

*С. В. Двойнишников<sup>1\*</sup>, В. О. Зуев<sup>1</sup>, В. Г. Меледин<sup>1</sup>, Г. В. Бакакин<sup>1</sup>*

## **Обработка изображений Грей-код кодирования для восстановления трехмерной геометрии с использованием структурированного освещения**

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\* e-mail: dv.s@mail.ru

**Аннотация.** Работа посвящена развитию методов обработки данных в системах измерения трехмерной геометрии триангуляционными методами с использованием структурированного освещения и Грей-код кодирования. В работе предложен метод обработки изображений Грей-код кодирования для восстановления трехмерной геометрии поверхности измеряемого объекта. В основе метода лежит применение Грей-код кодирования без использования инвертированных изображений для увеличения скорости сканирования, анализ амплитудно-частотной характеристики оптической системы и определение порогового значения регистрируемой интенсивности в каждой точке на изображении, определяющего регистрируемый цвет проецируемого бинарного кода на изображении. В результате применение предложенного подхода позволяет уменьшить время измерения в 2 раза по сравнению с классическим методом Грей-код кодирования с использованием инвертированных структурированных засветок.

**Ключевые слова:** Грей-код, расшифровка изображений, трехмерная геометрия

*S. V. Dvoynishnikov<sup>1\*</sup>, V. O. Zuev<sup>1</sup>, V. G. Meledin<sup>1</sup>, G. V. Bakakin<sup>1</sup>*

## **Image Processing Gray Code Coding for 3D Geometry Reconstruction Using Structured Lighting**

<sup>1</sup>Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: dv.s@mail.ru

**Abstract.** The work is devoted to the development of data processing methods in systems for measuring three-dimensional geometry using triangulation methods with structured lighting and gray code coding. The paper proposes an image processing method, Gray code coding, to restore the three-dimensional geometry of the surface of the measured object. The method is based on the use of Gray code coding without the use of inverted images to increase scanning speed, analysis of the frequency response of the optical system and determination of the threshold value of the registered intensity at each point on the image, which determines the registered color of the projected binary code on the image. As a result, the application of the proposed approach makes it possible to reduce the measurement time by 2 times compared to the classical Gray code coding method using inverted structured illumination.

**Keywords:** Gray code, image decoding, three-dimensional geometry

## *Введение*

Оптические методы измерения трехмерной геометрии активно развиваются и совершенствуются [1–2]. В настоящее время большое распространение получили методы на основе комбинации подхода Грей-код кодирования и фазовой триангуляции [3–5]. Такой подход позволяет одновременно использовать достоинства обоих методов: широкий динамический диапазон по измеряемой глубине сцены, высокую точность измерений и устойчивость к расфокусировке оптических элементов измерительного комплекса [6–9].

Основное преимущество метода Грей-кодирования, определяющее его применение в системах с структурированным освещением – устойчивость к ошибке определения бинарного кода на переходных областях. К примеру, для классического бинарного кодирования области перехода от белого к черному являются неустойчивыми к ошибке определения, поскольку их локализация повторяется с увеличением частоты бинарных полос. В методе Грей-кодирования локализация не повторяется и, более того, ошибка вблизи границы перехода от черного к белому локализована в этой области, что обеспечивает устойчивую работу алгоритмов расшифровки при расфокусировке оптических элементов измерительной системы.

При расшифровке Грей-кода на принимаемых изображениях измеряемой сцены, как правило, используют следующий подход: последовательно проецируют последовательность кодов, причем на каждый код проецируют два изображения: прямой код и инвертированный. Это позволяет однозначно бинаризовать изображение с грей-кодом с помощью операции вычитания. Недостаток такого подхода заключается в том, что необходимо сформировать и зарегистрировать фотоприемником в 2 раза больше изображений с Грей-кодом.

