

*С. В. Какаулин<sup>1✉</sup>, И. К. Кабардин<sup>1</sup>*

## **Исследование свойств источников освещения при повышении временного разрешения метода фазовой триангуляции**

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

**Аннотация.** В работе рассматривается влияние характеристик источников освещения на качество и устойчивость изображений при реализации метода фазовой триангуляции в условиях повышенного временного разрешения. Особое внимание уделено анализу поведения DLP- и LCD-проекторов при различных частотах проецирования и синхронизации с высокоскоростными камерами. В ходе экспериментов исследовались эффекты мерцания, нестабильности яркости и задержки между генерацией изображения и его регистрацией. Используются методы регистрации световых импульсов с помощью фотоприемников и осциллографа, а также автоматизированный анализ видеозаписей. Полученные результаты позволяют сформулировать рекомендации по выбору параметров проектора и камеры, обеспечивающих наименьшие искажения при съемке фазовых паттернов, что критически важно для ускорения 3D-реконструкции без потери точности.

Ключевые слова: DLP- и LCD-проекторы, автоматизация, метод фазовой триангуляции

*S. V. Kakaulin<sup>1✉</sup>, I. K. Kabardin<sup>1</sup>*

## **Investigation of properties of lighting sources with increasing time resolution of the phase triangulation method**

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

**Abstract.** The paper considers the influence of the characteristics of lighting sources on the quality and stability of images when implementing the phase triangulation method in conditions of increased temporal resolution. Special attention is paid to analyzing the behavior of DLP and LCD projectors at different projection frequencies and synchronization with high-speed cameras. The experiments investigated the effects of flickering, brightness instability, and the delay between image generation and recording. Methods of recording light pulses using photodetectors and an oscilloscope, as well as automated analysis of video recordings, were used. The results obtained allow us to formulate recommendations on the choice of projector and camera parameters that ensure the least distortion when shooting phase patterns, which is crucial for speeding up 3D reconstruction without loss of accuracy.

**Keywords:** DLP and LCD projectors, automation, phase triangulation method

### ***Введение***

Метод фазовой триангуляции является одним из наиболее точных и широко используемых подходов в системах активного 3D-сканирования. Он основан на проекции на объект серии структурированных (обычно синусоидальных) паттер-

нов и регистрации искажений этих паттернов с помощью видеокамеры. По фазовому сдвигу между зарегистрированными изображениями можно вычислить глубину сцены с высокой точностью. Однако, одной из основных проблем, ограничивающих применение этого метода в задачах, требующих высокой скорости, остается временная несогласованность между источником (проектором) и приемником (камерой). Эта несогласованность приводит к появлению переходных состояний в кадрах – частичной проекции паттернов, мерцанию и искажению фазовых градиентов, что делает невозможной корректную фазовую реконструкцию.

Современные камеры обладают высокой частотой съемки (до 500–1000 кадров в секунду и выше), что открывает перспективы значительного ускорения всего цикла 3D-сканирования. Однако, при отсутствии аппаратной синхронизации с проектором и точной временной координации проекции паттернов съемка на высокой скорости может привести к еще большей нестабильности изображений. Таким образом, задача сокращения времени на сканирование до 1 секунды или менее требует не только высокоскоростного оборудования, но и глубокого понимания и управления временными характеристиками системы.

В данной работе проводится комплексное исследование влияния временного разрешения и согласованности компонентов системы фазовой триангуляции на стабильность захвата изображений. С использованием фотоприемника и осциллографа измеряется фактическая частота обновления проектора и фиксируются возможные нестабильности. Параллельно проводится высокоскоростная съемка проецируемых паттернов камерой с частотой до 540 кадров в секунду, что позволяет в реальном времени проанализировать переходные процессы при смене паттернов. В процессе экспериментов разрабатывается и реализуется методика определения и оптимизации временного смещения (capture offset), позволяющая регистрировать только стабильные кадры без переходов.

