

И. И. Билинский, д. т. н., проф.; С. В. Юкиш

АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЕХМЕРНОГО РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ СПИНЫ ЧЕЛОВЕКА

В работе предложен усовершенствованный метод восстановления трехмерного рельефа поверхности спины человека, разработана математическая модель и уравнение преобразования 2D координат в координату глубины. Показано, что применение паттернов и обработка их изображений с субпиксельной точностью обеспечивают высокоточное восстановление. Теоретические результаты исследования подтверждены экспериментально. Созданное программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс реконструкции трехмерного рельефа.

Ключевые слова: реконструкция, паттерн, пиксель, рельеф, проекционная система.

Введение

Сегодня во многих областях техники бесконтактные методы измерения все чаще используют изображение для представления и обработки измерительной информации. Любое изображение можно рассматривать как двухмерный сигнал, который более емкий, чем обычный одномерный (временной). К таким изображениям, в частности, относятся изображения частей мышечно-скелетного аппарата человека, полученные с помощью комплекса технических средств диагностики опорно-двигательного аппарата. Благодаря программно-аппаратной реконструкции трехмерного рельефа поверхности спины человека, появляется возможность оценить не только количественно-пространственную асимметрию при неоптимальной статике и динамике, а также получить взаимное расположение и геометрические размеры частей мышечно-скелетной системы.

Постановка задачи

Активное развитие компьютерных технологий создало предпосылки для разработки методов реконструкции трехмерной формы объектов с помощью более простых технических средств с использованием "проекции полос", сформированных в когерентном или некогерентном свете с заданным пространственным распределением интенсивности. Такая реконструкция базируется на принципе триангуляции с дополнительным освещением объекта набором паттернов. При известном взаимном угловом расположении осей источника (проектора) и видеокамеры обеспечивается однозначное соответствие элементов распределения интенсивности (паттерна), который проецируется, и элементов изображения видеокамеры в области наблюдения. Картина проекций параллельных полос видоизменяется в соответствии с формой освещаемой поверхности. Операция декодирования позволяет получить координату расстояния, то есть координаты глубины для каждой точки поверхности объекта [1 – 3].

Данный метод реконструкции трехмерной формы имеет ряд недостатков, связанных, прежде всего, с тем, что вследствие прохождения через оптическую систему, которая является неидеально линейной, изображение искажается, границы паттернов размываются. Специфика поверхности самого объекта исследования (кожа человека) также вносит неоднозначность, поскольку неоднородна, имеет большой коэффициент как поглощения, так и рассеивания света [4]. Все это усложняет процесс локализации края паттернов. Кроме этого, не последним фактором является квантование и дискретизация изображения паттернов, что приводит к увеличению погрешности нахождения координаты глубины трехмерной формы объекта.

Таким образом, для устранения названных выше недостатков необходимо решить ряд задач:

- получить математическую модель координат глубины объекта с учетом увеличения и нелинейности оптической системы;
- выполнить предварительную обработку изображения, которая бы обеспечила высокоточное выделение непрерывной контурной линии границы паттерна, шириной в один пиксель;
- идентифицировать узловые точки паттернов, носящие хаотичный характер расположения, и выполнить их упорядочение;
- использовать интерполяционные подходы для получения поверхности объекта.

Основная часть

В работе рассматривается усовершенствованный метод реконструкции трехмерной формы на основе нахождения координат узловых точек, которые позволяют получить третью координату глубины.

Для получения координат точек глубины объекта необходимо, в первую очередь, определить координаты точек изображения объекта в двухмерном пространстве. На точность такой системы главным образом влияют параметры камеры и ее позиционирование, а также точность выделения подсвеченной линии или точки на изображении объекта.

Если считать, что параметры оптической системы камеры известны, то главной задачей будет точное определение координат выделенных линий и узловых точек.

Рассмотрим прохождение лучей в некоторой оптической системе, изображенной на рис. 1.