Проблема расшифровки Грей-кода без использования инвертированных изображений связана с тем, что в случае неидеальной фокусировки проецируемой и принимающей оптики амплитуда бинарных полос с увеличением частоты будет снижаться. Это связано с «заваливанием» амплитудно-частотной характеристики приемно-передаточного тракта. В условиях ограниченного динамического диапазона фотоприемника и произвольных светорассеивающих свойств поверхности измеряемого объекта это приведет к абсолютно непредсказуемому значению пороговой интенсивности, которая будет характеризовать значение, выше которого бинарный код нужно считать, как белый цвет в данной точке, а ниже – как черный.

В данной работе предложен алгоритм, работа которого обеспечивает устойчивую бинаризацию изображений с Грей-кодом в условиях ограниченного динамического диапазона фотоприемника и произвольных светорассеивающих свойств поверхности измеряемого объекта без использования инвертированных проецируемых изображений.

## Описание метода

Код Грея легко вычисляется из двоичного кода путем побитовой операции «Исключающее ИЛИ» с тем же числом, сдвинутым вправо на один бит, в котором старший разряд заполняется нулем.  $i$ -й бит кода Грея  $G_i$  выражается через биты двоичного кода  $B_i$  следующим образом:

$$G_i = B_i \oplus B_{i+1}, \quad (1)$$

где  $\oplus$  – операция «исключающее ИЛИ»; биты нумеруются справа налево, начиная с младшего.

На рис. 1 показана маска, кодирующая код Грея, которая описывается выражением (1).

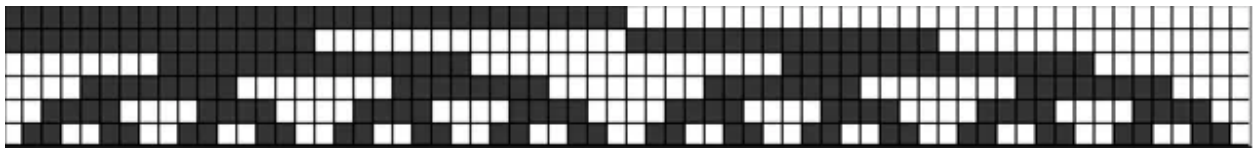


Рис. 1. Маска бинарного кода Грея. По горизонтали порядковый номер кодированного числа, по вертикали – разряд кода

При регистрации структурированного изображения фотоприемником, оно будет подвергнуто операции двойной свертки с ядром, описывающим функцию рассеяния точки оптики, формирующей структурированную засветку, и ядром, описывающим функцию рассеяния точки, формирующей изображение оптики:

$$g(x, y) = \iint \iint h_1(x - x_1, y - y_1) h_2(x_1 - x_2, y_1 - y_2) f(x_2, y_2) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2. \quad (2)$$

В полученном выражении можно рассматривать амплитудно-частотную характеристику оптической системы измерительного комплекса, как ядро свертки, характеризующееся сверткой двух функций рассеяния точки  $h_1$  и  $h_2$ .

Задача расшифровки бинарного кода сводится к определению порогового значения регистрируемой интенсивности для бинаризации изображения: если интенсивность больше порогового значения, то проецируемая полоса в данной точке была белая, если ниже, то черная. Предлагаемый метод основан на учете амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) оптической системы измерительного комплекса. При увеличении частоты модуляции проецируемого сигнала амплитуда регистрируемого сигнала будет снижаться в соответствии с АЧХ оптической системы. Таким образом, если частота модуляции сигнала будет приближена или даже выше частоты Котельникова, амплитуда сигнала будет близка к нулю, а значение регистрируемой амплитуды может быть использовано в качестве порогового значения.

В случае выхода регистрируемой интенсивности за пределы динамического диапазона предлагаемый алгоритм проверяет минимальную и максимальную регистрируемую амплитуду при формировании равномерной белой и черной засветки, которые выполняются на первом шаге, и результат сравнивается с значением пороговой интенсивности. В случае, если пороговая интенсивность очень близка или равна минимальной или максимальной зарегистрированной интенсивности, то фотоприемник работает на границе динамического диапазона, и пороговое значение необходимо скорректировать в сторону противоположного максимального или минимального значения зарегистрированной интенсивности.

Пример работы алгоритма представлен ниже. На рис. 2а и 2б показаны примеры зарегистрированных изображений при проецировании Грей-кода для порядкового номер кодируемого разряда 4 и 9.

