

**Й. Й. Білінський, д. т. н., проф.; С. В. Юкиш**

## **АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕКОНСТРУКЦІЯ ТРИВИМІРНОГО РЕЛЬЄФУ ПОВЕРХНІ СПИНИ ЛЮДИНИ**

*У роботі запропоновано вдосконалений метод відновлення тривимірного рельєфу поверхні спини людини, розроблено математичну модель і рівняння перетворення 2D координат у координату глибини. Показано, що застосування патернів і обробка їхніх зображень із субпіксельною точністю забезпечують високоточне відновлення. Теоретичні результати дослідження підтверджено експериментально. Створене програмне забезпечення дозволяє автоматизувати процес реконструкції тривимірного рельєфу.*

**Ключові слова:** реконструкція, патерн, піксел, рельєф, проекційна система.

### **Вступ**

На сьогодні в багатьох галузях техніки безконтактні методи вимірювання все частіше використовують зображення для представлення та обробки вимірювальної інформації. Будь-яке зображення можна розглядати як двовимірний сигнал, що є значно ємнішим носієм інформації, ніж звичайний одновимірний (часовий). До таких зображень, зокрема, належать зображення частин м'язово-скелетного апарату людини, отримані за допомогою комплексу технічних засобів діагностики опорно-рухового апарату. Завдяки програмно-апаратній реконструкції тривимірного рельєфу поверхні спини людини, з'являється можливість оцінити не тільки кількісно-просторову асиметрію при неоптимальній статиці та динаміці, а також отримати взаємне розташування й геометричні розміри частин м'язово-скелетної системи.

### **Постановка завдання**

Активний розвиток комп'ютерних технологій створив передумови для розробки методів реконструкції тривимірної форми об'єктів за допомогою більш простих технічних засобів з використанням "проекції смуг", сформованих у когерентному або некогерентному світлі із заданим просторовим розподілом інтенсивності. Така реконструкція ґрунтується на принципі триангуляції з додатковим освітленням об'єкту набором патернів. Якщо відоме взаємне кутове розташування осей джерела (проектора) і відеокамери, то забезпечується однозначна відповідність елементів розподілу інтенсивності (патерна), що проектується, і елементів зображення відеокамери в області спостереження. Картина проекцій паралельних смуг видозмінюється відповідно до форми освітлюваної поверхні. Операція декодування дозволяє одержати координату відстані, тобто координати глибини для кожної точки поверхні об'єкта [1 – 3].

Цей метод реконструкції тривимірної форми має низку недоліків, які пов'язані, перш за все, з тим, що внаслідок проходження через оптичну систему, яка є неідеально лінійною, зображення спотворюється, межі патернів розмиваються. Специфіка поверхні самого об'єкта дослідження (шкіра людини) також вносить неоднозначність, оскільки є неоднорідною, має великий коефіцієнт як поглинання, так і розсіювання світла [4]. Усе це ускладнює процес локалізації краю патернів. Крім цього, не останнім чинником є квантування й дискретизація зображення патернів, що призводить до збільшення похибки знаходження координати глибини тривимірної форми об'єкта.

Отже, для усунення вищенаведених недоліків необхідно вирішити ряд завдань:

- отримати математичну модель координат глибини об'єкта з урахуванням збільшення та нелінійності оптичної системи;

- виконати попередню обробку зображення, яка забезпечила б високоточне виділення неперервної контурної лінії межі патерна шириною в один піксел;
- ідентифікувати вузлові точки патернів, що носять хаотичний характер розташування, й виконати їх впорядкування;
- використати інтерполяційні підходи для отримання поверхні об'єкта.

### Основна частина

У роботі розглядається удосконалений метод реконструкції тривимірної форми на основі знаходження координат вузлових точок, які дозволяють отримати третю координату глибини.

Для одержання координат точок глибини об'єкта необхідно, у першу чергу, визначити координати точок зображення об'єкта в двовимірному просторі. На точність такої системи переважно впливають параметри камери та її позиціонування, а також точність виділення підсвіченої лінії або точки на зображенні об'єкта.

Якщо вважати, що параметри оптичної системи камери відомі, то головним завданням є точне визначення координат виділених ліній і вузлових точок.