Проекционная система находится на расстоянии d от плоскости экрана и на расстоянии

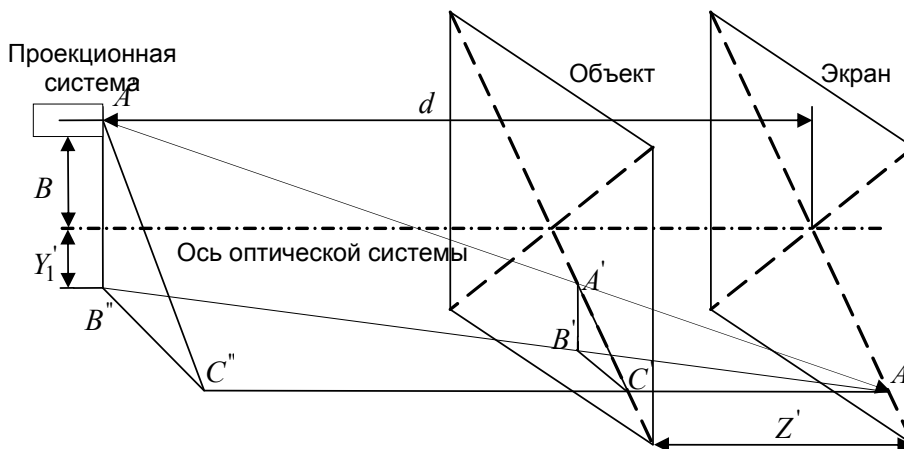


Рис. 1. Прохождение лучей в проекционной системе

B от оптической оси регистрирующего устройства. Проекционная система создает на экране точку A , которая имеет координаты X_1', Y_1' . При внесении в систему объекта на расстоянии Z' от экрана, точка A с координатами X_1', Y_1' трансформируется в точку A' с координатами X_2', Y_2' . В зависимости от того, на каком расстоянии находится объект, световая точка на регистрирующем устройстве будет менять свое положение.

Учитывая координаты точек A , A' , расстояние d и геометрию прохождения лучей в оптической системе, получим выражение для определения координаты глубины Z' :

$$Z' = d \sqrt{\frac{(X_1' - X_2')^2 + (Y_1' - Y_2')^2}{X_1'^2 + (Y_1' - B)^2}}. \quad (1)$$

Поскольку изображение на регистрирующем устройстве получается в уменьшенном виде, для определения реальных значений координат необходимо учесть коэффициенты увеличения оптической системы для положения регистрации точек A и A' , которые с учетом дисторсии соответствуют k и k_1 . В таком случае выражение (1) можно записать в виде:

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

Выражение (2) является уравнением преобразования 2D координат в координату глубины. Статическая характеристика функции преобразования при заданных значениях $X'_1 = 0$, $Y'_1 = 0$, $d = 1.8$ м, $B = 0.9$ м, $k = 30 \cdot 10^{-5}$, $k_1 = 40 \cdot 10^{-5}$ показана на рис. 2а.

Для оценки чувствительности математической модели преобразуем выражение (2):

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

где X, Y – разница координат точек по горизонтали и вертикали соответственно до и после внесения объекта, α – угол между оптической осью камеры и направлением падения луча проектирующего устройства.

Графическое изображение чувствительности при разных значениях угла α представлено