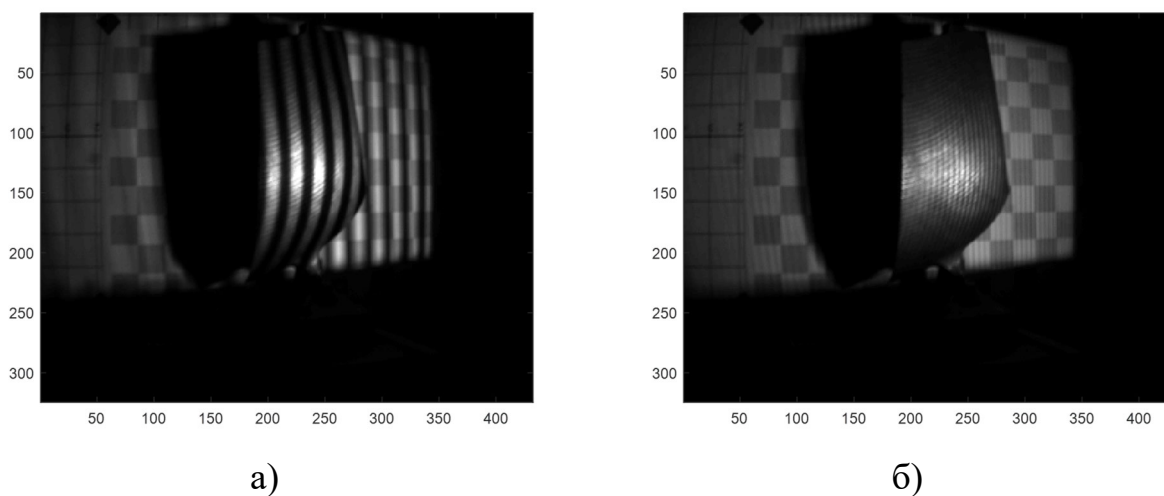


Рис. 2. Примеры зарегистрированных изображений при Грей-кодировании

Изображения демонстрируют, что разница амплитуды белой и черной полосы снижается с увеличением частоты проецируемых полос.

На рис. 3 показаны зависимости интенсивности от номера кадра при формировании Грей кодирования с инвертированным изображением в точке с координатами (252,135) для трех случаев настройки фотоприемников: когда динамический диапазон согласован с яркостью регистрируемого изображения (data 1), когда яркость черных полос была ниже динамического диапазона фотоприемника (data 2), и когда яркость белых полос была выше динамического диапазона фотоприемника (data 3).

Для представленных зависимостей интенсивности пороговое значение интенсивности при расшифровке последовательности Грей-кода будет равно 151 для data1, 254 для data2 и 19 для data3. В результате предложенный метод позволяет выполнить расшифровку Грей-кода при использовании 10 изображений структурированной засветки вместо 20.