Результаты эксперимента демонстрируют возможность устойчивой съемки фазовых паттернов даже при высокой скорости проекции, что является важным шагом к реализации быстродействующих 3D-сканеров на базе метода фазовой триангуляции.

### ***Экспериментальная установка, материалы и методики экспериментов***

Целью эксперимента являлось исследование поведения источников освещения, используемых для проецирования фазовых паттернов, в условиях высокоскоростной съемки. Основная задача заключалась в определении степени стабильности изображения, формируемого проектором, и его взаимодействия с высокочастотной видеорегистрацией, характерной для ускоренного варианта метода фазовой триангуляции.

В качестве регистратора использовалась высокоскоростная CMOS-камера DMM 37UX287-ML, обеспечивающая частоту съемки до 539 кадров в секунду при разрешении 720×540 пикселей в монохромном режиме. Все автоматические настройки экспозиции, усиления и баланса яркости были отключены. Экспози-

ция устанавливалась вручную, в диапазоне от 1/120 до 1/2000 секунды, в зависимости от эксперимента.

В качестве источников освещения использовались два типа проекторов: LCD-проектор (INFOCUS INL2156) и стандартный монитор с частотой обновления 60 Гц. На проекционную поверхность последовательно выводились черно-белые и синусоидальные фазовые паттерны. Частота смены изображений контролировалась алгоритмом. Также проводились эксперименты с постоянным белым фоном, позволяющим оценить мерцание и скорость развертки самого устройства проецирования.

Для оценки временной стабильности изображения применялись два подхода. Первый – визуальный анализ яркости отдельных пикселей и областей с использованием программной обработки видеозаписей. Второй – аппаратное измерение задержек и сигналов с помощью фотоприемников и цифрового осциллографа. В последнем случае регистрировались световые импульсы от экрана или проектора при помощи фотодиодов, установленных в фиксированных точках изображения.

Синхронизация видео и оптических сигналов позволила выявить задержки между началом проецирования и регистрацией изображения, а также оценить повторяемость и стабильность фазовых структур при различных режимах. Полученные данные легли в основу оценки пригодности различных источников света для использования в ускоренных системах фазовой триангуляции.

### ***Результаты***

В результате проведенных экспериментов была подтверждена высокая чувствительность метода фазовой триангуляции к временной согласованности между проектором и камерой. При отсутствии аппаратной синхронизации и использовании высокочастотной видеосъемки удалось эмпирически выделить диапазон частот проекции, в котором возможно стабильное извлечение кадров, свободных от переходных искажений.

Наиболее устойчивое поведение системы наблюдалось при установке частоты проектора на 20 Гц. В этих условиях один паттерн отображается на протяжении 50 мс, из которых более 40 мс приходится на стабильную фазу проекции. Это позволяет с высокой надежностью захватывать изображения в моменты, когда паттерн полностью сформирован на экране. Проведенная съемка при 539.96 FPS и последующий анализ яркости каждого кадра показали наличие четких плато, соответствующих стабильному отображению черных и белых изображений. Автоматизированный выбор по одному кадру из каждого плато позволил формировать серию устойчивых снимков, пригодных для фазовой обработки без дополнительных коррекций.

