



1943

South Ural
State University

National Research
University

РАЗРАБОТКА И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОТОЧНОЙ CLOSE-RANGE ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

СЕМЕН АЛЕКСАНДРОВИЧ **ТУШЕВ**
АСПИРАНТ КАФ. ИТЭ НИУ ЮУРГУ

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:
БОРИС МАКСОВИЧ **СУХОВИЛОВ**
Д.Т.Н., С.Н.С., ЗАВ. КАФ. ИТЭ НИУ ЮУРГУ

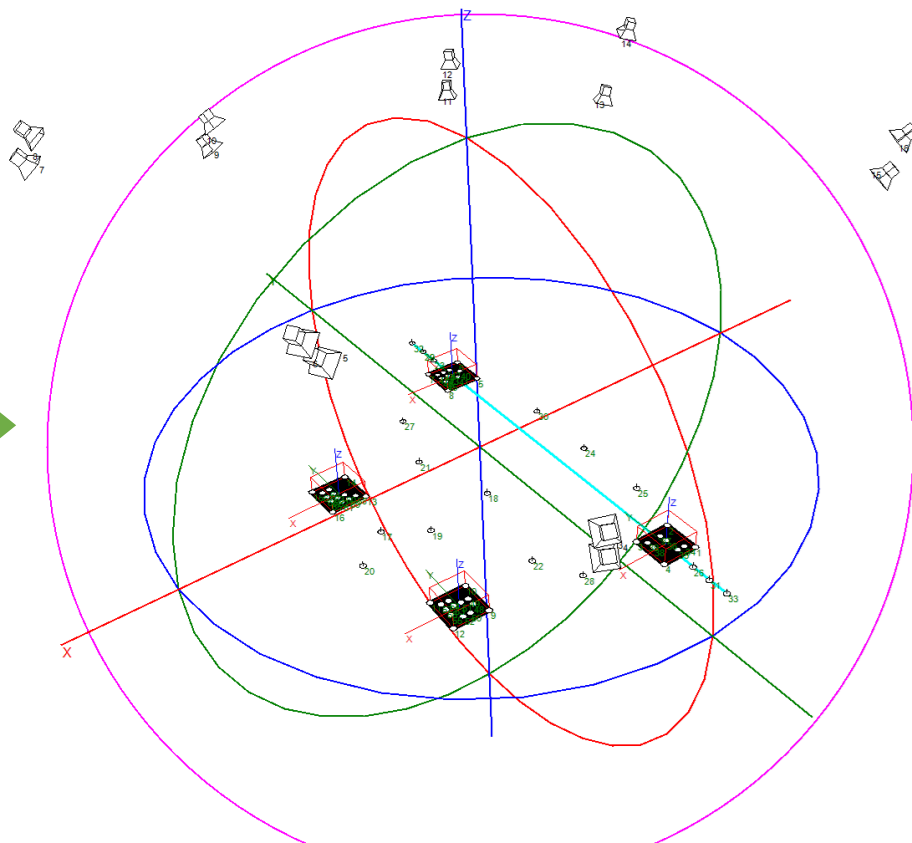
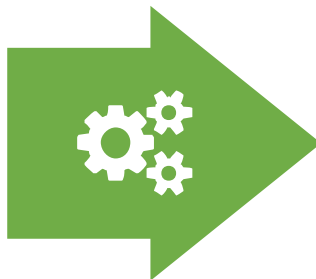
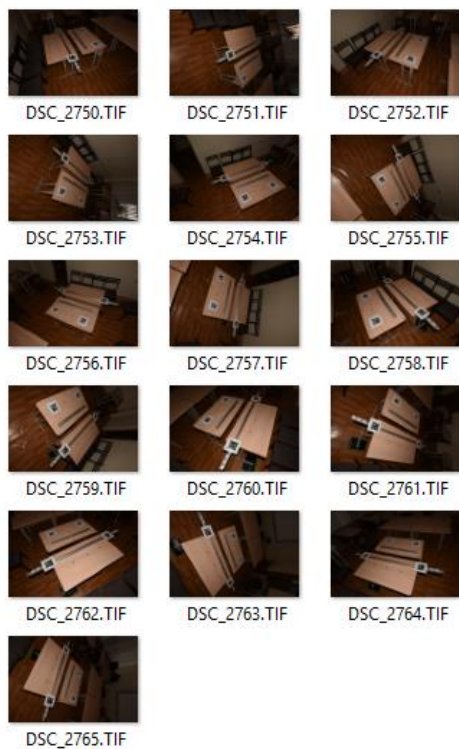


СОВРЕМЕННАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ

англ. Photogrammetry – дисциплина об определении координат, размеров, положения и других характеристик объектов по их фотоизображениям

ЗАДАЧА:

получить трехмерную модель объекта на основе его фотографий



ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОГРАММЕТРИИ



Авиакосмос



Машиностроение



Строительство



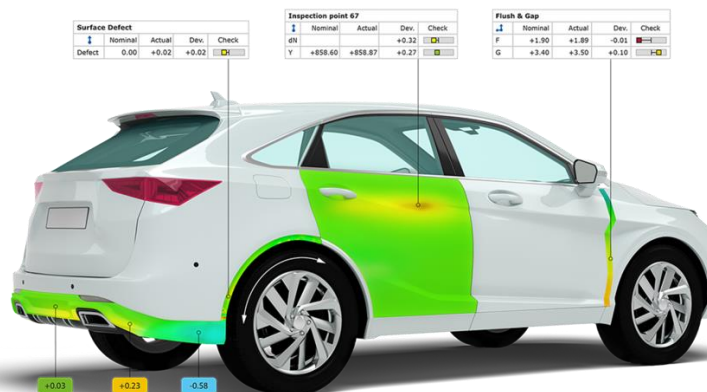
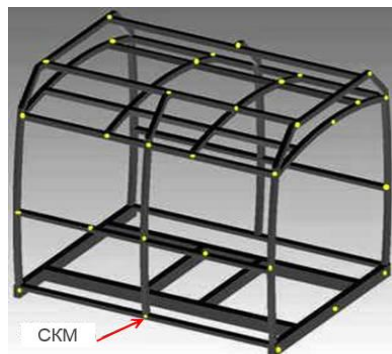
Криминалистика



Археология



Анализ ДТП



Основные решаемые задачи:

- Определение трехмерных координат контрольных точек $\Rightarrow$
- Измерение расстояний между контрольными точками
- Определение отклонений произведенного объекта от чертежа
- Анализ и контроль деформаций
- Анализ формы поверхности, взаимного расположения объектов
- Контроль вертикалей, горизонталей

Сторонние источники изображений: © GOM GmbH

КЛАССИФИКАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

По типу особенностей снимка:

- ☐ Маркерные (marker-based)
- ☐ Безмаркерные (markerless)
- ☐ Комбинированные

Требования к фотооборудованию:

- ☐ Требующие специального оборудования
- ☐ Работающие с consumer-level камерами

С точки зрения формируемых облаков точек:

- ☐ Разреженные облака точек (Sparse cloud)
- ☐ Полуплотные облака точек
- ☐ Плотные облака точек (Dense cloud)

С точки зрения обрабатываемых сцен:

- ☐ Близкорасположенные (close-range)
- ☐ Классическая аэрофотосъемка (aerial)
- ☐ Низковысотная аэрофотосъемка (UAV, kit, pole)
- ☐ Специального назначения (dental, jewelry, ...)

СУЩЕСТВУЮЩИЕ РЕШЕНИЯ / ПРОДУКТЫ



V-STARS (Geodetic systems, Inc.)

