

СТЕРЕОСИСТЕМА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДИЯ

Мочалов А.В., Алтынов А.Е., Дрыга Д.О.

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»,
105064, Москва, Россия
e-mail: al.mochalov93@gmail.com

Цель работы заключается в разработке и экспериментальной проверке концепции двухкамерной стереосистемы с фиксированным базисом, предназначенной для оперативного 3D-документирования объектов археологического наследия фотограмметрическими методами. Предложена технологическая схема получения исходных данных, включающая синхронизацию двух видеопотоков по звуковому маркеру, извлечение одномоментных кадров и последующую обработку стереопар в цифровой фотограмметрической системе. Новизна подхода состоит в использовании конструктивно заданного базиса фотографирования как масштабной основы модели без обязательного применения наземной опорной сети. Рассмотрены вопросы выбора базиса, обеспечения перекрытия снимков, калибровки камер и оценки метрической точности. Экспериментальные результаты показали, что при съемке с частотой 60 кадр/с среднеквадратическая ошибка контрольных измерений составила 5.97 мм, а при 120 кадр/с снизилась до 2.01 мм, что подтверждает применимость системы для полевого археологического документирования.

Ключевые слова: стереосистема, наземная фотограмметрия, фиксированный базис, трехмерное моделирование, объекты археологического наследия, мультикамерная съемка, многоакурсное стерео.

STEREO SYSTEM FOR CREATING THREE-DIMENSIONAL MODELS TO DOCUMENT ARCHAEOLOGICAL HERITAGE OBJECTS

Mochalov A.V., Altynov A.Y., Dryga D.O.

Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

The study develops and experimentally evaluates a two-camera stereo system with a fixed baseline for rapid three-dimensional documentation of archaeological heritage objects. The proposed workflow combines sound-based synchronization of two video streams, extraction of simultaneous frames, and subsequent photogrammetric processing of stereo pairs. The main methodological feature is the use of the calibrated imaging baseline as the scale constraint for the photogrammetric model, which reduces dependence on ground control points or additional scale bars during field recording. The paper describes the selection of the working distance range, calculation of the baseline, overlap control, camera calibration, and accuracy assessment procedure. Experimental tests on a marked target showed that the root-mean-square error of control distance measurements was 5.97 mm at 60 fps and 2.01 mm at 120 fps. These results confirm the potential of the system for reproducible metric documentation in archaeological fieldwork.

Keywords: stereo system, terrestrial photogrammetry, fixed baseline, three-dimensional modeling, archaeological heritage objects, multi-camera imaging, multi-view stereo.

1. Введение

Наиболее массовыми разработками в области стереокамер в настоящее время являются решения, ориентированные на задачи компьютерного зрения и робототехники, такие как ZED 2i Stereo Camera [15] и Basler Stereo Cameras [7]. Эти системы используют две камеры, установленные на фиксированном базисе, и предназначены для определения пространственного положения объектов и навигации роботизированных систем.

Вместе с тем системы, функционирующие по аналогичному принципу, находят применение и в задачах построения измеримых трёхмерных моделей объектов. Такие решения представляют практический интерес, поскольку позволяют получать пространственные данные фотограмметрическими методами с использованием сравнительно доступного оборудования. Примерами являются системы, разработанные для мониторинга опасных объектов, в основе которых лежат конструкции из двух камер,

выполняющих одновременную съёмку объекта. За счёт фиксированного базиса фотографирования такие системы обеспечивают получение стереопар с известной геометрией и позволяют строить измеримые трёхмерные модели [10,13].

В российской практике также разработаны системы подобного типа. К ним относится ПАК АБИ «Каштан» [4], предназначенный для измерения объёма лесоматериалов, а также системы IntroVision [5], применяемые для сканирования и получения трёхмерных моделей. Эти примеры показывают, что подход, основанный на использовании стереосистем с фиксированным базисом, востребован не только в задачах машинного зрения, но и в прикладных инженерных технологиях.

В области полевых археологических работ подобные стереофотосистемы также представляют значительный интерес. Их применение особенно актуально при документировании объектов археологического наследия, для которых требуется

оперативная, воспроизводимая и метрически достоверная пространственная фиксация. В отличие от многих других объектов съёмки, археологический раскоп в процессе исследования последовательно изменяется и частично разрушается, поэтому возможность быстрого получения точной трёхмерной цифровой модели приобретает особую ценность. Использование стереосистем с фиксированным базисом позволяет уменьшить зависимость результата от опыта оператора, обеспечить наличие необходимого перекрытия в каждой паре изображений и повысить воспроизводимость геометрии съёмки.