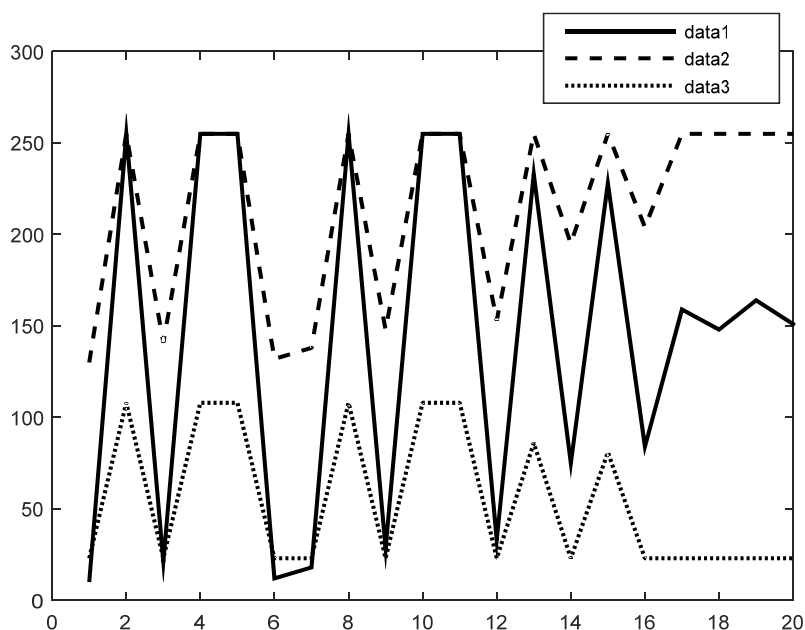


Рис. 3. Зависимость интенсивности от номера кадра при формировании Грей кодирования с инвертированным изображением при различных настройках фотоприемника

### *Заключение*

В работе предложен метод обработки изображений Грей-код кодирования для восстановления трехмерной геометрии с использованием структурированного освещения. В основе метода лежит применение Грей-код кодирования без использования инвертированных изображений для увеличения скорости сканирования, анализ АЧХ оптической системы и определение порогового значения регистрируемой интенсивности в каждой точке на изображении, определяющего регистрируемый цвет проецируемого бинарного кода на изображении.

### *Благодарности*

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Двойнишников С. В., Меледин В. Г., Кабардин И. К., Рахманов В. В., Зуев В. О. Метод фазовой триангуляции со статистической фильтрацией для измерений в условиях случайных аддитивных помех и ограниченного динамического диапазона фотоприемника // Измерительная техника. – 2022. – № 6. – С. 36–40. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-6-36-40>.
2. С.В. Двойнишников, Г.В Бакакин, В.В. Рахманов, В.О. Зуев. Адаптивная статистическая фильтрация данных при расшифровке фазовых изображений в условиях случайных аддитивных помех фотоприемника // ИнтерЭкспо Гео-Сибирь, т.8, №1, 2022. – С.72–79. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-8-1-72-79.
3. Zhang, Y., Yilmaz, A. Structured light based 3d scanning for specular surface by the combination of Gray code and phase shifting // 2016 Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B3, 137–142, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B3-137-2016>.

4. Silva, R.; Silva, B.; Fernandes, C.; Morouço, P.; Alves, N.; Veloso, A. A Review on 3D Scanners Studies for Producing Customized Orthoses // *Sensors* 2024, 24, 1373. <https://doi.org/10.3390/s24051373>.
5. Jonathan CK Wells Three-dimensional optical scanning for clinical body shape assessment comes of age // *The American Journal of Clinical Nutrition* V.110, Issue 6, 2019. – 1272–1274, <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqz258>.
6. I. K. Kabardin, S. V. Dvoynishnikov, M. R. Gordienko, S. V. Kakaulin, V. E. Ledovskii, V. O. Zuev Development of multivariable triangulation method for diagnostics of icing of wind turbine blades// *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2022. – Vol. 31, No. 4. – P. 1–6 DOI: 10.1134/S1810232822040014.
7. Двойнишников С. В., Бакакин Г. В., Зуев В. О., Меледин В. Г. Адаптивный алгоритм обработки данных в условиях аддитивных помех фотоприемника в задачах измерения трехмерной геометрии методами фазовой триангуляции // *Сибирский журнал индустриальной математики*. – 2023. – Т. 26, № 1. – С. 47–54. DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.104.
8. Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Меледин В.Г., Рахманов В.В. Алгоритм расшифровки фазовых изображений для измерения трехмерной геометрии динамических объектов // *Сибирский журнал индустриальной математики*. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 53–59. DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.205.
9. S. V. Dvoynishnikov, V. A. Pavlov, G. V. Bakakin, D. V. Kulikov, V. G. Meledin and V. V. Rakhmanov, "Numerical Algorithm for Processing Phase Images for Measuring Three-Dimensional Geometry of Dynamic Objects by Phase Triangulation Methods," *2023 IEEE 32nd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Helsinki, Finland, 2023, DOI: 10.1109/ISIE51358.2023.10227911.

© С. В. Двойнишников, В. О. Зуев, В. Г. Меледин, Г. В. Бакакин, 2024