Высокоточная промышленная фотограмметрия
Close-range, световозвращающие маркеры
Программно-аппаратный комплекс



TRITOP (GOM mbH)

Высокоточная промышленная фотограмметрия
Close-range, световозвращающие маркеры
Программно-аппаратный комплекс



Agisoft Metashape (PhotoScan) (ООО "ЖивойСофт")

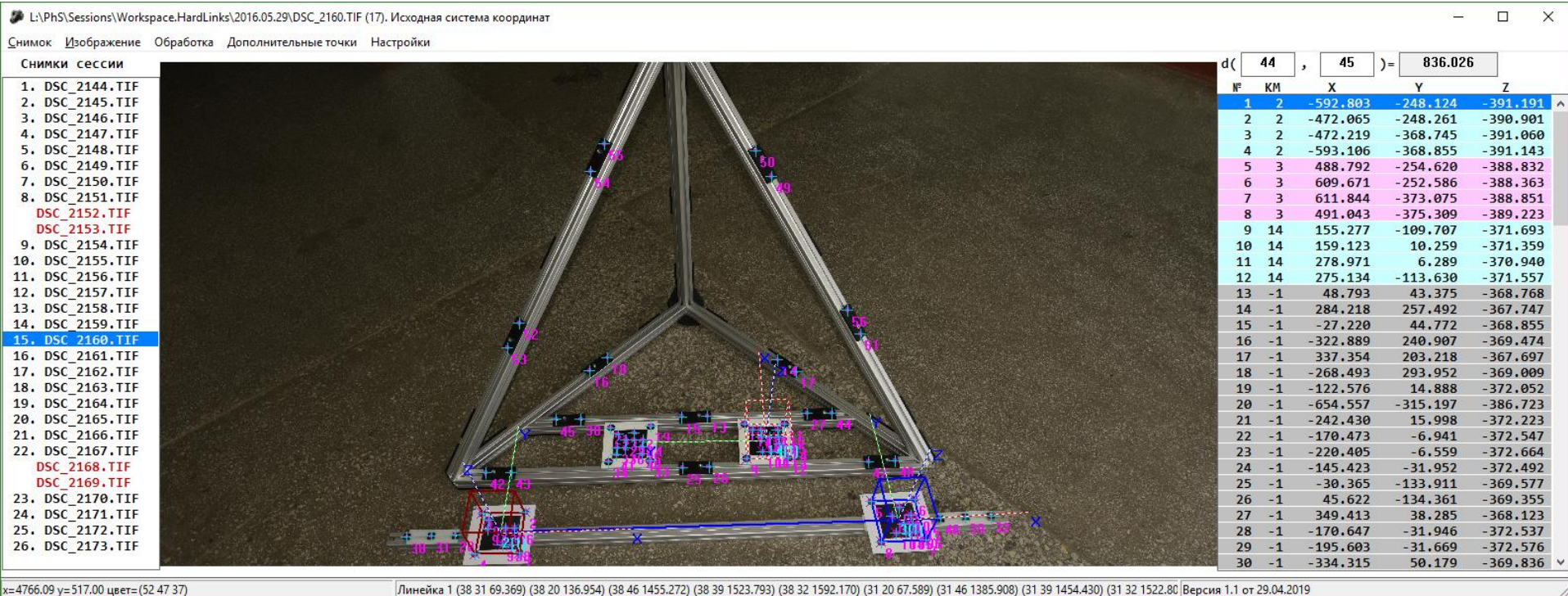
Аэрофотосъемка, потребительская фотограмметрия
Безмаркерная, плотные облака точек



3DF Zephyr (3Dflow SRL)

Аэрофотосъемка, потребительская фотограмметрия
Безмаркерная, плотные облака точек

ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ФС-1



- ✓ Высокоточная промышленная фотограмметрическая система, программно-аппаратный комплекс
- ✓ Погрешность измерений: **10 мкм + 10 мкм/м**
- ✓ Close-range, искусственные маркеры (светоконтрастные, световозвращающие)
- ✓ Разреженные облака точек (маркеров)
формирование плотных облаков точек – в разработке
- ✓ Съёмка со вспышкой, возможность работы в полной темноте
(без внешних источников света)

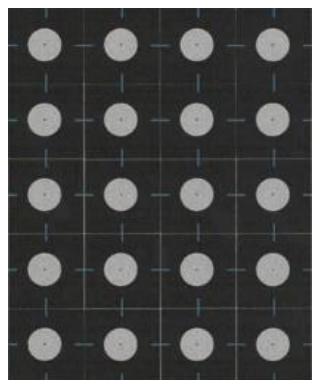
ПРИБОРНЫЙ СОСТАВ ФС



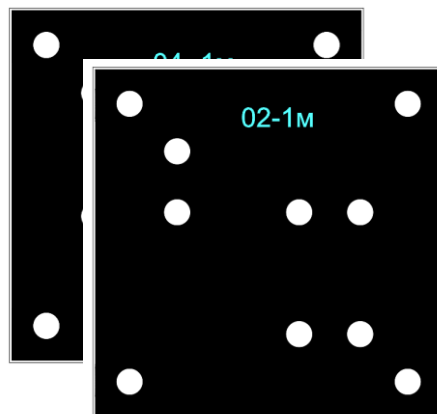
Фотокамера и аксессуары



Ноутбук с ПО ФС



Круговые мишени



Кодовые марки



Масштабные линейки

ПРИНЦИП РАБОТЫ СИСТЕМЫ

- В контролируемых точках размещаются круговые световозвращающие / светоконтрастные мишени
- В сцене размещаются аксессуары: кодовые марки, масштабные линейки
- Фотографирование с руки, со вспышкой, файлы передаются в ПО для обработки

модуль обработки изображений

1

Импорт снимков

2

Поиск круговых мишеней на снимках

3

Поиск кодовых марок среди найденных мишеней

4

Вычисление положений и ориентации камер

5

Установление соответствий между изображениями круговых мишеней

6

Вычисление трехмерных координат круговых мишеней (триангуляция)

7

Bundle adjustment

8

Масштабирование сцены

9

Экспорт данных

математическое ядро

НАХОЖДЕНИЕ СООТВЕТСТВИЙ МЕЖДУ ТОЧКАМИ

Ключевой этап фотограмметрической реконструкции

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ

features + epipolar geometry

Поиск **естественных особенностей** (углы, переходы)
⇒ Вычисление дескрипторов на основе данных изображения

ex: SIFT, SURF, ...

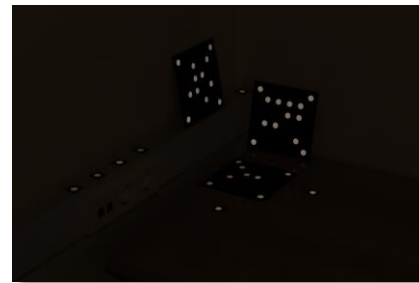
- Сравнение дескрипторов
 - Применение эпиллярной геометрии
-
- × **Требует равномерного «неизменного» освещения**
 - ✓ Не требует знаний о положениях камер
 - ✓ Быстрое нахождение соответствий – сравнение значений дескрипторов
 - ✓ Не требует искусственных маркеров
 - Требует наличия естественных особенностей, неповторяющейся текстуры
 - Целесообразен для подробного изучения поверхностей, формы объектов

ИСКУССТВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ

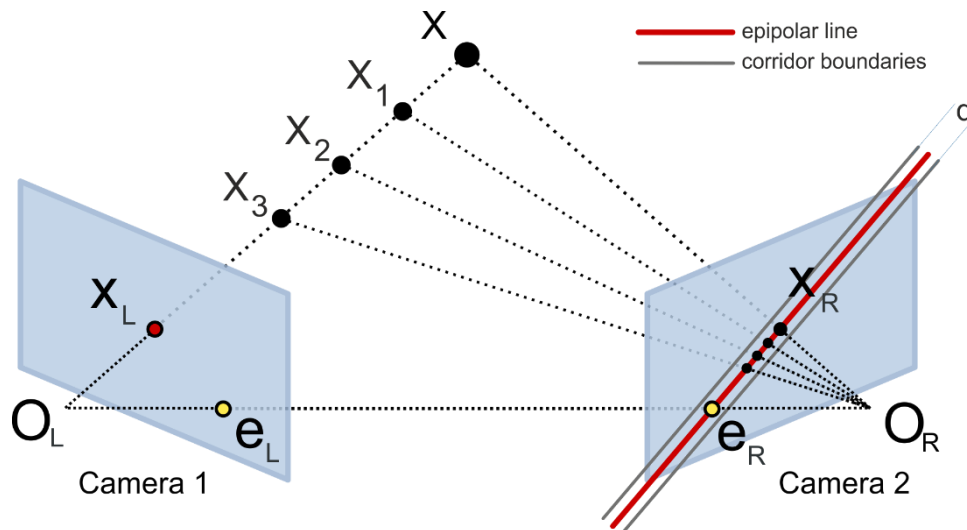
epipolar geometry

Поиск **искусственных особенностей** (круговые мишени),
⇒ дескрипторы идентичны

- Сравнение дескрипторов
 - Применение эпиллярной геометрии
-
- ✓ **Независим от условий освещения** (при условии, что точка идентифицируется)
 - Требует знаний о положениях камер
 - × Высокая сложность сопоставления однотипных искусственных особенностей, значительно сложнее естественных
 - Применим для однотипных маркеров (искусственных особенностей)
 - Целесообразен для высокоточного определения координат искусств. маркеров