Особенно проявляются преимущества таких систем при выполнении подводных археологических работ, где затруднены внешнее ориентирование, масштабирование и, как следствие, определение координат объекта. В этих условиях фиксированный базис стереосистемы может выступать как средство повышения устойчивости геометрии съёмки и получения высокоточных трёхмерных моделей даже при ограниченных возможностях координатной привязки снимков. Примерами подобных решений являются CRAB (Calibrated Rig for Aquatic photogrammetric Bicamera system) [14] и стереосистемы для подводной съёмки [12]. Все перечисленные решения основаны на принципах ближней стереофотограмметрии [1] и ориентированы на получение высокоточных трёхмерных моделей объектов съёмки. Внедрение таких стереосистем в практику археологических исследований может упростить и повысить качество процесса полевого документирования, снизить влияние человеческого фактора и обеспечить получение стереопар с заранее заданным и устойчивым перекрытием, достаточным для последующего фотограмметрического построения высокоточной трёхмерной модели.

Дополнительные перспективы для развития данного подхода связаны с использованием видеоданных. В полевой археологии стереовидеосъёмка представляет интерес как способ получения большого количества кадров, обладающих взаимным перекрытием. По сравнению с традиционной покадровой фотосъёмкой видеозапись позволяет ускорить документирование объекта, обеспечить избыточность наблюдений и упростить работу оператора в условиях ограниченного времени. Кроме того, извлечение кадров из видеоданных в лабораторных условиях даёт возможность отобрать наиболее удачные и информативные изображения, а при использовании двух синхронизированных фотокамер – сформировать последовательность стереопар для дальнейшей фотограмметрической обработки. Это особенно важно в археологии, где требуется быстро фиксировать изменяющееся состояние раскопа на разных этапах работ.

Анализ научной литературы и практики применения стереофотограмметрических методов

[1,12,13,14] показывает, что стереосистемы с фиксированным базисом могут быть очень востребованы при проведении полевых археологических исследований. Их использование в сочетании с видеосъёмкой открывает дополнительные возможности для более оперативного, воспроизводимого и технологически стандартизированного получения высокоточных трёхмерных моделей объектов археологического наследия.

2. Материалы и методы

2.1. Стереосистема

Концепция стереосистемы формировалась исходя из ключевых требований к её конструкции и режиму функционирования. К числу таких требований относились простота конструктивного исполнения и сборки, удобство эксплуатации в полевых условиях, обеспечение высокого качества видеоматериалов, возможность последующего построения трёхмерных моделей ОАН, а также возможность получения синхронных видео, для последующего извлечения стереопар.

В качестве цифровых фотокамер (ЦФК) для опытного образца предлагаемой стереосистемы были выбраны камеры GoPro Hero 11 Black (рис. 1), так как они имеют малые габариты и массу, ориентирована на видеосъёмку и позволяет выполнять запись с частотой до 120 кадр/с. Данная ЦФК обладает следующими характеристиками: фокусное расстояние объективов f_k – 2.71 мм, размер матрицы – 5568×4872 пикс., физический размер пикселя – 1.056мкм.



Рис. 1. ЦФК GoPro HERO11 Black

Так как конструкция является стереосистемой, то основной ее геометрической характеристикой является базис фотографирования, так как он оказывает непосредственное влияние на точность измерений по стереопаре изображений. Поэтому первоначально были определены требования к точности выполнения измерений объекта археологического наследия. Данное требование формируется из двух условий: пространственное разрешение – влияет на возможность дешифрирования элементов ОАН, а также геометрическая точность модели, характеризующаяся точностью выполнения измерений.

Согласно документам, регламентирующим проведение археологических работ [3,6], основным

рабочим масштабом составления документации по объектам археологического наследия является 1:50. В этом масштабе чертёж должен обеспечивать отображение элементов размером не менее 0.2 мм при точности измерений не хуже 0.3 мм, что в натуральных величинах соответствует объектам размером 10×10 мм и более и допустимой погрешности измерений по модели не более 15 мм.

Основной характеристикой, влияющей на то, какие объекты будут отображены на изображении является пространственное разрешение, которое зависит от характеристик ЦФК, а также расстояния фотографирования. Исходя из критериев Джонсона [11] следует, что для уверенной идентификации объекта необходимо, чтобы его характерная деталь была представлена не менее чем 10 пикселями изображения. Следовательно, необходимое пространственное разрешение съёмки должно составлять 1 мм/пикс для отображения объектов 10 на 10 мм и крупнее. Данное требование позволило определить рабочий диапазон расстояний фотографирования, при котором ближнее расстояние фотографирования равнялось минимальной дистанции фокусировки камеры, а дальнее расстояние — расстояние, с которого пространственное разрешение не превышает 1 мм. Исходя из технических характеристик камеры минимальная дистанция фокусировки является 0.5 м, а пространственное разрешение в 1 мм достигается с расстояния 2.5 м, определенного по формуле 1. Таким образом рабочий диапазон стереосистемы составил от 0.5 м до 2.5 м.

