Й. Білінський, О. І. Нікольський, та А. Б. Гуральник, «Фільтрація ультразвукових зображень на основі морфологічних операцій», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 71-79, 2019. (Index Copernicus)
- [4] Й. Й. Білінський, О. І. Нікольський, та А. Б. Гуральник, В. В. Погорілий «Огляд методів ультразвукової діагностики дисплазії кульшового суглобу та визначення найбільш прийнятних із них для комп'ютерного прогнозування захворювання», *Медична інформатика та інженерія*, № 3, с. 49-58, 2019.
- [5] Й. Й. Білінський, О. І. Нікольський, та А. Б. Гуральник, «Комп'ютерний аналіз 2d ультразвукових зображень кульшового суглобу та вимірювання його геометрії», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 46, с. 4-14, 2019. (Постанова ВАК України № 261 від 06.03.2015 року)
- [6] А. Б. Гуральник, «Методи виділення контурів зображень» на XLIII Науково-техн. конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних підприємств. Вінниця. 2014. Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2014/inrtzp/txt/Guralnyk.pdf>.
- [7] А. Б. Гуральник, «Засоби виділення контурів рентгенівських зображень» на XLIV Науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних підприємств, Вінниця 2015. Режим доступу:

<http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2015/inrtzp/el.php>.

[8] Й. Й. Білінський, та А. Б. Гуральник, «Обробка медико-біологічних зображень» на *Міжнародній науково-практичній Інтернет-конференції "Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи"(МТН-2015)*, Вінниця, 2015. Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789.pdf>

[9] Й. Й. Білінський, та А. Б. Гуральник, «Класифікація методів обробки медико-біологічних зображень» на *XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*, Одеса-Хмельницький, 2015, с. 15-16.

[10] Й.Й. Білінський, та А.Б. Гуральник, «Обробка медико-біологічних зображень» на *науково-технічній конференції «Фізика, електроніка, електротехніка»*, Суми 2016, с. 100-105.

[11] Й. Й. Білінський, та А. Б. Гуральник, «Використання середовища MATLAB для попередньої обробки рентгенівських зображень» на *XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*, Одеса-Хмельницький, 2015, 264 С.

[12] Й. Й. Білінський, та А. Б. Гуральник, «Розробка програмного забезпечення для діагностування дисплазії кульшового суглоба» на *XIII міжнародній конференції "Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016)"*, м. Вінниця, 2016. Режим доступу:

https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/13050/Bilynsky__Huralnyk.PDF?sequence=1&isAllowed=y.

[13] Й. Й. Білінський, О. І. Нікольський, та А. Б. Гуральник, «Алгоритм комп'ютерної діагностики 2d ультразвукових зображень дисплазії кульшового суглобу» на *I Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» СПРН-2019*, Вінниця, 2019, с. 150-153.

АНОТАЦІЯ

Гуральник А. Б. Метод і ультразвуковий засіб для автоматичного оцінювання стану кульшового суглоба. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.17 «Біологічні та медичні прилади і системи» – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню важливої науково-практичної задачі підвищення достовірності та скорочення часу на виявлення дисплазії кульшового суглоба та її класифікації у новонароджених і дітей раннього віку завдяки повній автоматизації процесу ультразвукового дослідження.

Діагностувати вади розвитку кульшових суглобів у новонароджених та дітей раннього віку можливо на підставі результатів клінічного та ультразвукового або рентгенологічного обстеження. Для ранньої діагностики вроджених вад розвитку кульшового суглоба застосовується, як правило,

ультразвукове дослідження (УЗД), що візуалізує всі складові кульшового суглоба, оскільки на відміну від рентгенологічного обстеження його можна проводити повторно без шкоди для організму.

На основі запропонованих методів розроблено алгоритм комп'ютерної діагностики стану кульшового суглобу на основі 2d ультразвукових зображень з використанням інструмента визначення центрів кіл на бінарному зображенні. Для тестування обрано ультразвукове зображення стану кульшового суглобу типу 2a+ за Графом. Для комп'ютерної оцінки геометричних параметрів кульшового суглобу використано, як засіб пакет NI Vision Assistant. Проведено експериментальні дослідження 2D ультразвукових зображень ДКС шляхом покрокового перетворення з використанням інструмента виділення контуру «Find Straight Edge». Показано, що в ручному варіанті вимірювання кут $\alpha = 55^\circ$, алгоритм з використанням інструмента визначення центрів кіл на бінарному зображенні дає показники $\alpha = 51,69^\circ$, а з використанням алгоритму виділення контуру «Find Straight Edge» дає показники $\alpha = 53,04^\circ$. Тобто другий алгоритм більш точно вимірює кута, за допомогою якого й визначають стан кульшового суглобу.

Ключові слова: кульшовий суглоб, ультразвукове зображення, спекл-шум, діагностування, УЗД, Граф, комп'ютерна обробка.

АННОТАЦІЯ

Гуральник А. Б. Метод и ультразвуковой средство для автоматического оценивания состояния тазобедренного сустава. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.17 "Биологические и медицинские приборы и системы" - Винницкий национальный технический университет, Винница, 2021.

Диссертация посвящена решению важной научно-практической задачи повышения достоверности и сокращение времени на выявление дисплазии тазобедренного сустава и ее классификации у новорожденных и детей раннего возраста благодаря полной автоматизации процесса ультразвукового исследования.

