

УДК 535.411.854

Проекционный метод измерения рельефа объекта*

В.И. ГУЖОВ, С.П. ИЛЬИНЫХ, А.И. УБЕРТ

Представлен модифицированный проекционный метод измерения рельефа поверхности. Метод предусматривает новый способ формирования проекционных изображений решеток на основе битового разложения. Измерение рельефа производится путем проецирования на объект битовых изображений решеток с различным периодом. Полные разности хода определяются на основе модулярной алгебры.

Ключевые слова: оптика, проекционная интерферометрия, интерферометр, интерферограмма, метод фазовых шагов, цифровой анализ изображений.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные системы компьютерного зрения получили широкое распространение в робототехнических комплексах. В системах 3D-компьютерного зрения в основном используются проекционные методы определения координат (рельефа) трехмерных объектов, основанные на использовании структурированной подсветки объекта [1]. Метод структурированной подсветки, имитирует интерференционный метод измерения рельефа поверхности [2] и заключается в освещении объекта специально сформированным изображением синусоидальной решетки. Трехмерные координаты (рельеф) объекта определяют по величине искажения профиля синусоидальной решетки, которое зависит от геометрических параметров рельефа объекта. На рисунке 1 показан принцип измерения профиля рельефа.

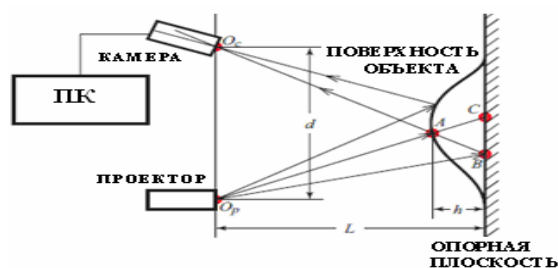


Рисунок 1. Проекционный метод измерения рельефа объекта [3]

* Статья получена 3 февраля 2012 г.

Интенсивность регистрируемого камерой изображения описывается следующим образом. На рисунке 4 показаны интерферограммы, синтезированные из битовых плоскостей для одного из периодов решетки.

$$I_c(x,y) = \alpha(x,y)[A_c + B_c(2\pi f_\varphi + \varphi(x,y))] \quad (1)$$

где (x, y) координаты изображения, а $\alpha(x, y)$ – коэффициент отражения излучения от поверхности, A_c и B_c средняя яркость, и амплитуда изображения, f_φ – частота синусоидальных полос проецируемой решетки, $\varphi(x,y)$ – глубина дисторсии профиля синусоидальной решетки пропорциональная величине рельефа или *интерференционная фаза* [3].

Метод позволяет непосредственно измерять пространственные координаты рельефа объекта соизмеримые с периодом проецируемой решетки. Принимая во внимание обозначения, приведенные на рисунке 1, высота рельефа описывается следующей формулой: $h = BC \cdot L/D \cdot 1/(1+BC/D)$. Здесь $BC = \beta(\varphi_A - \varphi_B + 2\pi N) = \beta(\Phi(x,y))$, β – геометрический параметр, $\varphi_A - \varphi_B = \varphi$ – разность фаз в точках A и B , φ – локальная фаза, соответствующая дробной части полной фазы $\Phi(x,y)$. Для расчета фазы используем метод фазовых сдвигов [4], в котором регистрируется набор интерферограмм с различными фазовыми сдвигами: $I_c(x,y) = \alpha(x,y)[A + B(\cos(\varphi(x,y) + \delta\varphi_i))]$. Фазовый сдвиг $\delta\varphi$ получается путем пространственного сдвига изображения решетки на величину пропорциональную периоду синусоидальных полос T . Сдвиг решетки на один период эквивалентен внесению фазового сдвига $\delta\varphi$ равного 2π . При внесении фазовых сдвигов на величину 0 , $\delta\varphi_1 = 2\pi/3$ и $\delta\varphi_2 = 4\pi/3$ получим следующую формулу расшифровки: $\varphi = \arctan[(I_3 - I_2)/(3I_1 - 3I_2)]$. Для определения истинной величины измеряемого рельефа необходимо устранить фазовую неоднозначность [4,5], т.е. подсчитывать количество полос N от измеряемой точки до выбранной опорной точки. Данная задача достаточно трудна при наличии разрывов полос на изображении.

Точность метода ограничивается следующими факторами: разрядностью устройства для ввода оптических изображений, неравномерностью альбедо по поверхности объекта и сложностью устранения фазовой неоднозначности, требующей применения интерактивных алгоритмов, что препятствует полной автоматизации метода измерения.