$$D = \frac{GSD \times f}{pxl} = \frac{1 \times 2,71}{0,00106} = 2556 \text{ мм} = 2,5 \text{ м} \quad (1)$$

После определения рабочего диапазона стереосистемы был рассчитан минимальный базис фотографирования для максимального расстояния фотографирования, обеспечивающий измерения по изображениям, с точностью 15 мм. В расчете использовалась формула для нормального случая съёмки, так как у предлагаемой стереосистемы связки проектирующих лучей параллельны, а главные оптические оси двух камер перпендикулярны (нормальны) относительно базиса фотографирования. Вычисленный по формуле 2 базис фотографирования составил 85 мм.

$$B = \frac{D^2 \times m_p}{m_z \times f} = \frac{2556^2 \times 0,000528}{15 \times 2.71} = 85 \text{ мм} \quad (2)$$

Также при расчете базиса фотографирования необходимо учитывать фактические перекрытия, так как обработка материалов планируется с использованием ЦФС, использующих в своей работе методы обработки SfM (Structure from Motion) и MVS (Multi-View Stereo). Поэтому в процессе съёмки необходимо учитывать требования разработчиков ЦФС, которые рекомендуют использовать перекрытие снимков не менее 80% [9]. Поэтому был выполнен расчет базиса фотографирования, при котором сохраняется перекрытие 80% для минимального расстояния фотографирования по формуле 3.

$$B = 2D_{min} \tan\left(\frac{FOV_x}{2}\right) \times \left(1 - \frac{P_x}{100}\right) = 2 \times 50 \times \tan\left(\frac{102}{2}\right) \times \left(1 - \frac{80}{100}\right) = 250 \text{ мм} \quad (3)$$

Вычисленный базис составил 250 мм, что превышает значение минимального базиса фотографирования (84 мм), определенного ранее. Также были выполнены расчеты влияния вновь определенного базиса фотографирования на погрешность определения глубины по стереопаре снимков для разных расстояний (с шагом 0.5 м) фотографирования по формуле 4, значения приведены в таблице 1.

$$m_z = \frac{D^2}{f_{pix} \times B} \times m_p \quad (4)$$

Как показывают расчёты, приведённые в таблице 1, при базисе фотографирования 250 мм на максимальном расстоянии съёмки достигается точность измерений 5.5 мм, что существенно превышает требования к допустимой погрешности, установленной на уровне 15 мм. При этом на расстоянии 2.5 м расчётное перекрытие изображений составляет 96%, то есть превышает принятое минимальное значение 80%. Вместе с тем при условии, что точность определения глубины по стереопаре предварительно оценена и удовлетворяет предъявляемым требованиям, столь высокое перекрытие следует рассматривать как допустимое, поскольку оно может положительно влиять на устойчивость

Таблица 1

Перекрытие снимков и погрешность определения глубины в зависимости от расстояния до объекта

FOV, °	D, мм	P, %	m _z , мм
102	0.5	80	0.22
	1.0	90	0.89
	1.5	93	2.00
	2.0	95	3.55
	2.5	96	5.54

сопоставления изображений и работу алгоритмов SfM/MVS [8].

В качестве основного способа синхронизации был выбран метод звуковых маркеров, поскольку он не требует внесения конструктивных изменений в систему и может быть реализован в штатных условиях съёмки. Подобный подход давно применяется в кинематографической практике, где для синхронизации аудио- и видеоматериалов используется хлопушка – нумератор [2], а сама синхронизация выполняется уже в камеральных условиях.

В результате был изготовлен опытный образец стереосистемы (рис. 2), в котором камеры жёстко фиксировались на алюминиевой штанге на расстоянии, соответствующем расчётному базису фотографирования. Для повышения удобства работы с системой конструкцией предусматривалась ручка, обеспечивавшая более устойчивое удержание и перемещение устройства в процессе съёмки. Принятая схема сборки позволяла сохранить постоянство взаимного положения камер и, следовательно, обеспечить стабильность геометрических параметров стереосистемы.

После сборки опытного образца выполнялась калибровка стереосистемы с использованием пространственного тест-объекта. В процессе калибровки были уточнены элементы внутреннего ориентирования каждой камеры, а также определено фактическое значение базиса фотографирования.



Рис. 2. Опытный образец стереосистемы в собранном виде

2.2. Алгоритм обработки видеопотока

Ключевой задачей при обработке видеоматериалов, полученных с помощью стереосистемы с фиксированным базисом, является обеспечение временной синхронизации записей с двух камер и последующее извлечение синхронных стереопар.