ПОИСК ТОЧЕК НА ОСНОВЕ ЭПИПОЛЯРНОЙ ГЕОМЕТРИИ



Эпиполярная геометрия для 2 снимков

$$e = K^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -tx(3) & tx(2) \\ tx(3) & 0 & -tx(1) \\ -tx(2) & tx(1) & 0 \end{bmatrix} \cdot R \cdot K \cdot p$$

$$w = \frac{1}{2} \left(\frac{|e_l \cdot p_r|}{\sqrt{e_l(1)^2 + e_l(2)^2}} + \frac{|e_r \cdot p_l|}{\sqrt{e_r(1)^2 + e_r(2)^2}} \right)$$

МОДЕЛЬ ОСНОВАНА НА ГРАФЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ СООТВЕТСТВИЙ МЕЖДУ ТОЧКАМИ

Возможные соответствия рассчитываются исходя из соображений эпиполярной геометрии



Вершина графа

Распознанное изображение мишени



Доля графа

Снимок сессии

Включает в себя все вершины-изображения, принадлежащие одному снимку



Ребро графа

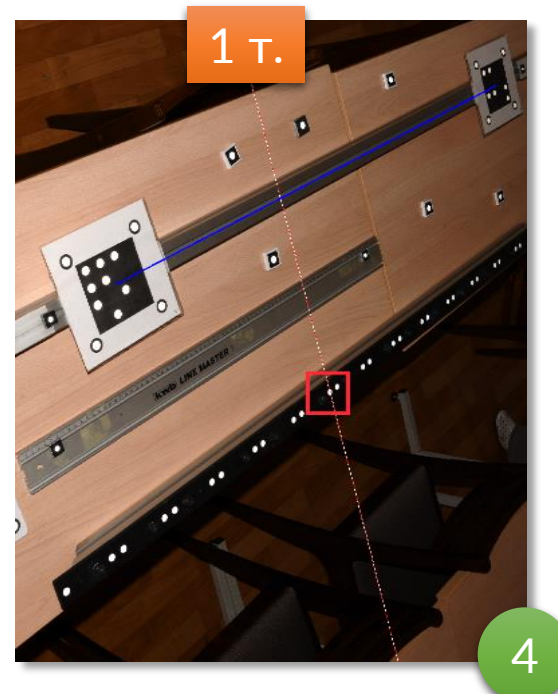
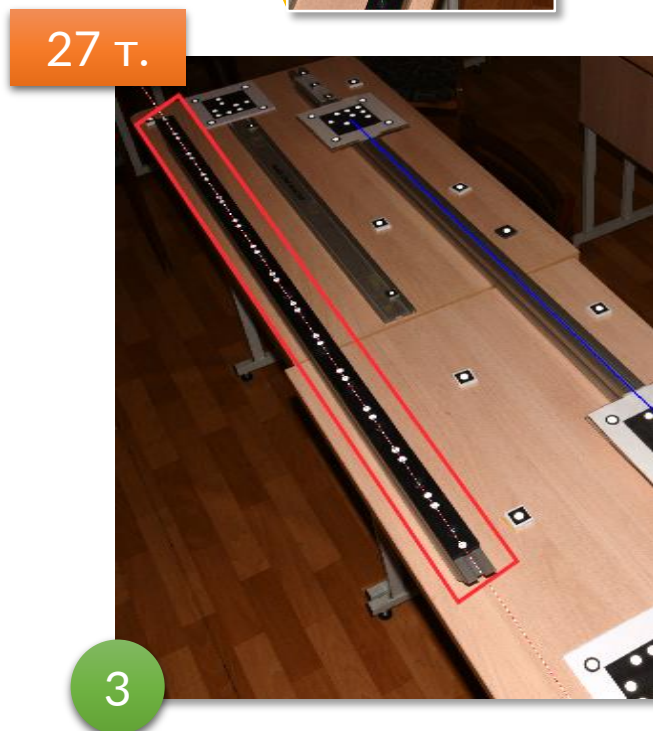
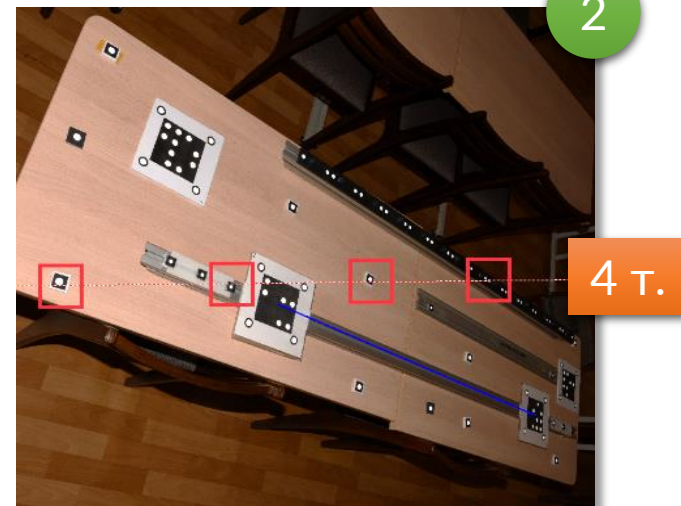
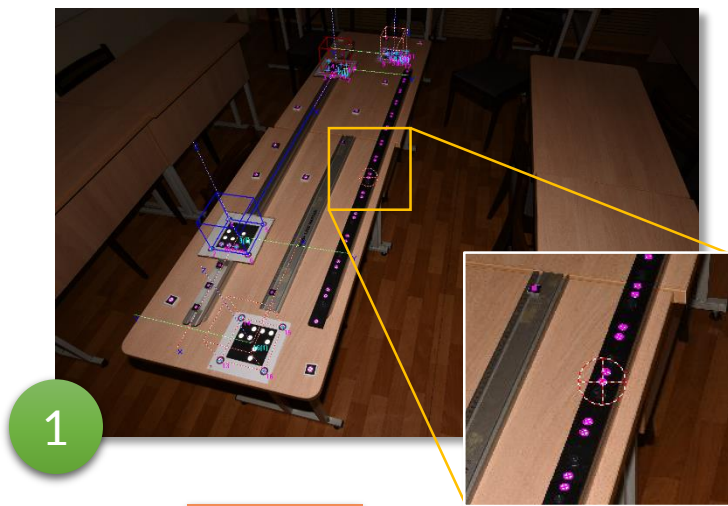
Два изображения мишеней, удовлетворяющие **взаимным** эпиполярным ограничениям – потенциальные кандидаты на соответствие