Розглянемо проходження променів у деякій оптичній системі, зображеній на рис. 1.

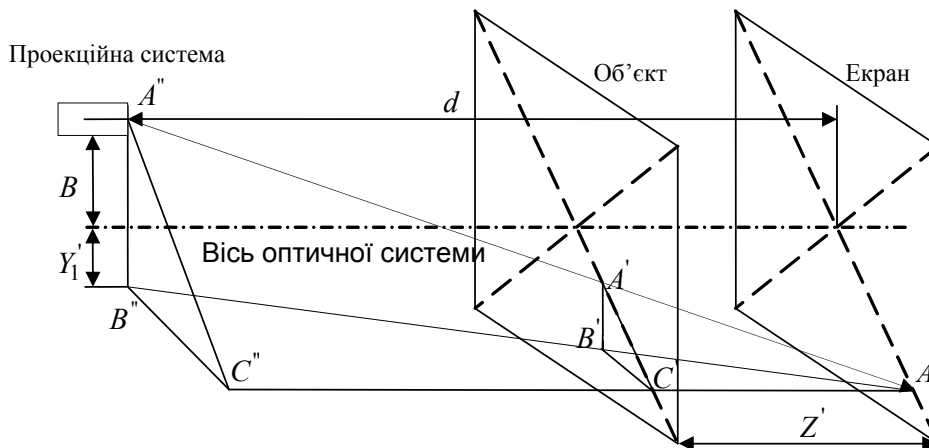


Рис. 1. Проходження променів у проекційній системі

Проекційна система знаходиться на відстані  $d$  від площини екрану й на відстані  $B$  від оптичної осі реєструючого пристрою. Проекційна система створює на екрані точку  $A$ , що має координати  $X'_1, Y'_1$ . При внесенні в систему об'єкта на відстані  $Z'$  від екрана, точка  $A$  з координатами  $X'_1, Y'_1$  трансформується в точку  $A'$  з координатами  $X'_2, Y'_2$ . Залежно від того, на якій відстані знаходиться об'єкт, світлова точка на реєструючому пристрої буде змінювати своє розташування.

Враховуючи координати точок  $A, A'$ , відстань  $d$  та геометрію проходження променів у оптичній системі, отримаємо вираз для визначення координати глибини  $Z'$ :

$$Z' = d \sqrt{\frac{(X'_1 - X'_2)^2 + (Y'_1 - Y'_2)^2}{X'^2_1 + (Y'_1 - B)^2}}. \quad (1)$$

Оскільки зображення на реєструючому пристрої отримується в зменшеному вигляді, для визначення реальних значень координат необхідно врахувати коефіцієнти збільшення оптичної системи для положення реєстрації точок  $A$  і  $A'$ , які з урахуванням дисторсії відповідають  $k$  і  $k_1$ . У такому випадку вираз (1) можна записати у вигляді:

$$Z' = d \sqrt{\frac{(X'_1 k - X'_2 k_1)^2 + (Y'_1 k - Y'_2 k_1)^2}{(X'_1 k)^2 + (Y'_1 - B)^2}}. \quad (2)$$

Вираз (2) є рівнянням перетворення 2D координат в координату глибини. Статична характеристика функції перетворення при заданих значеннях  $X'_1 = 0$ ,  $Y'_1 = 0$ ,  $d = 1.8$  м,  $B = 0.9$  м,  $k = 30 \cdot 10^{-5}$ ,  $k_1 = 40 \cdot 10^{-5}$  наведена на рис. 2а.

Для оцінки чутливості математичної моделі перетворимо вираз (2):

$$\frac{dZ'}{dY} = \frac{Yk^2}{\sqrt{\frac{X^2 k^2 + Y^2 k^2}{\frac{X_1^2 k^2}{d^2} + \operatorname{tg}^2(\alpha)} \left( \frac{X_1^2 k^2}{d^2} + \operatorname{tg}^2(\alpha) \right)}}, \quad (3)$$

де  $X, Y$  – різниця координат точок по горизонталі і вертикалі відповідно до внесення об'єкта і після внесення,  $\alpha$  – кут між оптичною віссю камери та напрямком падіння променя проєктуючого пристрою.