Однако реализация данного метода применительно к цифровому видеопотоку связана с рядом особенностей. Видео представляет собой не последовательность независимых изображений, а структуру, организованную в группы кадров (GOP), включающую ключевые кадры и предсказанные кадры. Вследствие этого временное положение отдельных изображений в потоке и возможность их точного

попарного сопоставления требуют дополнительного анализа. Иными словами, задача сводится не только к определению момента синхронизации двух видеозаписей, но и к корректному извлечению одномоментных кадров, пригодных для формирования стереопар. Структура одной секунды видеозаписи, полученной с камеры GoPro Hero 11 при частоте 120 кадр/с, приведена на рисунке 3.



Рис. 3. «Структура» секунды видео с камеры GoPro Hero 11

Для реализации процедуры синхронизации был разработан скрипт с использованием инструментов FFmpeg. Алгоритм обработки включал несколько последовательных этапов. На первом этапе в аудиодорожках левого и правого видеопотоков автоматически определялся звуковой маркер – хлопок, использовавшийся в качестве опорного события синхронизации. Момент звукового маркера определялся как положение максимума модуля аудиосигнала в заданном окне поиска:

$$n^* = \arg \max n \in [n_1, n_2] | x[n] |, \quad (5)$$

где $x[n]$ – дискретный аудиосигнал, $[n_1, n_2]$ – границы окна поиска, n^* – номер отсчёта, соответствующий моменту хлопка. Временная координата звукового маркера вычислялась по формуле:

$$t_{\text{хлоп}} = \frac{n^*}{f_s}, \quad (6)$$

где f_s – частота дискретизации аудиосигнала.

После определения момента хлопка для каждого видеопотока выполнялась обрезка записи таким образом, чтобы началом обоих видео соответствовал момент появления звукового маркера (рис. 4).

После выполнения временной синхронизации видеозаписей осуществлялось извлечение кадров, соответствующих левой и правой камерам, с формированием одномоментных стереопар. Данный этап является критически важным, поскольку временное рассогласование между извлекаемыми кадрами приводит к отклонению фактических геометрических условий съёмки от условий предварительной калибровки стереосистемы, при которых были определены взаимное положение камер и базис фотографирования. Для автоматизации этой процедуры был разработан скрипт, выполняющий выборку каждого N-го кадра из двух синхронизиро-

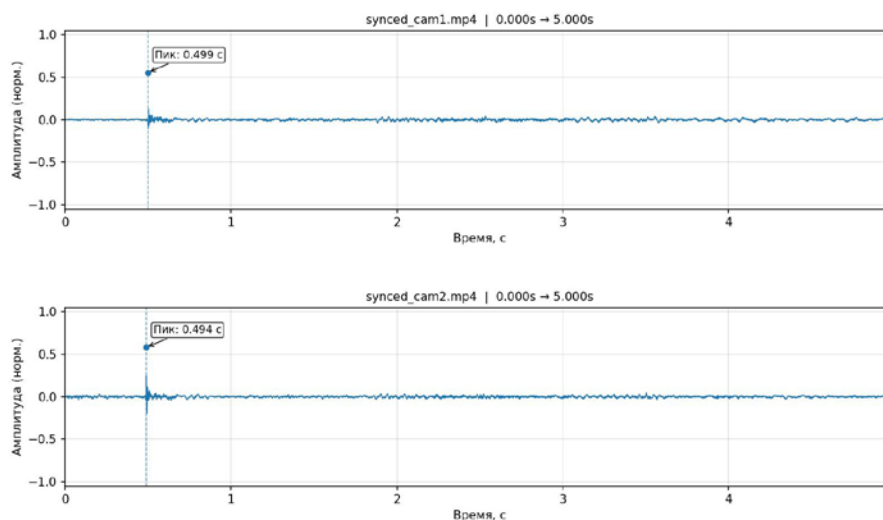


Рис. 4. Осциллограммы звукового сигнала после синхронизации видеопотоков (вверху – левая камера, внизу – правая камера)

ванных видеопотоков, начиная с момента звукового маркера. На вход программе подавались два видео-файла, соответствующие левой и правой камерам, шаг извлечения кадров N , а также параметры выходного формата изображений. Выборка кадров реализовывалась средствами FFmpeg с сохранением результатов в отдельные директории для каждой камеры и с согласованной сквозной нумерацией файлов, что обеспечивало однозначное соответствие левых и правых изображений в каждой стереопаре. Для последующей фотограмметрической обработки предпочтительным являлось сохранение кадров в формате PNG, поскольку используемое в нём сжатие без потерь не приводит к ухудшению изобразительных характеристик исходных данных.