2. МЕТОД

Для устранения указанных недостатков проекционного метода предлагается:

1) формировать структурированное освещение в виде набора проекций битовых плоскостей, совокупность которых позволяет сформировать синтезированное изображение синусоидальной решетки проецируемой на объект, свободное от влияния коэффициента отражения излучения от поверхности объекта. $I_p(x,y) = \sum 2^n \cdot I_n(x,y)$. Где $I_n(x,y)$ – интенсивность битового слоя, $I_n \in (0,1)$. На рисунке 2 показан набор из 8 битовых изображений из которых синтезируется изображение решетки с синусоидальным профилем полос. Синусоидальное распределение регистрируемого камерой изображения $I_c(x,y)$, $I_c \in (0,1)$ получается путем суммирования битовых изображений $I_n(x,y)$ с весовыми коэффициентами: $I_c(x,y) = \sum 2^{-n} I_n(x,y)$.

2) Для устранения фазовой неоднозначности разработано большое количество методов [5], основанных на выделении скачков фазы в окрестности, измеряемой точки фазы, что приводит к накапливаемым грубым ошибкам, в случаях ложных перепадов яркости на изображении и при разрывах полос. Впервые для решения данной проблемы был предложен подход, в котором абсолютная величина фазы Φ вычисляется непосредственно. Подход основан на китайской теореме об

остатках [6]. Сущность подхода состоит в том, что измеренные значения локальных фаз φ переводят в локальные разности хода, δ которые выражают в виде целых значений с необходимым числом знаков, соответствующих необходимой точности измерения. Полные разности хода - A находят путем решения целочисленной системы сравнений: $\{A \equiv \delta_1 \pmod{m_1}, A \equiv \delta_2 \pmod{m_2}\}$. Максимальная длина траектории $L_{\max} = m_1 \times m_2 - 1$ определяет динамический диапазон однозначного определения A .

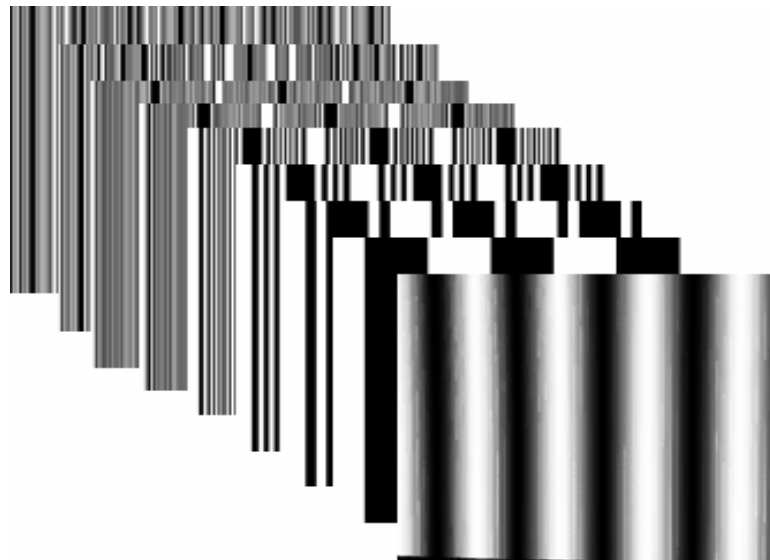


Рисунок 2. Набор битовых плоскостей и синтезированное изображение

Для нахождения решений указанной системы сравнений используется подход, использующий алгоритм Евклида [7].

Отметим недостатки такого подхода. Для нахождения решения требуется выполнения большого количества операций, что, учитывая значительное число точек в изображении 10^6 - 10^7 и более, приводит к неоправданно большим затратам времени при выполнении расчетов. Необходимо приводить результаты измерений к целочисленному виду, что накладывает определенные ограничения на динамический диапазон измерений. Кроме того, алгоритм неустойчив к ошибкам определения локальных фаз. Авторами предложен простой алгоритм определения полной разности фазы, не имеющий указанных недостатков. Представим решения системы сравнения в виде траектории на комплексной плоскости (см. рис. 3). При изменении фазы (δ_1 , δ_2) точка будет перемещаться по диагоналям траектории.

Для определения полной разности фазы A в произвольной точке изображения необходимо выполнить следующие этапы:

А) Запомним значения локальной δ и полной разности фазы A в точках, соответствующих концам верхних и нижних диагоналей, которые рассчитываются по следующим правилам:

$$A_i = i \cdot m_1, \quad i \in [0 \dots N - 1], \quad (2)$$

$$A_j = j \cdot m_2, \quad j \in [0 \dots M - 1]. \quad (3)$$

Здесь N - число верхних диагоналей, $N = \text{int}(L_{\max}/m_1)$, а M - число нижних диагоналей, $M = \text{int}(L_{\max}/m_2)$.