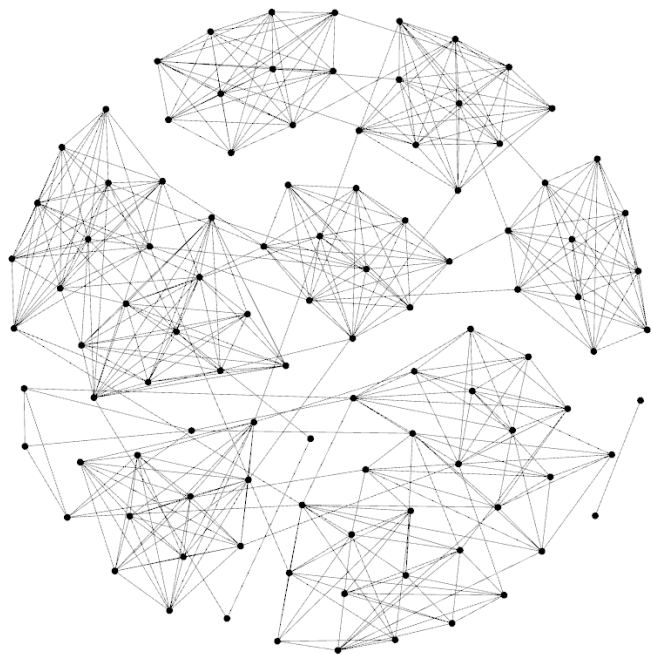
Решение задачи поиска соответствий

Множество максимальных несовместных клик (с размером клик $\geq$ порога фильтрации)
Каждая клика не может содержать более одной вершины из одной доли графа

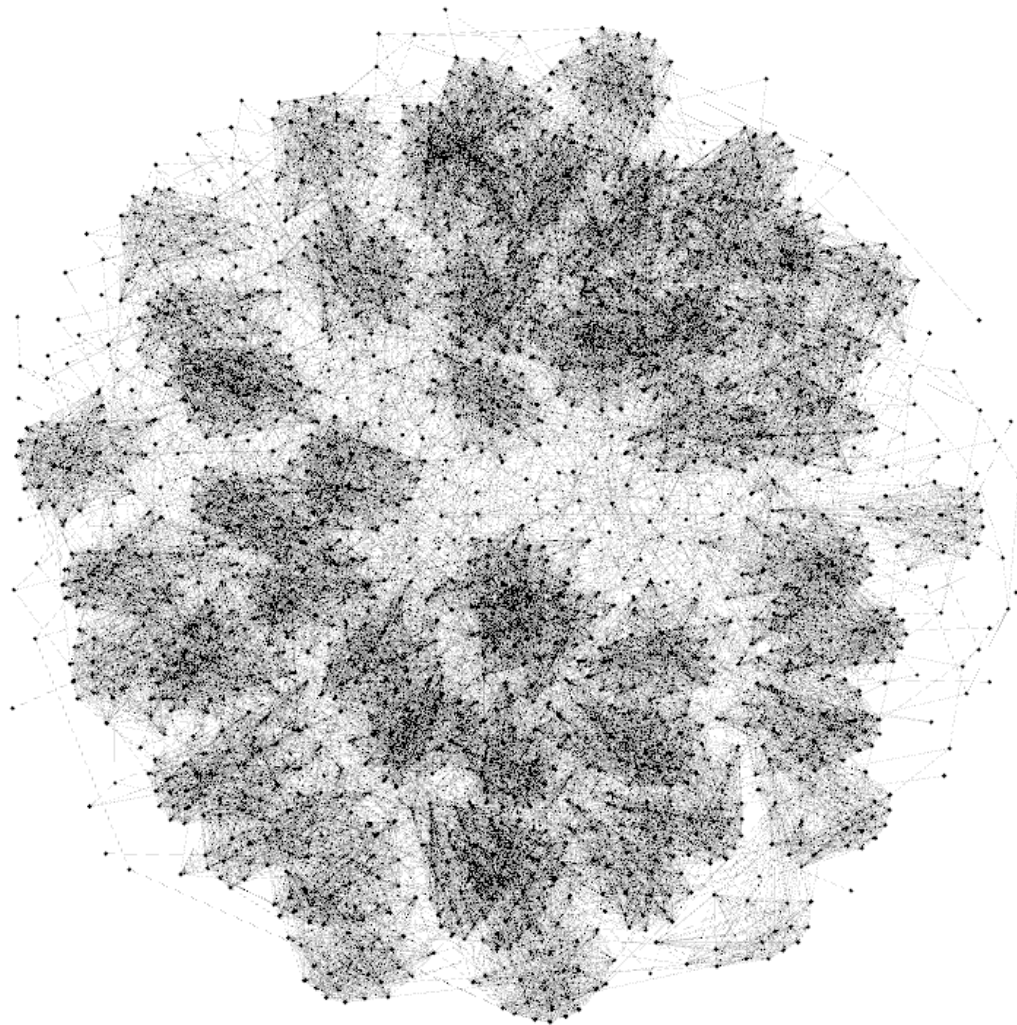
ЭПИПОЛЯРНАЯ ГЕОМЕТРИЯ ДЛЯ НЕСКОЛЬКИХ ПАР СНИМКОВ



ПРИМЕРЫ ФОРМИРУЕМЫХ ГРАФОВ



Сессия: 10 снимков, 38 3D-точек
Граф: 104 узла, 469 ребер
(фаза 2, шаг 2)



Сессия: 29 снимков, 1 165 3D-точек
Граф: 1 539 узлов, 21 227 ребер
(фаза 2, шаг 2)

ТЕОРЕТИЧЕСКИ ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ

Решением задачи поиска n соответствующих точек является совокупность не имеющих общих вершин клик $\{C_i\}, i = 1 \dots n$ графа G с мощностью каждой клики, не меньшей порога фильтрации помех t (т.е., для любой C_i справедливо выражение $N(C_i) \geq t$). При этом, каждая клика не может содержать более одной вершины, принадлежащей одной доле графа G .

Поиск **суперклики** графа:

1. Поиск всех максимальных клик $\{C_i\}$ в графе G
Клика содержит вершины графа – изображения точки на разных снимках, удовлетворяющие эпиполярным ограничениям
Каждая клика – кандидат на роль трехмерной точки
2. Построение **суперграфа** S (графа несовместных клик)
Вершины графа S – клики графа G
Две вершины в S связаны ребром, если $C_i \cap C_j = \emptyset$
3. Поиск наибольшей клики в S – **суперклики**
Вершины, формирующие суперклику – множество 3D-точек (множество максимальных несовместных клик в данном графе)
Каждая 3D-точка в свою очередь содержит ее изображения на разных снимках

Практическая применимость данного метода ограничена в силу высокой временной сложности:

$$O(2^{\omega \cdot 3^{n/3}})$$

ω - константа, характеристика алгоритма поиска наибольшей клики ($\omega=0,25$ для наиболее эффективного на сегодня алгоритма)
 n - количество идентифицированных мишеней на всех снимках фотограмметрической сессии

⇒ необходимо обеспечить нахождение точного решения задачи за практически приемлемое время

ИТЕРАЦИОННАЯ СХЕМА НАХОЖДЕНИЯ СООТВЕТСТВИЙ

Позволяет получить **точное** решение задачи за приемлемое время и обеспечивает возможность использования эвристических алгоритмов установления соответствий



Задача: разработать эффективные алгоритмы поиска соответствий

Архитектура системы позволяет использовать **эвристические** алгоритмы, дающие приближенное решение в рамках одной итерации за допустимое время.

Ключевые критерии – производительность и масштабируемость (= не экспоненциальная временная сложность), «качество нахождения соответствий».