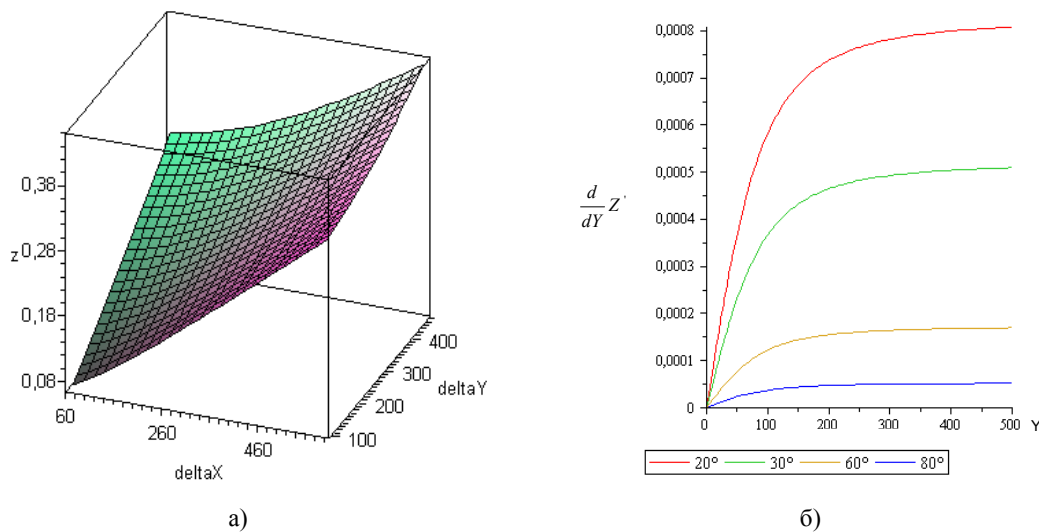


Рис. 2. Графические характеристики функции преобразования

а) статическая характеристика;

б) чувствительность при разных значениях угла α

на рис. 2б, анализируя которое можно сделать вывод, что более высокая чувствительность обеспечивается при меньших значениях угла α . При выборе оптимального значения угла α нужно также учитывать угол расхождения лучей проектирующего устройства.

На основе проведенных теоретических исследований предложен аппаратно-программный комплекс реконструкции трехмерного рельефа спины человека, который включает проекционную систему, системы регистрации и обработки изображения, работает следующим образом. На экран, расстояние d к которому известно, проецируются с помощью проекционной системы поочередно вертикальные и горизонтальные паттерны,

изображения которых регистрируются системой регистрации. Процедура регистрации паттернов повторяется после внесения в систему объекта. На основе полученных изображений определяются координаты узловых точек, и с помощью выражения (2) рассчитывается координата глубины каждой точки. Общие точки вертикальных и горизонтальных линий, полученные в результате обработки изображений паттернов, и

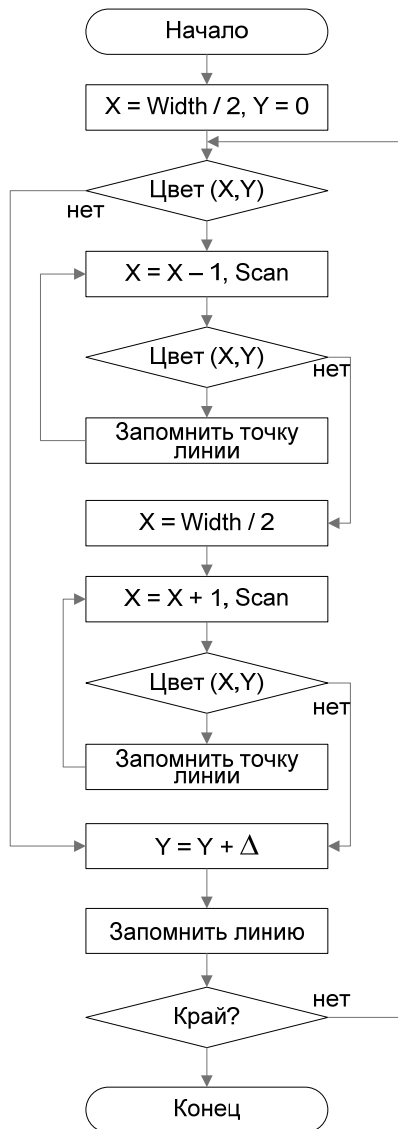


Рис. 3. Алгоритм функционирования программы

муарового эффекта ширина паттерна подбиралась экспериментальным путем. При регистрации объекта, расстояние к которому составляло от 0,5 м до 1,2 м, ширина и период паттерна составлял соответственно 2 и 5 пикселя.