Переносим точку (А) в конец диагонали. Новые координаты точки (А) будут определяться разностью локальных фаз $D = \delta_1 - \delta_2$. Для верхней диагонали имеем $A = (0, |D|)$ и $A = (0, D)$ для нижней диагонали. Принадлежность точки нижней или верхней диагонали определяется знаком разности $\delta_1 - \delta_2$. Если разность имеет положительный знак, то точка находится на нижней диагонали, если отрицательный, то на верхней диагонали.

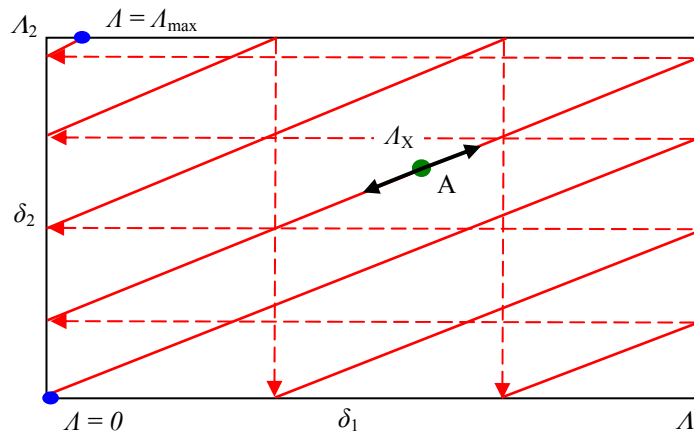


Рисунок 3. Траектория движения точки (А) при изменении фазы

Б) Определяем номер диагонали, которой принадлежит точка путем поиска значения разности D соответствующего локальной фазе в списке концов диагоналей, полученном на первом этапе (см. (2), (3)). В случае, когда из-за погрешности измерения локальных фаз точка не принадлежит ни одной из диагоналей, производим коррекцию положения точки, для чего выбираем диагональ, для которой значение локальной фазы наиболее близко к разности локальных фаз D . Для сокращения времени поиска можно отсортировать списки значениям локальных фаз концов диагоналей, тогда оценка номера конца диагонали может быть получена по следующим формулам: $\tilde{n}_1 = \text{int}(N \delta_1/m_1)$ - для нижних концов диагоналей и $\tilde{n}_2 = \text{int}(N \delta_2/m_2)$ - для верхних концов диагоналей. Для уточнения номера диагонали необходимо, как правило, не более одной, двух итераций.

Полная разность хода вычисляется по формуле $A_x = A_n + \delta_1$, если точка находится на нижней диагонали и по формуле $A_x = A_n + \delta_2$, если точка находится на верхней диагонали.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для практической проверки предложенной технологии использовалась проекционная система, состоящая из проектора (1200×1024 пиксел) и фотокамеры (1600×1200 пиксел). Размер проекционного изображения составил 1×1 м². Угол между оптическими осями проектора и камеры составил 30°. Расстояние между объектом и камерой - 3 м. На рисунке 4 показаны интерферограммы, синтезированные из битовых плоскостей для одного из периодов решетки (см. рис.2).

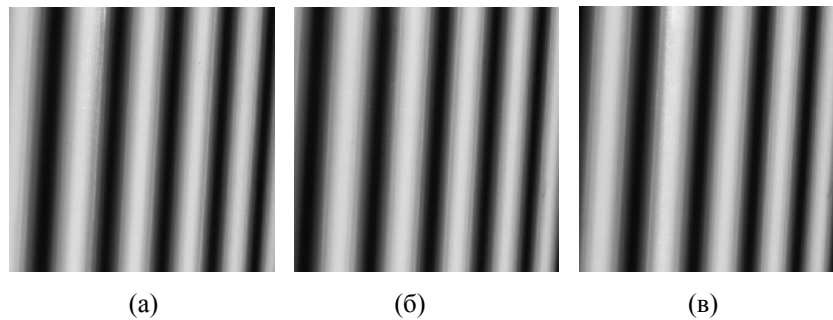


Рисунок 4. Проекционные изображения период $T = 17$.

а) без сдвига, б) сдвиг решетки на период $2T/3$, в) сдвиг - $4T/3$.