ДИССЕРТАЦИОННАЯ ЧАСТЬ

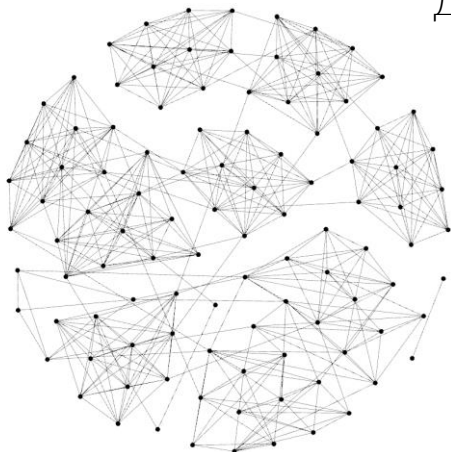
**Повышение эффективности фотограмметрической
системы измерения геометрических параметров
пространственных объектов**

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

1. Выполнить **анализ архитектуры** фотограмметрической измерительной системы ФС-1;
 2. Разработать **имитационную модель ФИС ФС-1**, позволяющую оценить различные параметры применения ФИС до ее практического применения;
 3. Разработать математическую модель процесса поиска соответствующих точек на снимках; выполнить анализ путей решения задачи;
 4. Разработать **эффективный эвристический алгоритм поиска соответствующих точек** на основе эпполярной геометрии, имеющий **полиномиальную** временную сложность;
 5. Провести **исследование эффективности ФИС**, в частности, разработанных алгоритмов, при помощи имитационной модели.
- Повысить производительность системы

ПОЛИНОМИАЛЬНЫЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ

Дальнейшее развитие идеи алгоритма PPLGx (ПаВТ'2017)



- ✓ Максимальная клика графа – потенциальный кандидат на соответствующую точку
 - ✓ Поиск всех максимальных клик – экспоненциально сложная задача $\Rightarrow$ проблемы с производительностью на больших фотограмметрических сценах (> 5000 т.)
- $\Rightarrow$ Необходимо найти максимальные несовместные клики заданного размера



ИДЕЯ: метод локальных графов

Для каждой точки целесообразно обрабатывать ее локальное окружение (связанные с ней вершины)
 $\Rightarrow$ глобальный граф преобразуется в множество «локальных» графов на порядки меньшего размера



Парадигма Map-Reduce + параллельная обработка

Каждый из локальных графов может быть обработан независимо от других
 $\Rightarrow$ возможно распараллелить задачу для повышения производительности
Финальный шаг – объединение результатов обработки всех локальных графов



Понятие локально-долевой валентности вершины

Количество долей графа (из указанного набора долей), которые содержат как минимум одну вершину, связанную ребром с рассматриваемой вершиной

$\Leftrightarrow$ количество снимков, на которых для рассматриваемого исходного изображения точки (seeder) в эпиполярных коридорах были обнаружены изображения-кандидаты на соответствие.

ПОЛИНОМИАЛЬНЫЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ

Map-шаг: параллельная обработка всех вершин графа

Для каждой вершины v :

1. Формирование локальной растущей клики Q :
 $\{Q\} = \emptyset; v \rightarrow \{Q\}$.
2. Выборка «окружения» вершины: множества всех вершин $\{H\}$, смежных с v
3. Вычисление локально-долевой валентности для всех вершин окружения $\{H\}$
4. Сортировка множества вершин окружения по критерию локально-долевой валентности
5. Обработка каждой вершины окружения:
 - Если вершина связана со всеми вершинами растущей клики – она также включается в растущую клику
6. Если размер клики не меньше порогового – клика включается в множество всех клик $\{C\}$

Reduce-шаг: обеспечение несовместности множества клик

1. Сортировка всех клик по убыванию размера (и возрастанию веса клики – при совпадающем размере), дедупликация
2. Поочередно для каждой клики C_i :
 - Для каждой нижестоящей клики C_j :
 - Если $C_i \cap C_j \neq \emptyset$, клика C_j удаляется из множества всех клик $\{C\}$

```
function Poly1PV
  parallel for v : {V}
    Map(v)
  Reduce({C})

function Map(v)
  {Q} := ∅; v → {Q}
  {H} = v.adjacent_vertices
  {LPV} = compute_localpartite_degrees({H})
  {H}.sort(degree, {LPV})
  for n : {H}
    if linked_to_all(n, {Q})
      n → {Q}
  if {Q}.size ≥ t
    {Q} → {C}

function Reduce({C})
  {C}.sort(size, weight).deduplicate
  for clique : {C}
    for clique2 : {C}[clique...end]
      if (clique ∩ clique2 ≠ ∅)
        {C} := {C} \ clique2
```

Оценка сложности:

$$O(N(n^2 + n^2 \log n + n^3 + n^2) + N^2 \log N + N^2 + N^4)$$

где N – количество вершин графа, $n \leq N$ – среднее кол-во связей вершины в пределе, при $N = n$

$$\approx O(N^4)$$

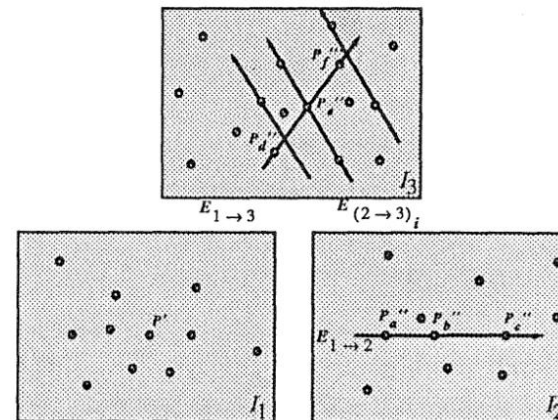
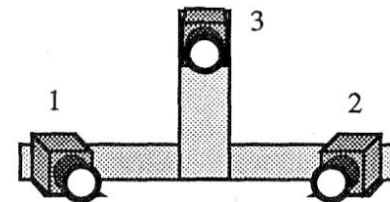
АЛГОРИТМЫ – «ОППОНЕНТЫ»

Maas-N3

- ✓ Обработка **снимков** (без графов)
- ✓ Эвристический алгоритм
- ✓ Вариант «N3»: обработка тройками
- ✓ 2 снимка – фиксированные, в роли третьего – все оставшиеся по очереди
- ✓ «Выигрывает» точка 2го снимка, у которой наибольшее количество совпадений по пересечению эпиполярных линий



Dold J., Maas H.-G. An Application of Epipolar Line Intersection in a Hybrid Close Range Photogrammetric System // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 1994. Vol. 30, No. 5. P. 65–70.



Pivot/CE

- ✓ Обработка **графа**
- ✓ Эвристический алгоритм
- ✓ Наиболее близок к теоретически точному решению задачи
- ✗ Экспоненциальная временная сложность

Алгоритм:

1. Находим все максимальные клики в графе
Каждая клика – кандидат на соответствующую точку
2. Ранжируем клики по размеру и весу
3. Удаляем совместные клики, отдавая предпочтение кликам с большим размером / меньшим весом



Задача: разработать генератор синтетических данных для оценки производительности

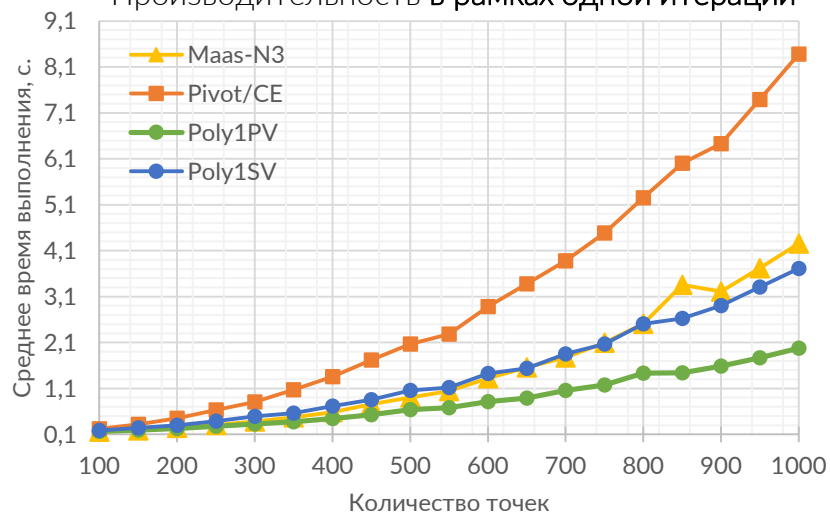
Проведение экспериментов с большим количеством мишеней затруднено
Большое количество конфигураций, изменяемых параметров

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА

Критерии оценки эффективности алгоритма:

- Производительность :: время в рамках одной итерации
- Производительность :: совокупное время работы ФИС
- Качество установления соответствий:
 - Потери точек (в рамках работы всей итерационной схемы)
 - Количество итераций для обеспечения сходимости

Производительность в рамках одной итерации



Ускорение алгоритма



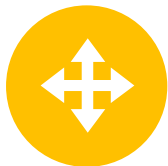
Интегральная производительность, синтетические данные