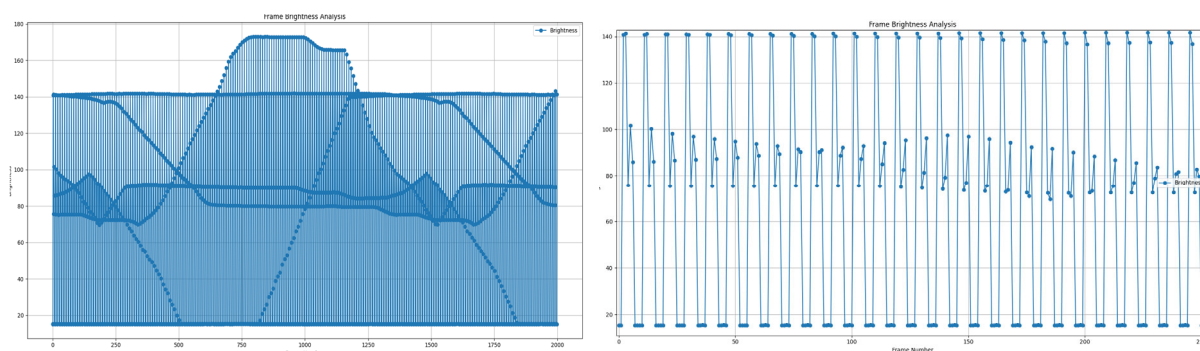


Рис 1. График яркости паттерна от номера кадра (проявляется мерцание и рассинхронизация). 120 Гц проектор, 600 кадров в секунду.



Рис 2. График отображает полученные по одному стабильному черному и белому кадру из каждого цикла проекции, чтобы избежать влияния развертки и переходных состояний проектора

При увеличении частоты проекции (30–60 Гц) наблюдалось значительное сокращение временного интервала стабильной проекции, в результате чего доля переходных кадров возрастала, а плато становились менее выраженными. Особенно критичным становилось это поведение при 60 Гц: стабильная часть кадра составляла менее 1 мс, что затрудняло точное попадание камеры в нужный временной интервал даже при использовании capture offset.

Таким образом, основной практический результат эксперимента заключается в выявлении режима работы системы (проекция паттернов с частотой 20 Гц), при котором становится возможной надежная регистрация каждого изображения в стабильной фазе, без аппаратной синхронизации. Этот подход позволяет

существенно повысить качество съемки и обеспечить корректную реконструкцию при фазовой триангуляции в условиях ограниченного времени сканирования.

### ***Заключение***

В ходе проведенного исследования было проанализировано поведение различных типов проекторов при использовании в методе фазовой триангуляции в условиях высокоскоростной видеорегистрации. Особое внимание уделялось стабильности яркости, наличию мерцания и способности формировать четкое изображение фазовых паттернов при частоте съемки до 540 кадров в секунду.

Основной результат эксперимента заключается в том, что DLP-проектор, несмотря на его формально более высокую частоту обновления, демонстрирует выраженное мерцание и нестабильность яркости, что затрудняет его использование в задачах с повышенным временным разрешением без специальных синхронизирующих механизмов. В отличие от него, LCD-проектор (Everycom YG625), обладающий меньшей частотой проецирования, показал гораздо более стабильную картину освещения и более предсказуемое поведение при высокочастотной съемке.

Таким образом, можно сделать вывод, что при построении высокоскоростных 3D-систем на основе фазовой триангуляции в ряде случаев предпочтение следует отдавать LCD-проекторам, несмотря на их ограниченную кадровую частоту. Выбор оборудования должен базироваться не только на номинальных технических характеристиках, но и на экспериментальной проверке реального поведения источника света в условиях съемки. Представленные методики и полученные результаты могут быть использованы для оптимизации 3D-сканирующих систем, а также в задачах метрологии, промышленного контроля и биомеханики, где критична точность и стабильность фазовых измерений.

### ***Благодарности***

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Сидоров А.И., Иванов П.С. Влияние нестабильности источников света на точность 3D-реконструкции методом структурированного освещения // Оптико-механическая промышленность. – 2022. – № 5. – С. 45–50.
2. Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques // Optics and Lasers in Engineering. – 2010. – Vol. 48. – P. 149–158.
3. Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial // Advances in Optics and Photonics. – 2011. – Vol. 3. – P. 128–160.
4. Salvi J., Fernandez S., Pribanic T., Llado X. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry // Pattern Recognition. – 2010. – Vol. 43(8). – P. 2666–2680.
5. Häusler G. A 3D sensor based on phase measuring triangulation // Optics and Lasers in Engineering. – 2001. – Vol. 36(2). – P. 103–124.

© С. В. Какаулин, И. К. Кабардин, 2025