2.3. Технология фотограмметрической обработки

Фотограмметрическая обработка данных, полученных с использованием стереосистемы с фиксированным базисом, может быть реализована в современных цифровых фотограмметрических системах, таких как Agisoft Metashape и аналогах, использующих алгоритмы SfM и MVS.

Технологическая схема включает подготовку проекта, импорт параметров калибровки камер, фототриангуляцию, масштабирование модели, уточнение параметров ориентирования, построение плотного облака точек, формирование полигональной модели и её текстурирование. Для изображений, извлечённых из видеопотока, обязательным условием является предварительный импорт параметров внутреннего ориентирования, так как такие кадры, как правило, не содержат полного набора метаданных, включающих элементы внутреннего ориентирования камеры.

Ключевой особенностью предлагаемой схемы является использование известного базиса фотографирования. В отличие от классического подхода, где масштаб задаётся по наземным опорным точкам или

масштабным линейкам на объекте, в данном случае масштаб может определяться через известное расстояние между центрами проекций левой и правой камер. В случае использования стереосистемы базис фотографирования является конструктивным элементом, определённым с высокой точностью, и может использоваться в процессе уравнивания, что позволяет определить масштаб трёхмерной модели без обязательного применения внешней геодезической привязки (рис. 5).

2.4. Методология оценки точности работы стереосистемы

Оценка точности работы стереосистемы определялась в рамках двух экспериментальных схем, различающихся способом фотограмметрической обработки, но основанных на единой тестовой базе. В качестве объекта контроля использовалась плоская тестовая мишень с нанесёнными 12-битными маркерами, обеспечивающими автоматическое и однозначное распознавание опорных точек на изображениях. Координаты маркеров в системе тест-объекта предварительно определялись электронным тахеометром, что позволяло рассматривать их как метрически достоверную основу для последующих расчётов. Видеосъёмка выполнялась в режимах 60 и 120 кадр/с, что обеспечивало возможность сопоставления влияния временной дискретизации видеопотока на корректность формирования стереопар. Перемещение стереосистемы относительно плоскости тест-объекта осуществлялось со скоростью порядка 0.5 м/с, соответствующей медленному темпу движения человека, при этом в процессе съёмки дополнительно задавались контролируемые изменения ориентации системы, имитирующие характерные наклоны камер при ручной полевой съёмке.

Для проверки корректности формирования синхронных стереопар из видеозаписей извлекались кадры, по которым выполнялся процесс фототриангуляции. По известным координатам маркеров

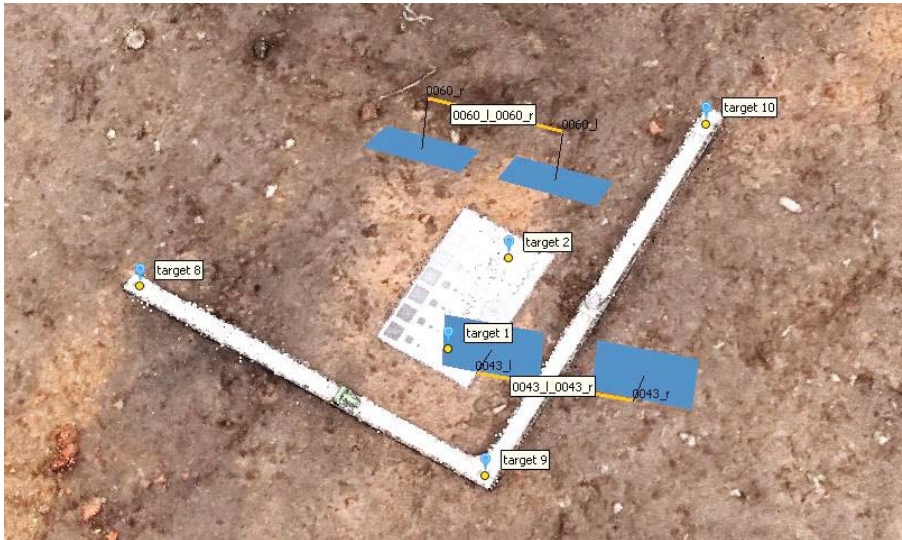


Рис. 5. Визуализация фрагмента уравненного блока фототриангуляции с заданными базами фотографирования для стереопар

тест-объекта определялись элементы внешнего ориентирования каждого снимка (рис. 6). На их основе вычислялись фактические значения базиса фотографирования для всех сформированных стереопар, а также среднеквадратические ошибки его определения. Поскольку базис фотографирования является конструктивно фиксированным параметром стереосистемы, отклонение восстановленного базиса от его номинального значения рассматривалось как интегральный показатель, характеризующий совместное влияние алгоритма синхронизации, режима частоты кадров и особенностей движения съёмочной системы на точность извлечения кадров. Для каждого режима формировался сопоставимый набор стереопар, что обеспечивало корректность сравнительного анализа.