Как видно из рисунка 4, изображения паттернов менялись при внесении посторонних объектов. Результаты выделения контуров паттернов и восстановленное изображение образцового объекта с применением описанного подхода, включающего предварительную обработку изображения (низкочастотную фильтрацию, нормализацию распределения интенсивности и выделение контуров с субпиксельной точностью), представлены на рис 5.

являются искомыми узловыми точками. Несложное программное обеспечение идентифицирует общие точки паттернов, порядок их расположения и определяет их субпиксельные координаты, как описано в [5 – 7].

Алгоритм программы идентификации горизонтальных линий приведен на рис. 3, согласно которому изображение сканируется вертикально, начиная с наивысшей центральной горизонтальной координаты. При нахождении точки с цветом отличающимся от цвета фона, в данном случае – от черного, происходит сканирование линии в горизонтальном направлении по обе стороны от найденной точки.

Операция Scan состоит в проверке соседних пикселей в вертикальном направлении на принадлежность линии. После идентификации линии продолжается вертикальное сканирование, предварительно смещается позиция сканирования на минимальную величину по вертикали, соответствующей шагу $\Delta = 2 - 3$ пикселя. Смещение на эту величину Δ необходимо для гарантированного перехода на ту часть изображения, где нет точек только что идентифицированной линии. Аналогично этот же алгоритм применяется и для идентификации линий вертикальных паттернов, но начальное направление сканирования меняется на горизонтальное, а начальная точка – на крайнюю среднюю левую точку.

Для подтверждения теоретических выкладок проведены экспериментальные исследования с использованием образцового объекта – треугольной пирамиды. Геометрические размеры граней пирамиды были измерены образцовым цифровым штангенциркулем типа ШЦЦ-1-300-0,01-ПЗ, абсолютная погрешность которого не превышает $\pm 0,04$ мм в диапазоне измерения 0 – 300 мм, а высота – образцовым штангенрейсмасом типа ШР с абсолютной погрешностью $\pm 0,01$ мм в диапазоне измерения 0 – 630 мм. При этом были использованы паттерны, изображенные на рис. 4а. С целью устранения

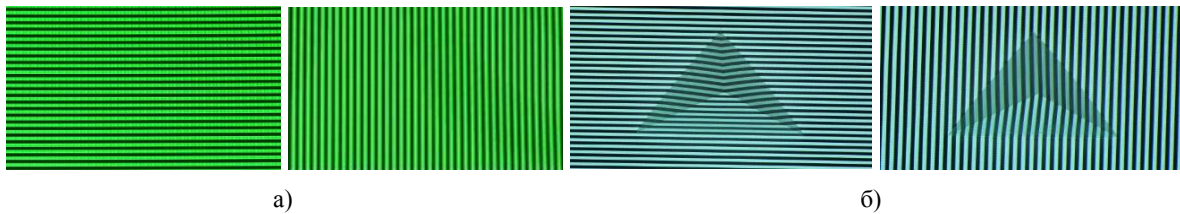


Рис. 4. Изображения паттернов:
а) паттерны с известным распределением интенсивности;
б) модифицированные объектом паттерны

Обработка экспериментальных результатов показала, что погрешность восстановления

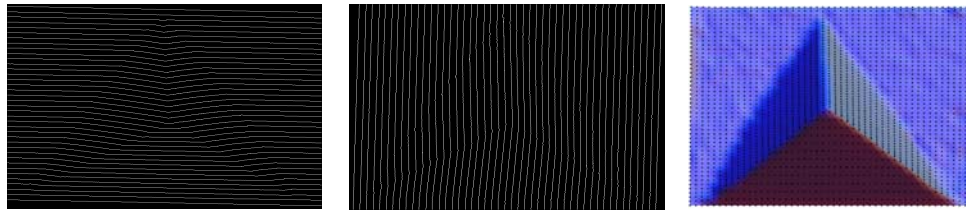


Рис. 5. Результаты выделения контуров паттернов и реконструкции рельефа образцового объекта

поверхности трехмерного объекта не превышает 0,1 мм. Поэтому данный метод может быть применен для восстановления трехмерного рельефа разных объектов в медицинских и лабораторных исследованиях.