Количество мишеней	Среднее время работы ФИС, с.			
	Maas-N3	Poly1PV	Poly1SV	Pivot/CE
106	33,23	26,51	26,72	26,86
506	117,00	101,59	103,05	107,45
1006	266,20	231,58	234,79	251,28

Интегральная производительность, реальные сессии

Сессия	Среднее время работы ФИС, с.			
	Maas-N3	Poly1PV	Poly1SV	Pivot/CE
car_dent	8,45	7,40	7,54	7,49
classroom_minimal	76,63*	83,61	83,38	86,92
classroom_lotsCT	87,09*	99,48	99,58	100,58
construction_site	37,74	37,00	37,55	37,41
tetrahedron	24,16	19,50	19,10	20,02
wall	42,69	40,55	40,99	41,48
workshop	45,86*	49,30	51,30	49,71

ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ПИКСЕЛЬНЫХ КООРДИНАТ



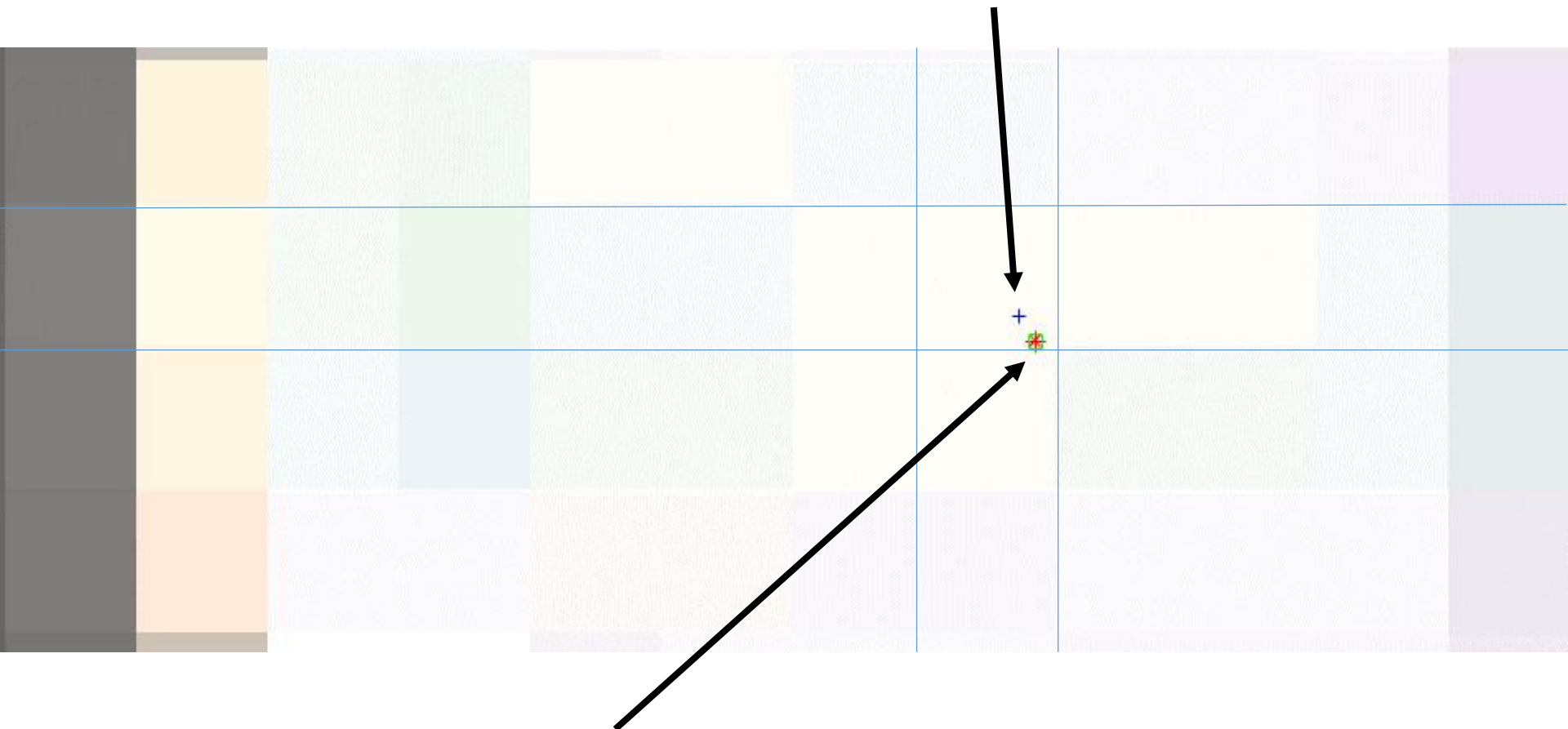
Дискретность пиксельной сетки

Не всегда возможно точно определить границы контура $\Rightarrow$ центр эллипса, что приводит к ошибкам измерения пиксельных координат центров маркеров



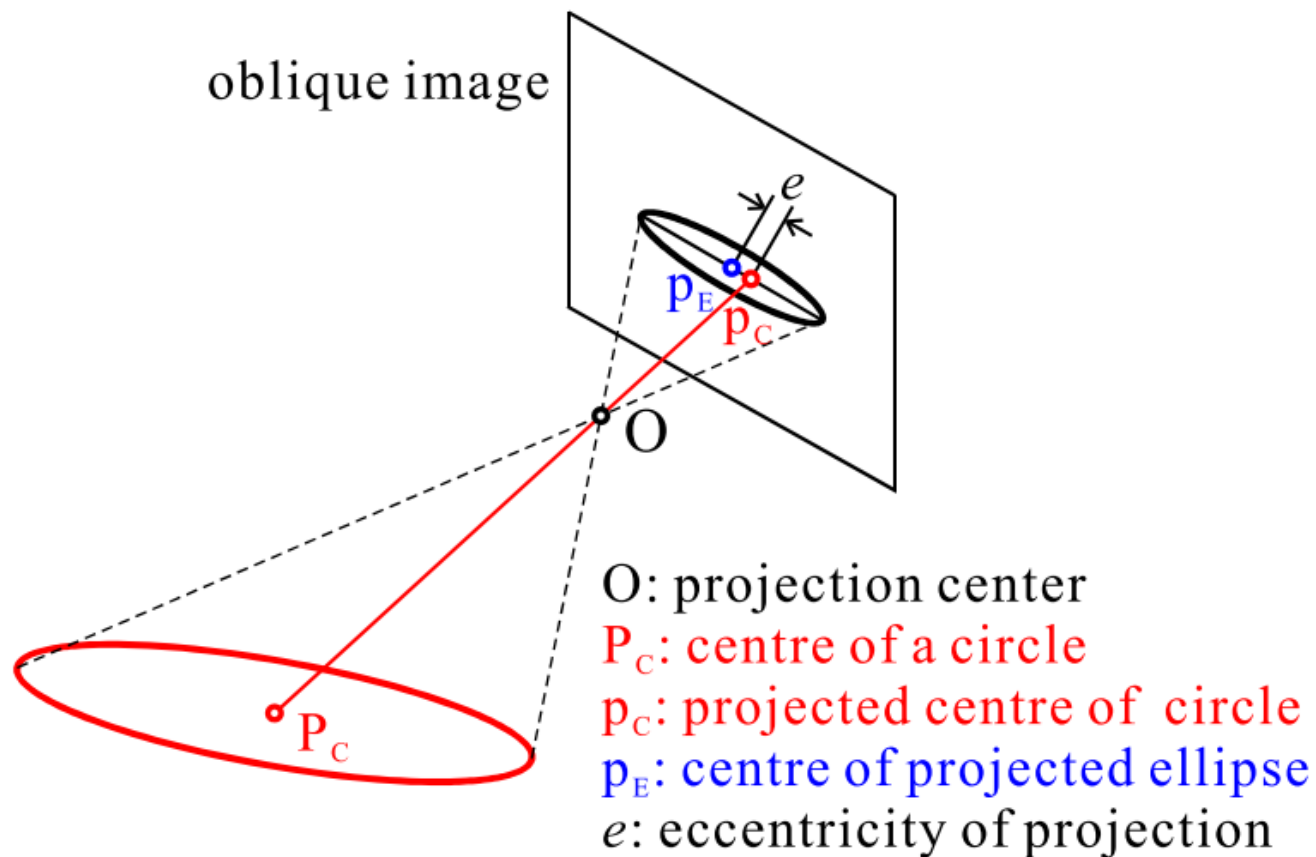
ПИКСЕЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ :: ПРИМЕР КОРРЕКТИРОВКИ