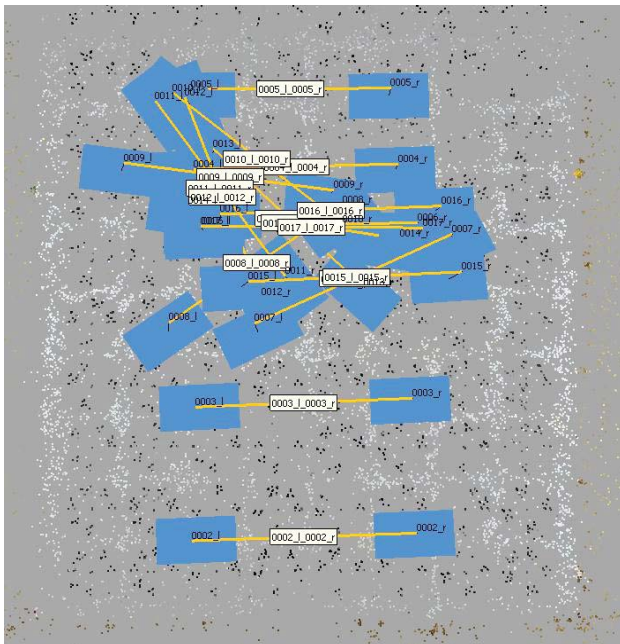


Рис. 6. Положение снимков после уравнивания блока и определения фактического базиса фотографирования

Оценка точности измерений, выполняемых по результатам съёмки с использованием стереосистемы, определялась в отдельном эксперименте, проведённом в сопоставимых условиях освещения, траектории и скорости съёмки. Принципиальное отличие состояло в том, что при уравнивании блока фототриангуляции масштаб модели задавался по известному значению базиса фотографирования. Тем самым проверялась возможность получения метрически корректной модели за счёт использования конструктивного параметра съёмочной системы как единственной масштабной меры. После масштабирования блока фототриангуляции на тест-объекте выбирались контрольные промеры между маркированными точками (рис. 7), эталонные значения которых вычислялись по их известным координатам

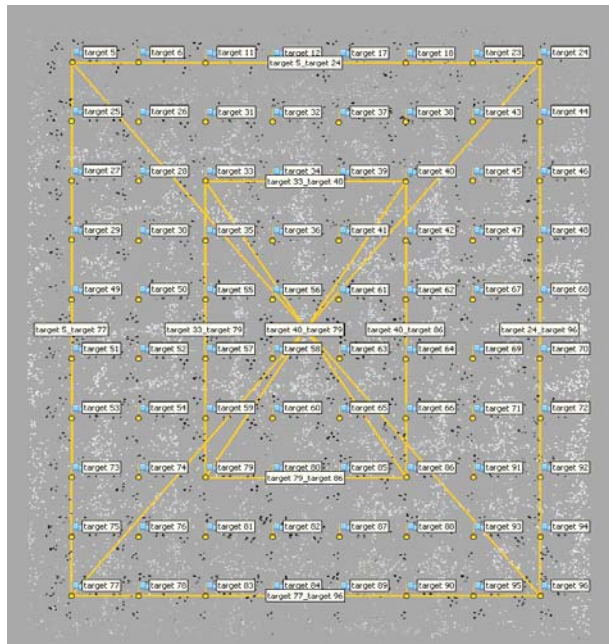


Рис. 7. Схема расположения контрольных промеров на тест-объекте

в системе тест-объекта. Соответствующие расстояния затем определялись по результатам уравнивания и сопоставлялись с эталонными значениями. В качестве количественных характеристик принимались среднеквадратические ошибки линейных измерений, а также относительная ошибка измерений.

Такая схема позволяет установить, с одной стороны, насколько корректно сохраняется базис фотографирования при формировании стереопар, а с другой – в какой степени построенная по нему модель пригодна для выполнения метрически достоверных измерений.

3. Результаты и обсуждение

По результатам экспериментальной оценки точности работы стереосистемы установлено, что при съёмке с частотой 60 кадр/с среднеквадратическая ошибка определения контрольных расстояний составила 5.97 мм, что соответствует относительной точности порядка 1/150. При увеличении частоты съёмки до 120 кадр/с среднеквадратическая ошибка снизилась до 2.01 мм, а относительная точность возросла до порядка 1/450. Полученные данные показывают, что увеличение частоты кадров положительно влияет на метрические характеристики модели за счёт более стабильного формирования одномоментных стереопар при движении съёмочной системы.