Графічне зображення чутливості при різних значеннях кута  $\alpha$  подано на рис. 2б, аналізуючи яке можна зробити висновок, що вища чутливість забезпечується при менших значеннях кута  $\alpha$ . При виборі оптимального значення кута  $\alpha$  слід також враховувати кут розходження променів проєктуючого пристрою.

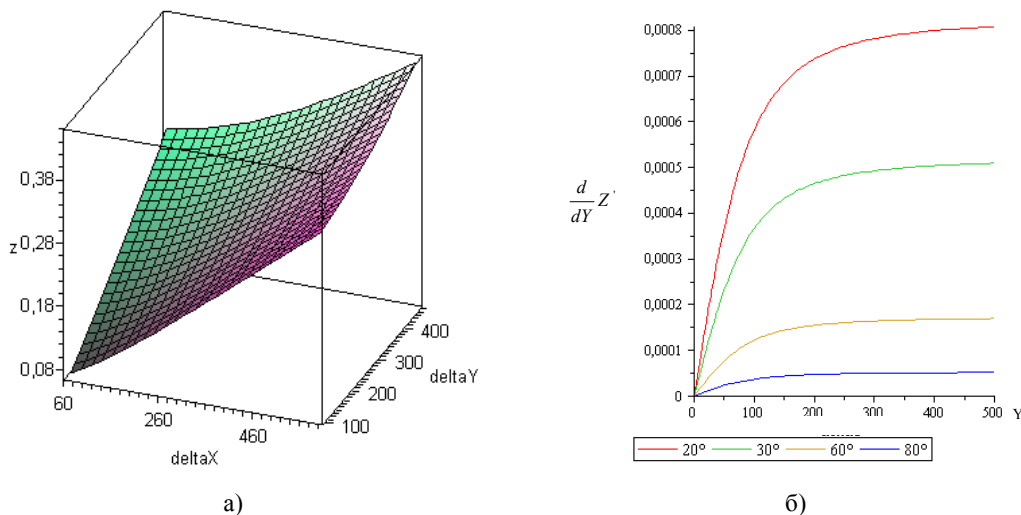


Рис. 2. Графічні характеристики функції перетворення:

- а) статична характеристика;  
б) чутливість при різних значеннях кута  $\alpha$

На основі проведених теоретичних досліджень запропонований апаратно-програмний комплекс реконструкції тривимірного рельєфу спини людини, який включає проєкційну систему, системи реєстрації та обробки зображення, працює таким чином. На екран, відстань  $d$  до якого відома, проєктуються за допомогою проєкційної системи почергово вертикальні та горизонтальні патерни, зображення яких реєструються системою реєстрації. Процедура реєстрації патернів повторюється після внесення в систему об'єкта. На основі отриманих зображень визначаються координати вузлових точок, і за допомогою виразу (2) обчислюється координата глибини кожної точки. Спільні точки вертикальних і горизонтальних ліній, отримані в результаті обробки зображень патернів, і є вузловими точками, які шукали. Нескладне програмне забезпечення ідентифікує спільні точки патернів, порядок їхнього розташування й визначає їхні субпіксельні координати, як описано в [5 – 7].