Реальный центр эллипса
(по результатам обработки серии снимков)



Предполагаемый центр эллипса (по снимку)

ЭКСЦЕНТРИСИТЕТ КРУГОВОЙ МИШЕНИ



Источник: Matsuoka R., Maruyama S. Eccentricity on an image caused by projection of a circle and a sphere. 2016. Vol. III, No. July. P. 12–19. DOI: 10.5194/isprsannals-III-5-19-2016

ДРУГИЕ ЗАДАЧИ, ТРЕБУЮЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- Исследование производительности системы
- Исследование масштабируемости системы
- Исследование влияния погрешностей:
 - начальной калибровки камер
 - погрешности определения положения камер
 - изготовления кодовых марок и масштабных мер
 - пиксельной погрешности измерений
 - погрешности определения контуров и центров эллипсов
 - влияния эксцентриситета
 - ...
- ...
- Исследование погрешности системы



Задача: необходимы инструменты для проведения исследований

Проведение многих натуральных экспериментов либо затруднено, либо физически невозможно

СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ ФИС

■ Экспериментальный

- Сравнение данных, полученных от **эталонной** и **поверяемой** систем
- Для достоверной оценки эталонная система должна иметь погрешность примерно **на порядок меньше**, что не всегда возможно обеспечить
- Привязан к **конкретной ситуации**, не позволяет оценить влияние изменения параметров системы

■ Теоретический

- Оценка погрешности на основе анализа математической модели, требует создания **аналитической модели системы**
- Разрабатываемая ФИС является **сложной стохастической системой**
- На итоговую погрешность ФИС влияет большое количество случайных факторов:

$$N \cong k + 6n + 2mn$$

- k – количество внутренних параметров модели камеры,
- n – количество снимков,
- m – среднее кол-во изображений мишеней на снимке

При типичных значениях $k = 8, n = 50, m = 100$ количество случайных факторов составит

$$N = 10\ 308$$

■ Имитационное моделирование

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- ✓ Изучаемая система заменяется адекватной, достоверной, реалистичной моделью (цифровым двойником)
- ✓ Данные, полученные в результате вычислительных экспериментов, позволяют достоверно исследовать поведение системы
- ✓ Возможность проведения экспериментов, сложноосуществимых на практике
- ✓ Возможность изучения влияния различных параметров изолированно друг от друга
- ✓ Идеально подходит для анализа ФИС – физические основы фотографии хорошо изучены, существуют достоверные модели фотокамеры, модели дисторсии



Статистические оценки погрешности (метод Монте-Карло)

Многократно симулируя случайные погрешности во входных данных системы, возможно получить статистические оценки погрешности ФИС



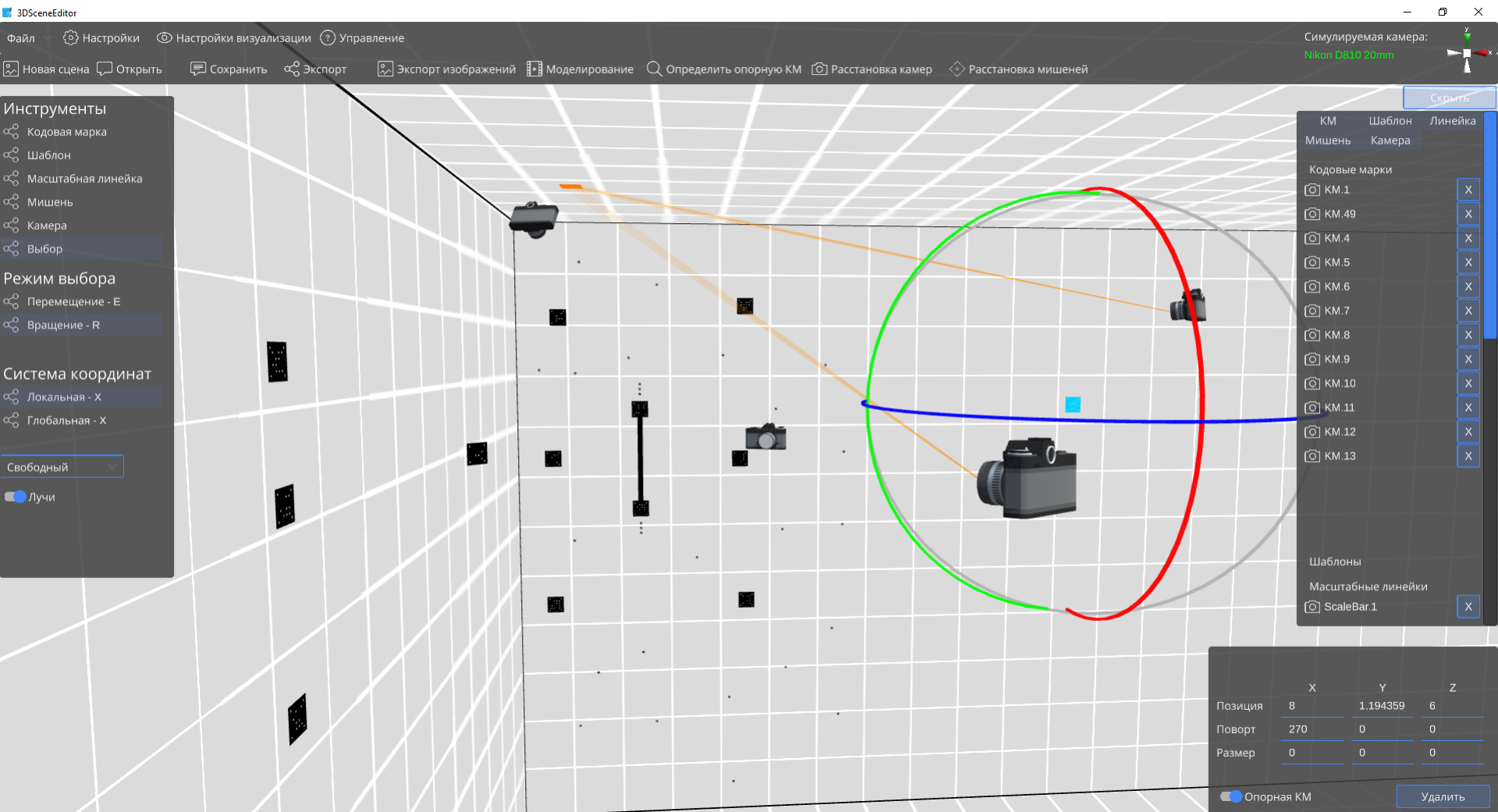
Оценка масштабируемости

ИМ позволяет с изменять геометрию сцены, количество контрольных точек и камер в неограниченных пределах,