На рисунке 5 показаны локальные разности хода, соответствующие разным периодам проекционных решеток $T = 17$ (рисунок 5а) и $T = 23$ (рисунок 5б)

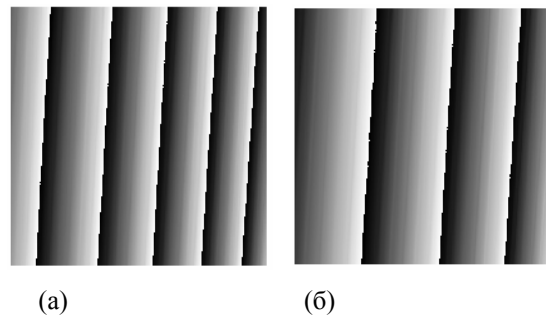


Рисунок 5. Поле фаз без устранения фазовой неоднозначности.

а) период - 17, б) период 23.

На рисунке 6 показаны траектории локальных разностей хода, соответствующие разным периодам проекционных решеток $T = 17$ и $T = 23$ (рисунок 6а) и результат измерения рельефа предложенным методом (рисунок 6б).

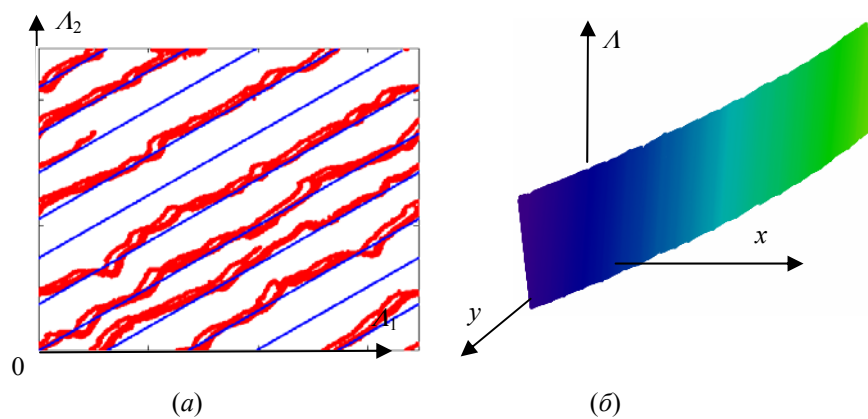


Рисунок 6. Результаты эксперимента.

а) траектории локальных разностей хода. б) рельеф поверхности объекта

ВЫВОДЫ

Представлен проекционный метод измерения профиля рельефа, устойчивый к вариации коэффициента отражения излучения от поверхности объекта. Метод также устойчив к ошибкам измерения локальных фаз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Bulygin F.V.** //Optical and electronic measurements. Collection of articles / Edited by V.S. Ivanova. – Moscow: Publishing office “University book”, 2005. – p. 420.
- [2] **F. Chen, G. M. Brown, and M. Song**, “Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods,” *Opt. Eng.* 39, 10–22 (2000).
- [3] **C. Guan, L. Hassebrook, and D. Lau**, “Composite structured light pattern for three-dimensional video,” *Opt. Express* 11, 406–417 (2003).
- [4] **T. R. Judge and P. J. Bryanston-Cross** “A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis,” *Opt. Lasers Eng.* 21, 199–239 (1994)
- [5] **H. Zhao, W. Chen, and Y. Tan**, “Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes,” *Appl. Opt.* 33, 4497–4500 (1994).
- [6] **V. I. Gushov and Y. N. Solodkin**, “Automatic processing of fringe patterns in integer interferometers,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 14, no. 4-5, pp. 311–324, 1991.
- [7] **В.И. Гужов, С.П. Ильиных**. Компьютерная интерферометрия. - Новосибирск. Изд-во НГТУ, 2004, 252с.

Гужов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, декан факультета автоматике и вычислительной техника. Основное направление научных исследований – Оптические и информационные технологии. Имеет более 130 публикаций, в том числе 2 монографии.

Ильиных Сергей Петрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники. Основное направление научных исследований – Интерференционные измерительные системы. Имеет более 80 публикаций, в том числе 1 монография.

Уберт Алексей Игоревич, аспирант кафедры автоматике НГТУ. Основное направление научных исследований – Определение рельефа трехмерных поверхностей. Имеет более 80 публикаций, в том числе 1 монография.

Projection method for measuring the topography of the object.

Gushov V.I., Iliinyh S.P., Ubert A.I.

Presented a modified projection method for measuring surface topography. The method provides a new method for forming a projection image of lattices based on bit-decomposition. Measurement of the relief is made by projecting an object bitmap gratings with different periods. Full path difference determined on the basis of a modular algebra.

Key words: *optics*, optics, projection interferometry, interferometer, interferogram, the method of phase shifts, digital image analysis.