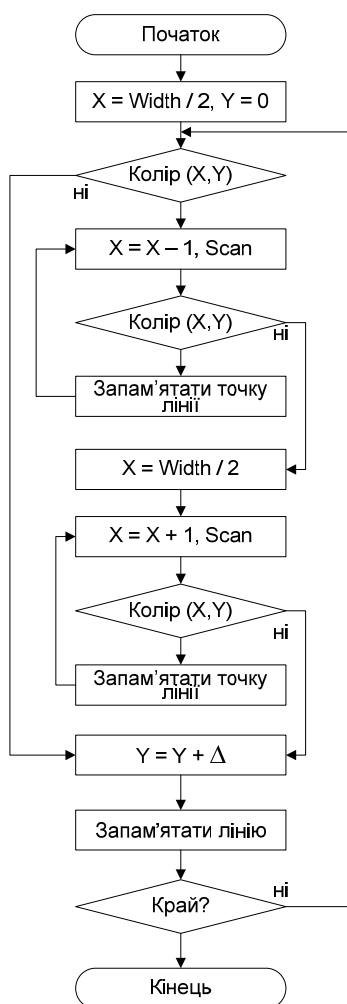


Рис. 3. Алгоритм функціонування програми

Алгоритм програми ідентифікації горизонтальних ліній наведено на рис. 3, згідно з яким зображення сканується вертикально, починаючи з найвищої центральної горизонтальної координати. Під час знаходження точки з кольором відмінним від кольору фону, у нашому випадку відмінним від чорного, відбувається сканування лінії в горизонтальному напрямку по обидві сторони від знайденої точки.

Операція Scan полягає в перевірці сусідніх пікселів у вертикальному напрямку на належність лінії. Після ідентифікації лінії триває вертикальне сканування, попередньо позиція сканування зміщується на мінімальну величину по вертикалі, що відповідає кроку  $\Delta=2-3$  піксела. Зміщення на цю величину  $\Delta$  необхідне для гарантованого переходу на ту частину зображення, де немає точок щойно ідентифікованої лінії. Аналогічно цей же алгоритм застосовується й для ідентифікації ліній вертикальних патернів, але початковий напрямок сканування змінюється на горизонтальний, а початкова точка – на крайню середню ліву точку.

Для підтвердження теоретичних викладок проведено експериментальні дослідження з використанням зразкового об'єкта – трикутної піраміди. Геометричні розміри граней піраміди було виміряно зразковим цифровим штангенциркулем типу ШЦЦ-1-300-0,01-ПЗ, абсолютна похибка якого не перевищує  $\pm 0,04$  мм в діапазоні вимірювання 0 – 300 мм, а висота – зразковим штангенрейсмасом типу ШР з абсолютною похибкою  $\pm 0,01$  мм в діапазоні вимірювання 0 – 630 мм. Також були використані патерни, зображені на рис. 4а. З метою усунення муарового ефекту ширина патерна підбиралася експериментальним шляхом. При реєстрації об'єкта, відстань до якого становила від 0,5 м до 1,2 м, ширина патерна й період патерна складав відповідно 2 і 5 піксела.

Як видно з рис. 4, зображення патернів змінювалися при внесенні сторонніх об'єктів.

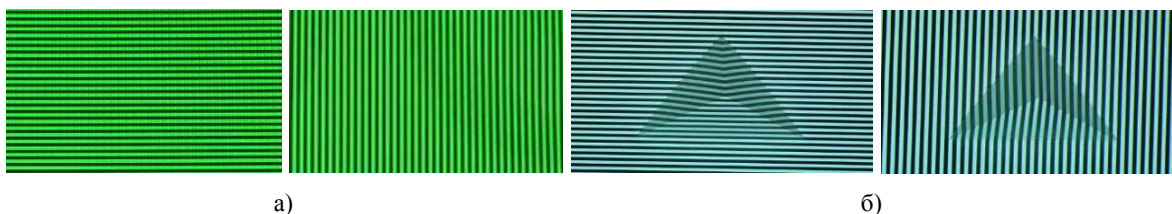


Рис. 4. Зображення патернів:  
а) патерни з відомим розподілом інтенсивності;  
б) модифіковані об'єктом патерни

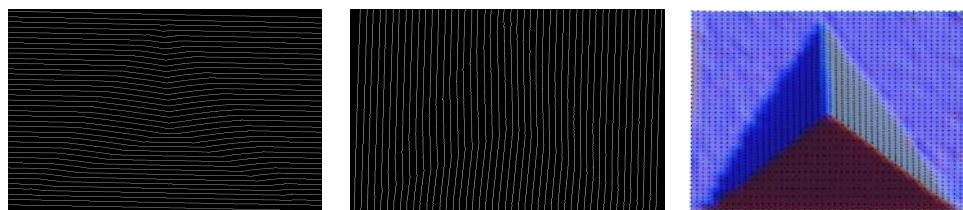


Рис. 5. Результати виділення контурів патернів і реконструкції рельєфу зразкового об'єкта

Результати виділення контурів патернів і відновлене зображення зразкового об'єкта із застосуванням описаного підходу, який включає попередню обробку зображення (низькочастотну фільтрацію, нормалізацію розподілу інтенсивності та виділення контурів з субпіксельною точністю), наведені на рис. 5.

