

С. В. Какаулин^{1✉}, И. К. Кабардин¹

Оценка устойчивости регистрации изображений при вариации временного разрешения источников и приемников в методе фазовой триангуляции

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kakaulin_sergei@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается проблема устойчивости регистрации изображений при использовании метода фазовой триангуляции в условиях высокоскоростного 3D-сканирования. Основной акцент сделан на исследовании временных характеристик компонентов системы – проектора и видеокамеры и их влиянии на качество регистрации фазовых паттернов. Предложен экспериментальный подход к оценке фактической частоты обновления проектора с использованием фотоприемника и осциллографа, а также реализована съемка структурированного света с помощью высокоскоростной камеры при частоте до 540 кадров в секунду. Проведен анализ взаимной синхронизации устройств при работе проектора на частоте 120 Гц. Разработана методика подбора момента съемки, позволяющая исключить переходные состояния и обеспечивать захват стабильных изображений. Полученные результаты позволяют сократить время одного цикла 3D-сканирования методом фазовой триангуляции за счет надежной временной координации проекции и регистрации паттернов.

Ключевые слова: 3D-сканирование, фазовые паттерны, метод фазовой триангуляции

S. V. Kakaulin^{1✉}, I. K. Kabardin¹

Evaluation of the stability of image registration with variations in the time resolution of sources and receivers using the phase triangulation method

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: kakaulin_sergei@mail.ru

Abstract. The paper considers the problem of image registration stability when using the phase triangulation method in conditions of high-speed 3D scanning. The main focus is on the study of the time characteristics of the system components – the projector and the video camera and their impact on the quality of recording phase patterns. An experimental approach to estimating the actual refresh rate of a projector using a photodetector and an oscilloscope is proposed, and structured light is captured using a high-speed camera at up to 540 frames per second. An analysis of the mutual synchronization of devices during the operation of the projector at a frequency of 120 Hz is carried out. A technique has been developed for selecting the moment of shooting, which makes it possible to exclude transition states and ensure stable image capture. The results obtained make it possible to reduce the time of one cycle of 3D scanning by phase triangulation due to reliable temporal coordination of projection and registration of patterns.

Keywords: 3D scanning, phase patterns, 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) паттернов 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

Экспериментальная установка для исследования устойчивости регистрации изображений в методе фазовой триангуляции была собрана на базе высокоскоростной камеры и цифрового проектора. В качестве источника структурированного света использовался DLP-проектор, способный воспроизводить чередующиеся паттерны с частотой до 120 Гц. На проектор подавались как бинарные (черно-белые), так и градиентные фазовые изображения. Регистрация изображе-

ний осуществлялась монохромной камерой, работающей в режиме съемки с высокой частотой кадров – до 540 FPS, с отключенной автоэкспозицией, фиксированной экспозицией и усилением. Для оценки временных характеристик проекции дополнительно применялись фотоприемник и цифровой осциллограф, с помощью которых фиксировалась длительность развертки и фактическая частота обновления изображения на выходе проектора.

Съемка выполнялась на фоне матовой диффузной поверхности, находящейся в фокусе объектива камеры. В процессе экспериментов проектор и камера функционировали без аппаратной синхронизации, что позволяло моделировать реалистичные условия, при которых возможно возникновение временных рас-синхронизаций и переходных состояний. Запись производилась сериями по 200–500 кадров, что позволяло охватить несколько полных циклов чередования паттернов.

После съемки проводилась программная обработка данных: вычислялась средняя яркость каждого кадра, строился временной график изменения яркости, анализировалась его структура. С помощью алгоритмов поиска экстремумов на основе адаптивных порогов выделялись устойчивые плато яркости, соответствующие стабильному отображению черных и белых паттернов. Из каждого цикла автоматически выбирались по одному кадру для каждого состояния – с максимальной и минимальной яркостью. Эти кадры сохранялись в отдельную директорию, дополнительно визуализировались в виде гистограммы яркостей и помечались на общем графике.

В рамках серии экспериментов варьировались параметры как проекции (частота смены паттернов), так и съемки (экспозиция камеры, момент захвата кадра внутри цикла – *capture offset*). Это позволило выявить диапазоны, при которых достигается устойчивая регистрация изображений без искажений, связанных с переходными фазами проекции. Полученные данные легли в основу выбора оптимальных параметров системы для высокоскоростного 3D-сканирования методом 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.