На основании экспериментальных данных и принятого критерия практической применимости, предусматривающего обеспечение измерений по модели с погрешностью не более 15 мм, выполнена оценка области применения системы. Установлено, что при частоте 30 кадр/с требуемая точность может быть обеспечена при работе с объектами площадью порядка 2.5×2.5 м, тогда как при частоте 120 кадр/с область применимости расширяется до объектов порядка 7×7 м при сохранении того же уровня точности. Это позволяет рассматривать частоту кадров

как один из ключевых факторов, определяющих как точность измерений, так и допустимый масштаб документируемого объекта.

Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенной концепции стереосистемы с фиксированным базисом как средства создания трёхмерных моделей для документирования ОАН без обязательного использования наземной опорной сети. Вместе с тем полученные зависимости были установлены в контролируемых условиях эксперимента на плоском тест-объекте, поэтому дальнейшие исследования целесообразно связать с апробацией системы на реальных объектах археологической съёмки. Такая проверка позволит уточнить границы применимости метода в полевых условиях и оценить устойчивость технологии при съёмке объектов со сложной пространственной структурой.

Выводы

Предложенная стереосистема с фиксированным базисом может рассматриваться как перспективное средство создания измеримых трёхмерных моделей объектов археологического наследия фотограмметрическим методом. Принципиальная возможность использования базиса фотографирования в качестве масштабной основы подтверждает применимость такого подхода для упрощения полевой фиксации и снижения зависимости результата от дополнительных привязочных измерений.

Подобная стереосистема может расширить доступность метрически корректного 3D-документирования в археологии, особенно в условиях ограниченного времени полевых работ и недостаточной подготовки операторов в области фотограмметрии. Возможным следствием её применения может стать упрощение передачи исходных данных между исследовательскими группами и повышение воспроизводимости результатов камеральной обработки.

Список литературы

1. Ближняя фотограмметрия и 3D-зрение / Т. Луманн, С. Робсон, С. Кайл, Я. Бом; пер. с англ. Москва: URSS: ЛЕНАНД. 2018. 704 с.
2. Как использовать кинохлопушку? 25 правил [Электронный ресурс] // КиноСклад. 26.03.2021. URL: <https://kinosklad.ru/blog/kak-ispolzovat-kinohlopushku-25-pravil/> (дата обращения: 14.04.2026).
3. Положение о порядке проведения археологических полевых работ и составления научной отчётной документации [Электронный ресурс] // Институт археологии Российской академии наук. 2023. URL: https://archaeolog.ru/media/OPI/Polozhenie_2023_25012024.pdf (дата обращения: 18.02.2026).
4. Программно-аппаратный комплекс измерения объёмов круглых лесоматериалов «Каштан» [Электронный ресурс] // Анализатор.ру. URL: <https://www.analizator.ru/production/photogrammetry/kashtan/> (дата обращения: 10.03.2026).
5. Системы технического зрения, системы искусственного интеллекта и промышленная автоматизация [Электронный ресурс] // In Vitro Vision. URL: <https://invitrovision.ru/> (дата обращения: 15.03.2026).
6. Andrews D., Bedford J., Bryan P. Metric Survey Specifications for Cultural Heritage. 3rd ed. Swindon: Historic England. 2015. ISBN 978-1-84802-296-6.
7. Basler Stereo Camera [Электронный ресурс] // Basler. URL: <https://www.baslerweb.com/en/cameras/basler-stereo-camera/> (дата обращения: 10.03.2026).
8. Frey J., Kovach K., Stemmler S., Koch B. UAV Photogrammetry of Forests as a Vulnerable Process. A Sensitivity Analysis for a Structure from Motion RGB-Image Pipeline. Remote Sensing. 2018. Vol. 10. No. 6. Art. 912. DOI: 10.3390/rs10060912.
9. General image capture tips [Электронный ресурс] // Agisoft Helpdesk Portal. 2022. URL: <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000149337-general-image-capture-tips> (дата обращения: 09.05.2026).
10. Guccione D.E., Giacomini A., Thoeni K., Bahootoroddy F., Roncella R. A low-cost terrestrial stereo-pair photogrammetric monitoring system for highly hazardous areas. SSIM 2023: Third International Slope Stability in Mining Conference. ed. by P.M. Dight. Perth: Australian Centre for Geomechanics. 2023. Pp. 803-816. DOI: 10.36487/ACG_repo/2335_56.