В частности, предложенный метод был применен для реконструкции рельефа спины человека. Поскольку тело и кожа человека имеют свойство поглощать и рассеивать свет, проведены исследования по выбору оптимального цвета паттернов.

Экспериментально установлено, что наиболее эффективными являются паттерны зеленого и черного цвета. Изображение проецируемых паттернов и результаты предварительной обработки приведены на рис. 6.

Реконструкция рельефа спины человека на основе идентификации узловых точек и

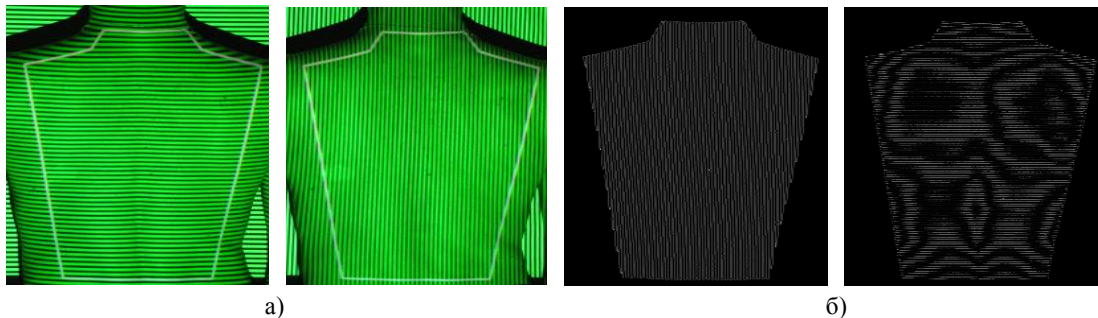


Рис. 6. Изображения паттернов, проектируемых на спину:
а) начальное изображение; б) изображение после предварительной обработки

боковое сечение спины представлены на рис. 7.

Для реализации предложенного метода разработана оптико-электронная система реконструкции трехмерного рельефа, структурная схема которой представлена на рис. 8.

Система содержит проектирующее устройство и видеокамеру, подключенные к компьютеру. Проекционная система при помощи лазера позволяет создать канал дальнометрии для нахождения расстояния к плоскости, на которой находится объект, и два измерительных канала при помощи системы формирования паттернов. Работа таких каналов распределена во времени для съемки картин линий горизонтального и вертикального паттернов. Блок предварительной обработки (БПО) выполняет процедуру обработки изображений линий паттернов и нахождения узловых точек. Полученная информация

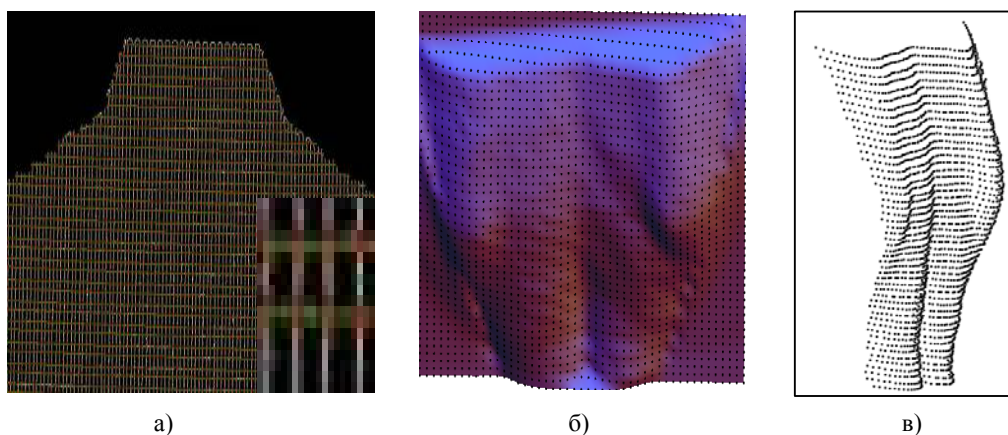


Рис. 7. Результаты восстановления рельефа поверхности тела человека:
а) нахождение и идентификация узловых точек; б) полученный рельеф спины;
в) боковое сечение спины