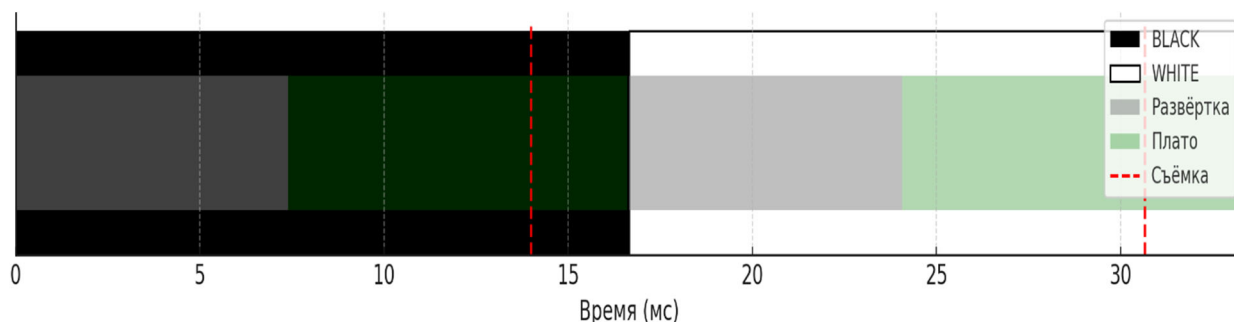


Рис 1. Временная диаграмма: смена паттернов при 30 Гц, offset 14 мс. Первый паттерн – черный (слева); второй – белый (справа); серый блок – развёртка (~7,4 мс); зеленый блок – стабильное плато (~9,2 мс); красная пунктирная линия – момент съёмки (capture_offset_ms = 14)

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 съёмка 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.

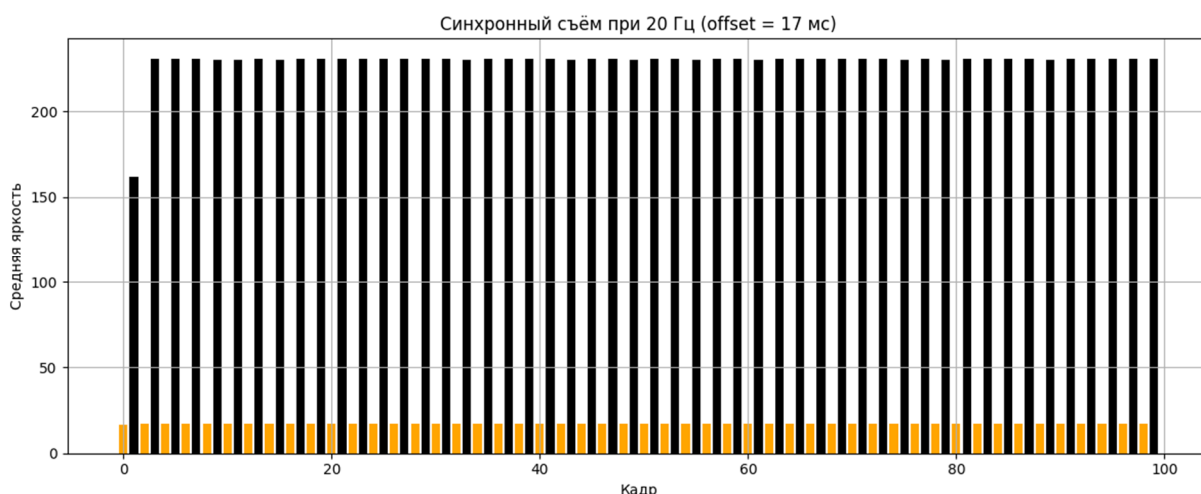


Рис. 2. График яркости с «capture offset» 17 мс. Регистрация белых (черные столбики) и черных (желтые столбики) паттернов.

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 была продемонстрирована возможность устойчивой регистрации фазовых паттернов при отсутствии аппаратной синхронизации между проектором и камерой за счет точного подбора временных параметров съемки. Установлено, что при частоте проекции 20 Гц удастся стабильно извлекать кадры, полностью соответствующие проецируемым паттернам, без искажений, вызванных переходными состояниями. Полученные результаты подтверждают применимость предложенного подхода для ускоренного 3D-сканирования методом фазовой триангуляции.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зуев В. О., Двойнишников С.В., Рахманов В.В. Измерение геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – Vol. 30. – Р.121–126.
2. Гнездилов И. М., Васильев Д.В., Разработка системы 3D-сканирования с использованием метода фазовой триангуляции // Известия вузов. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, № 10. – С. 837–843.
3. Шишкин А. Ю., Козлов С.В., Синхронизация источников и приемников в системах трехмерного сканирования методом проекционной фотограмметрии // Оптический журнал. – 2021. – Т. 88, № 2. – С. 72–78.

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