11. Johnson's criteria [Электронный ресурс] // Wikipedia: The Free Encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Johnson%27s_criteria (дата обращения: 05.05.2026).
12. Mapping Pavlopetri: Robotic Underwater Archeology [Электронный ресурс] // DROP Lab. URL: <https://droplab.ri.cmu.edu/arch> (дата обращения: 27.04.2026).
13. Roncella R., Forlani G., Fornari M., Diotri F. Landslide monitoring by fixed-base terrestrial stereo-photogrammetry. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. Vol. II-5. Pp. 297-304. DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-297-2014.
14. Tanduo B., Borgogno E., Chiabrando F., Gallitto F., Manca S., Maschio P., Lingua A. Underwater Heritage documentation using photogrammetry: the CRAB system. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2025. Vol. XLVIII-2/W10-2025. P. 295–302. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W10-2025-295-2025.
15. ZED 2i [Электронный ресурс] // Stereolabs. URL: <https://www.stereolabs.com/en-br/store/products/zed-2i> (дата обращения: 10.03.2026).

References

1. Lumann T., Robson S., Kyle S., Boehm J. *Blizhnyaya fotogrammetriya i 3D-zreniye* [Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging]. Moscow: URSS, LENAND. 2018. 704 p.
2. *Kak ispol'zovat' kinokhlopushku? 25 pravil* [How to Use a Film Clapperboard? 25 Rules]. KinoSklad. 26.03.2021. URL: <https://kinosklad.ru/blog/kak-ispolzovat-kinokhlopushku-25-pravil/> (accessed: 14.04.2026).
3. *Polozheniye o poryadke provedeniya arkhologicheskikh polevykh rabot i sostavleniya nauchnoy otchetnoy dokumentatsii* [Regulations on Archaeological Fieldwork and Scientific Reporting Documentation]. Institute of Archaeology of the Russian Academy of Sciences. 2023. URL: https://archaeolog.ru/media/OPI/Polozhenie_2023_25012024.pdf (accessed: 18.02.2026).
4. Hardware and Software System for Measuring Round Timber Volume «Kashtan». Analizator.ru. URL: <https://www.analizator.ru/production/photogrammetry/kashtan/> (accessed: 10.03.2026).
5. Machine Vision Systems, Artificial Intelligence Systems and Industrial Automation. In Vitro Vision. URL: <https://invitrovision.ru/> (accessed: 15.03.2026).
6. Andrews D., Bedford J., Bryan P. Metric Survey Specifications for Cultural Heritage. 3rd ed. Swindon: Historic England. 2015. ISBN 978-1-84802-296-6.
7. Basler Stereo Camera. Basler. URL: <https://www.baslerweb.com/en/cameras/basler-stereo-camera/> (accessed: 10.03.2026).
8. Frey J., Kovach K., Stemmler S., Koch B. UAV Photogrammetry of Forests as a Vulnerable Process. A Sensitivity Analysis for a Structure from Motion RGB-Image Pipeline. Remote Sensing. 2018. Vol. 10. No. 6. Art. 912. DOI: 10.3390/rs10060912.
9. General image capture tips. Agisoft Helpdesk Portal. 2022. URL: <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000149337-general-image-capture-tips> (accessed: 09.05.2026).
10. Guccione D.E., Giacomini A., Thoeni K., Bahootoroody F., Roncella R. A low-cost terrestrial stereo-pair photogrammetric monitoring system for highly hazardous areas. SSIM 2023: Third International Slope Stability in Mining Conference. ed. by P.M. Dight. Perth: Australian Centre for Geomechanics. 2023. Pp. 803-816. DOI: 10.36487/ACG_repo/2335_56.
11. Johnson's criteria. Wikipedia: The Free Encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Johnson%27s_criteria (accessed: 05.05.2026).
12. Mapping Pavlopetri: Robotic Underwater Archeology. DROP Lab. URL: <https://droplab.ri.cmu.edu/arch> (accessed: 27.04.2026).
13. Roncella R., Forlani G., Fornari M., Diotri F. Landslide monitoring by fixed-base terrestrial stereo-photogrammetry. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. Vol. II-5. Pp. 297-304. DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-297-2014.
14. Tanduo B., Borgogno E., Chiabrando F., Gallitto F., Manca S., Maschio P., Lingua A. Underwater Heritage documentation using photogrammetry: the CRAB system. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2025. Vol. XLVIII-2/W10-2025. P. 295–302. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W10-2025-295-2025.
15. ZED 2i. Stereolabs. URL: <https://www.stereolabs.com/en-br/store/products/zed-2i> (accessed: 10.03.2026).

Сведения об авторах Принадлежность к организации

Мочалов Александр Валерьевич

старший преподаватель кафедры аэрокосмических съемок, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», 105064, Москва, Россия

Алтынов Александр Ефимович

кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических съемок, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», 105064, Москва, Россия

Дрыга Данила Олегович

кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических съемок, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», 105064, Москва, Россия

Information about authors Affiliations

Mochalov Aleksandr Valeryevich

Senior Lecturer, Department of Aerospace Surveying, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Altynov Aleksandr Yefimovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Aerospace Surveying, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Dryga Danila Olegovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Aerospace Surveying, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 22.05.2026 г.