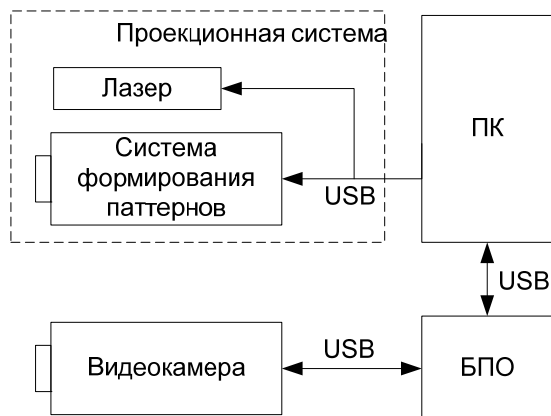


Рис. 8. Структурная схема оптико-электронной системы реконструкции трехмерного рельефа

попадает в программное обеспечение высокого уровня, расположенное на персональном компьютере (ПК), которое выполняет построение и необходимое представление исследуемого объекта на устройстве отображения.

Предложенный подход аппаратно-программной реконструкции трехмерного рельефа сравнивался с известным методом муаровых линий. В результате сравнения установлено, что количество точек, которые анализируются, в предложенном методе в 5 – 10 раз больше, чем в муаровом, что позволяет повысить разрешающую способность. Кроме этого, полученные узловые точки носят упорядоченный характер и имеют свойство связности, как наглядно представлено на рис. 7а, что позволяет упростить процесс обработки и повысить быстродействие. В муаровом методе узловые точки носят случайный характер и это усложняет нахождение их координат.

Выводы

В работе рассмотрен усовершенствованный метод реконструкции трехмерного рельефа на основе принципа триангуляции, который с учетом увеличения и нелинейности оптической системы обеспечивает высокоточное определение координат глубины. Разработана математическая модель метода, уравнение преобразования 2D координат в координату глубины и проведено ее моделирование. Теоретический анализ функции преобразования позволил установить значение угла между оптической осью камеры и направлением прохождения лучей проектирующего устройства, обеспечивающего наибольшую

чутливість. Установлено, що применена система паттернів дає можливість ідентифікувати вузлові точки, а розроблене програмне забезпечення дозволяє знаходити координати цих точок з субпіксельною точністю. Практична реалізація такої системи і експериментальні дослідження показали, що погрешність відновлення поверхні тривимірного об'єкта не перевищує 0,1 мм, що свідчить про високу роздільну здатність і високу чутливості методу.

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

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Яне Б. Цифрова обробка зображень / 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. Білінський, 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. Білінський, С. В. Юкиш; заявник і патентовласник – Вінницький національний технічний університет; опубл. 10.01.08, Бюл. №1.
6. Патент 38795 України МПК6 G 06 K 9/36. Спосіб субпіксельної локалізації краю об'єкта на зображенні / Й. Й. Білінський; заявник і патентовласник – Вінницький національний технічний університет; опубл. 26.01.09, Бюл. №2.
7. Патент 44900 України МПК6 G 01 B 11/00. Спосіб безконтактного вимірювання 3D координат об'єкта / Й. Й. Білінський, М. Й. Юкиш, С. В. Юкиш, заявник і патентовласник – Вінницький національний технічний університет; опубл. 26.10.09, Бюл. №20.

Білінський Йосиф Йосифович – д. т. н., професор, завідувач кафедри електроніки.

Юкиш Сергій Васильович – соискатель, програміст І-ї категорії "ІВП Інновінн", тел. +380678107074, sergey.yukish@innovinn.com.
Вінницький національний технічний університет.