Обробка експериментальних результатів показала, що похибка відновлення поверхні тривимірного об'єкта не перевищує 0,1 мм. Тому цей метод може бути застосований для відновлення тривимірного рельєфу різних об'єктів у медичних та лабораторних

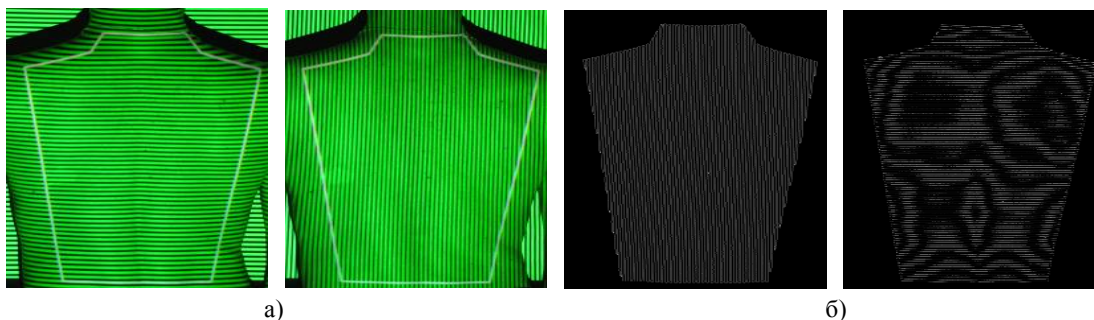


Рис. 6. Зображення патернів, що проєктуються на спину:  
а) початкове зображення; б) зображення після попередньої обробки

дослідженнях.

Зокрема, запропонований метод було застосовано для реконструкції рельєфу спини людини. Оскільки тіло та шкіра людини мають властивості поглинати й розсіювати світло, проведено дослідження з вибору оптимального кольору патернів.

Експериментально встановлено, що найефективнішими є патерни зеленого й чорного кольору. Зображення патернів, що проєктуються, і результати попередньої обробки наведено на рис. 6.

Реконструкцію рельєфу спини людини на основі ідентифікації вузлових точок і боковий переріз спини наведено на рис. 7.

Для реалізації запропонованого методу розроблена оптико-електронна система

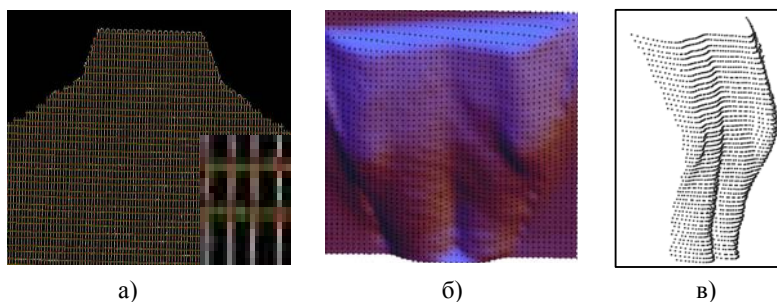


Рис. 7. Результати відновлення рельєфу поверхні тіла людини

реконструкції тривимірного рельєфу, структурну схему якої наведено на рис. 8.

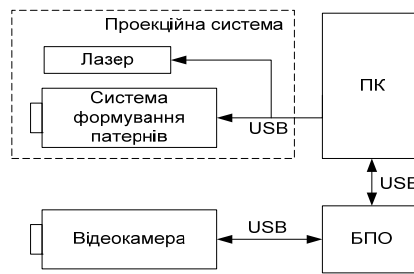


Рис. 8. Структурна схема оптико-електронної реконструкції тривимірного рельєфу

Система містить проекційний пристрій та відеокамеру, які під'єднані до комп'ютера. Проекційна система за допомогою лазера дозволяє створити канал далекометрування для знаходження відстані до площини, на якій знаходиться об'єкт, і два вимірювальних канали за допомогою системи формування патернів. Робота таких каналів розподілена в часі для знімання картини ліній горизонтального та вертикального патернів. Блок попередньої обробки (БПО) виконує процедуру обробки зображень ліній патернів і знаходження вузлових точок. Отримана інформація потрапляє до програмного забезпечення високого рівня, розташованого на персональному комп'ютері (ПК), яке виконує побудову та необхідне представлення досліджуваного об'єкта на пристрої відображення.