Диагностировать пороки развития тазобедренных суставов у новорожденных и детей раннего возраста возможно на основании результатов клинического и ультразвукового или рентгенологического обследования. Для ранней диагностики врожденных пороков развития тазобедренного сустава применяется, как правило, ультразвуковое исследование (УЗИ), что визуализирует все составляющие тазобедренного сустава, поскольку в отличие от рентгенологического обследованием его можно проводить повторно без вреда для организма.

На основе предложенных методов разработан алгоритм компьютерной диагностики 2d ультразвуковых изображений состояния тазобедренного сустава с

использованием инструмента определения центров кругов на бинарном изображении. Для тестирования выбрано ультразвуковое изображение состояния тазобедренного сустава типа 2а + за Графом. Для компьютерной оценки геометрических параметров тазобедренного сустава использовано как средство пакет NI Vision Assistant. Проведены экспериментальные исследования 2D ультразвуковых изображений ДКС путем пошагового преобразования с использованием инструмента выделения контура «Find Straight Edge». Показано, что в ручном варианте измерения угол $\alpha = 55^\circ$, алгоритм с использованием инструмента определения центров кругов на бинарном изображении дает показатели $\alpha = 51,69^\circ$, а с использованием алгоритма выделения контура «Find Straight Edge» дает показатели $\alpha = 53,04^\circ$. То есть второй алгоритм более точно измеряет кута, с помощью которого и определяют состояние тазобедренного сустава.

Ключевые слова: тазобедренный сустав, ультразвуковое изображение, спекл-шум, диагностирования, УЗИ, Граф, компьютерная обработка.

ABSTRACT

Guralnyk A. B. Method and ultrasound tool for automatic assessment of the condition of the hip joint. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the PhD on a specialty 05.11.17 “Biological and medical devices and systems” - Vinnytsia national technical university, Vinnytsia, 2021

It is possible to diagnose malformations of the hip joints in newborns and young children based on the results of clinical and ultrasound or X-ray examination. For early diagnosis of congenital malformations of the hip joint is usually used ultrasound (US), which visualizes all components of the hip joint, because in contrast to X-ray examination it can be repeated without harm to the body.

The ultrasound picture of the hip joint is evaluated by quantifying the exact values - acetabula angle (angle α), the angle of inclination of the cartilaginous lip (angle β), and the location of the center of the femoral head.

Although ultrasound equipment is widespread, appropriate practice and experience are required to obtain accurate ultrasound results. Even though the experience of using ultrasound of the hip joints in pediatrics is growing, this study may not always be accessible and convenient, and to make a reliable diagnosis based on visual observation, to classify the type of dysplasia according to known methods can only be an experienced doctor. .

The paper claim roved no review of research methods SCS child. It is established that today the X-ray and ultrasound method of research is mainly used. The main disadvantage of X-ray examination is radiation exposure, which does not allow the use of this method of research in children less than three months. Therefore, the ultrasonic method today becomes the main method of SCS research. The process of diagnosing CS pathologies with the help of ultrasound images is presented. Typical ultrasound images

of the hip joint were analyzed, their characteristic features were identified, and possible ways to increase their diagnostic value were identified. The analysis and selection of a software platform for the construction of an ultrasound tool for assessing the SCS of a child. Based on the analysis, the best option is the Matlab software platform. High-tech computer methods of convolutional neural networks for studying the condition of the child's hip joint are considered. Rolls neural networks (ConvNets) are widely used as tools for deep study on specialized databases Medical images. The general structure of convolutional neural networks is analyzed.

For performances filtering set of currently prescribed morphological changes with the addition procedure opened gray scale erosion and closing gray scale with further erosion in shades of gray, which made it possible to get a high-performance quantitative assessment of the quality of filtration. The standard MATLAB Image Processing toolbox features are used to blur and generate noise. When comparing the quantitative assessment of filter quality, it was concluded that filtering based on morphological operations on PSNR and MSE, shows results 5-7% higher than known, and also allows to obtain a more informative image.

A modification of the equivalence model has been proposed, which has been specially adapted to recognize the area of the iliac bone and upper lip, where reference points are determined to diagnose the condition of the hip joint by forming graph angles. The algorithm is constructed and the simulation results of the NI Vision Assistant program are presented when determining the degree of closeness between the fragment selected as a reference and all other possible fragments of the analyzed image. It is shown that the use of a modification of the equivalence model, which was specially adapted to recognize the area of the iliac bone and upper lip, which determines the reference points for diagnosing the condition of the hip joint by forming angles according to the graph, provides higher accuracy of determining geometric parameters of objects without the use of any post-processing and using known detectors. The NI Vision Assistant package was used as a tool for computer evaluation of the geometric parameters of the hip joint. Experimental studies of 2D ultrasound images of the DCS by stepwise transformation using the tool of contour selection " Find Straight Edge ". It is shown that in the manual variant of measuring the angle $\alpha = 55^\circ$, the algorithm using the tool for determining the centers of circles on a binary image gives indicators $\alpha = 51.69^\circ$, and using the algorithm for selecting the contour " Find Straight Edge " gives indicators $\alpha = 53.04^\circ$. That is, the second algorithm more accurately measures the α - angle and accordingly diagnoses hip dysplasia with higher reliability.

The general structure and it's detailing for classification of a database of a hip joint of the child on five classes according to the Graph is constructed: Type I, Type IIab, Type IIcD, Type III, VI and Type ERROR.

Keywords: hip joint, diagnosis, ultrasound, speckle-noise, Graph, computer processing.

Підписано до друку 00.01.2021 р. Формат 29,7×42 ¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2021-006.

Віддруковано в інформаційному редакційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 65-18-06
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.