Запропонований підхід апаратно-програмної реконструкції тривимірного рельєфу порівнювався з відомим методом муарових ліній. У результаті порівняння встановлено, що кількість точок, що аналізуються, у запропонованому методі в 5 – 10 разів більша, ніж у муаровому, що дозволяє підвищити роздільну здатність. Крім цього, отримані вузлові точки носять упорядкований характер і мають властивість зв'язності, як наочно показано на рис. 7а, що дозволяє спростити процес обробки та підвищити швидкість. У муаровому методі вузлові точки носять випадковий характер і це ускладнює знаходження їхніх координат.

### Висновки

У роботі розглянуто вдосконалений метод реконструкції тривимірного рельєфу на основі принципу триангуляції, який з урахуванням збільшення та нелінійності оптичної системи забезпечує високоточне визначення координат глибини. Розроблено математичну модель методу, рівняння перетворення 2D координат у координату глибини та проведено її моделювання. Теоретичний аналіз функції перетворення дозволив встановити значення кута між оптичною віссю камери та напрямком проходження променів проектуючого пристрою, яке забезпечує найбільшу чутливість. Встановлено, що застосована система патернів дозволяє ідентифікувати вузлові точки, а розроблене програмне забезпечення – знаходити координати цих точок із субпіксельною точністю. Практична реалізація такої системи та експериментальні дослідження показали, що похибка відновлення поверхні тривимірного об'єкта не перевищує 0,1 мм, що свідчить про високу роздільну здатність і високу чутливість методу.

Запропонована апаратно-програмна реконструкція тривимірного рельєфу може мати практичне застосування не тільки в медичних дослідженнях, а й в архітектурі, будівництві, машинобудуванні, цифровому тривимірному документуванні цінностей культури.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Яне Б. Цифровая обработка изображений / Б. Яне. – М: Техносфера, 2007. – 584 с.
2. Білінський Й. Базовий оптико-електронний вимірювач лінійних величин / Білінський Й., Білінський В. // PHOTONICS-ODS 2002: 2-а Міжнар. конф., 23 – 25 квітня 2002 р.: тези доп. – Вінниця, 2002. – С. 88.
3. Posdamer J. L., Altschuler M. D. Surface measurement by space-encoded projected beam systems /

J. L. Posdamer, M. D. Altschuler // Computer Graphics and Image Processing. – 1982. – V. 18, № 1. – P. 1 – 17.

4. Система комп'ютерної діагностики стопи людини / [Й. Й. Білинський, Є. М. Коваленко, С. В. Юкиш, М. Й. Юкиш] // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 1, Т. 1 – С. 151 – 156.

5. Патент 29418 України МПК6 G 01 K 09/64. Спосіб виділення контуру зображення / Й. Й. Білинський, С. В. Юкиш; заявник і патентовласник – Вінницький національний технічний університет; опубл. 10.01.08, Бюл. №1.

6. Патент 38795 України МПК6G 06K 9/36. Спосіб субпіксельної локалізації краю об'єкта на зображенні / Й. Й. Білинський; заявник і патентовласник – Вінницький національний технічний університет; опубл. 26.01.09, Бюл. №2.

7. Патент 44900 України МПК6 G01 B11/00. Спосіб безконтактного вимірювання 3D координат об'єкта / Й. Й. Білинський, М. Й. Юкиш., С. В. Юкиш, заявник і патентовласник – Вінницький національний технічний університет; опубл. 26.10.09, Бюл. №20.

**Білинський Йосип Йосипович** – д. т. н., професор, завідувач кафедри електроніки.

**Юкиш Сергій Васильович** – здобувач, програміст І-ї категорії "ІВП Інновінн", тел. +380678107074, sergey.yukish@innovinn.com.

Вінницький національний технічний університет.