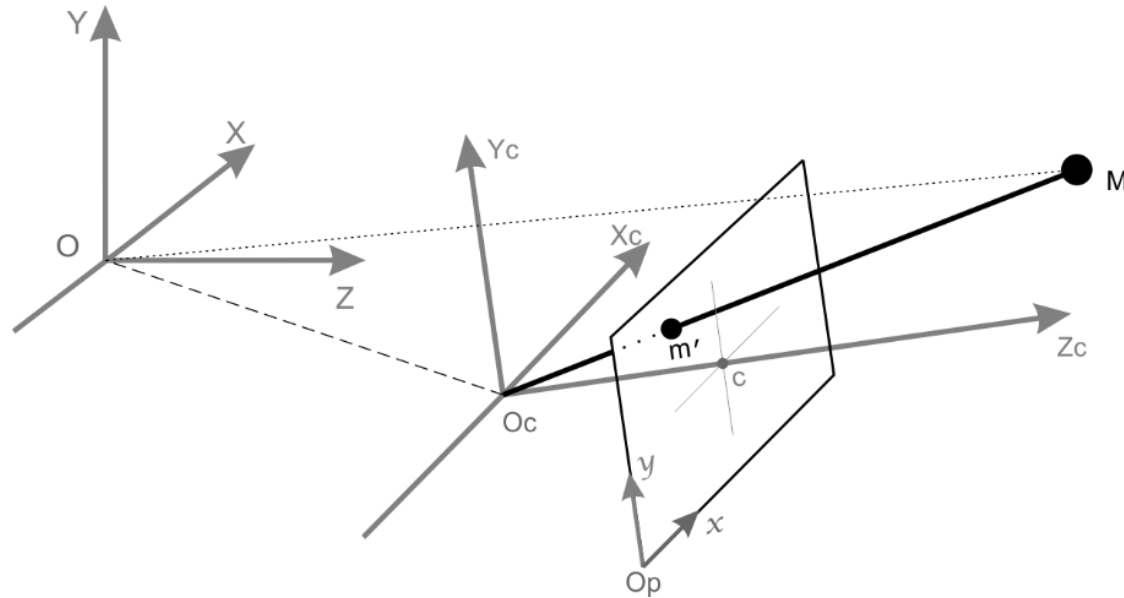
ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФИС ФС-1

- **Задание известных входных данных**
 - координаты контрольных точек
 - расположение кодовых марок, масштабных линеек, др. аксессуаров
 - расположение фотокамер
 - параметры внутренней калибровки («Модель фотокамеры»)
- **Симулирование погрешностей:**
 - пиксельная погрешность
 - определение параметров эллипсов
 - влияние дискретизации пиксельной сетки
 - исследование особенностей субпиксельных алгоритмов выделения контуров
 - неточность определения первоначального положения камер
 - неточность начальной калибровки фотокамеры
 - погрешность изготовления масштабных мер
- **Симулирование процесса фотосъемки**
- **Симулирование первичной обработки полученных снимков с учетом архитектуры ФИС**
- **Задание параметров расчета и используемых алгоритмов обработки фотограмметрической информации**
- **Сравнение рассчитанных координат точек с исходными:**
 - оценка погрешности ФИС
 - оценка влияния различных параметров на погрешность ФИС
 - оценка влияния различных параметров на производительность ФИС

ИНСТРУМЕНТ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАМЕРЫ

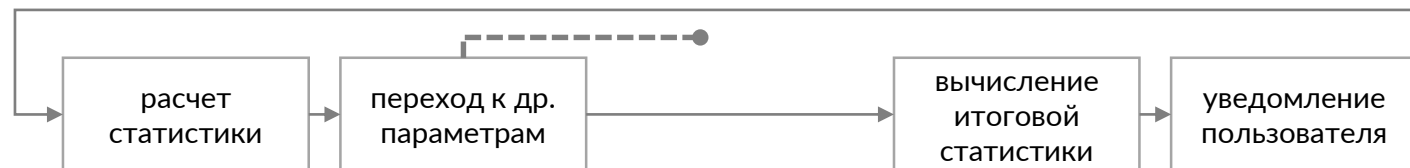
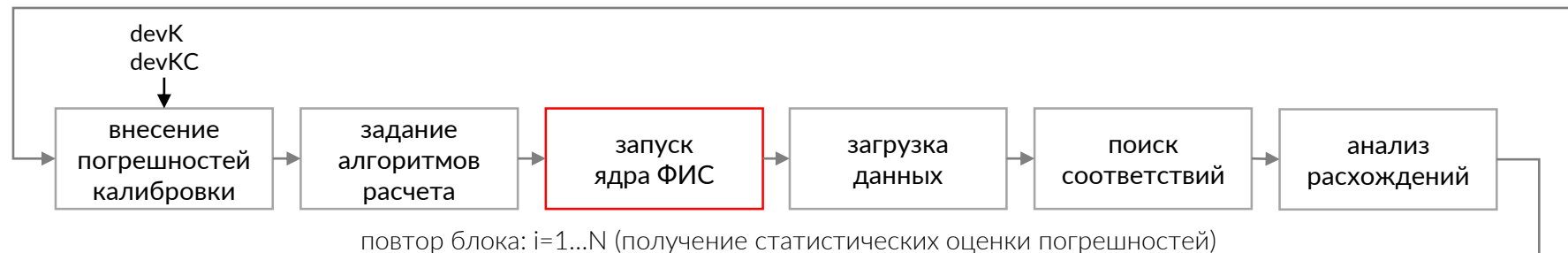
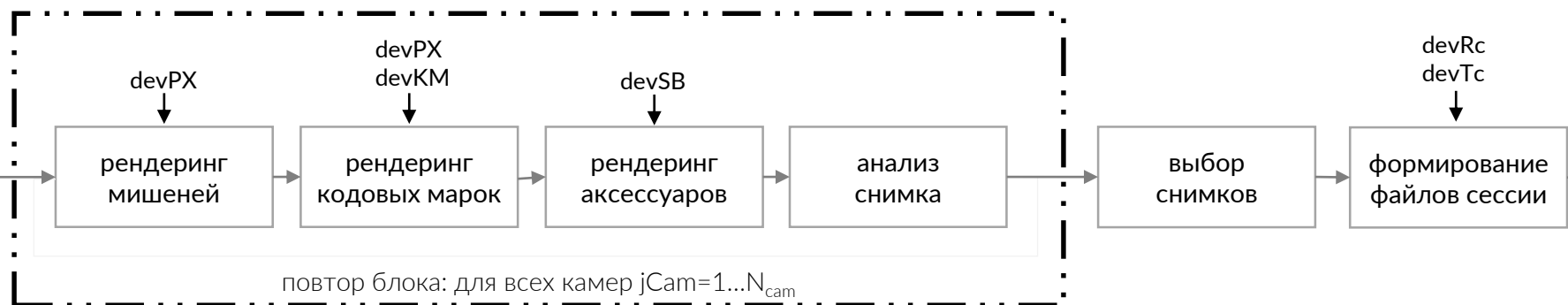
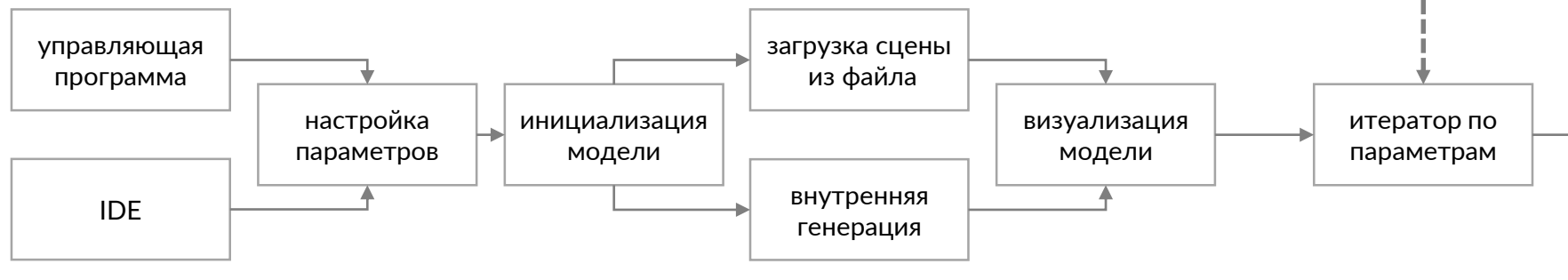


$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = K \cdot dist(norm \left(C \cdot \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \\ 1 \end{bmatrix} \right)) = \begin{bmatrix} f_x & \alpha \cdot f_x & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot dist(norm \left(\begin{bmatrix} R & t \\ 0_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \\ 1 \end{bmatrix} \right)),$$

$$dist(\overline{x_n}) = (1 + kc_1 \cdot r^2 + kc_2 \cdot r^4 + kc_5 \cdot r^6)x_n + dx(\overline{x_n}),$$

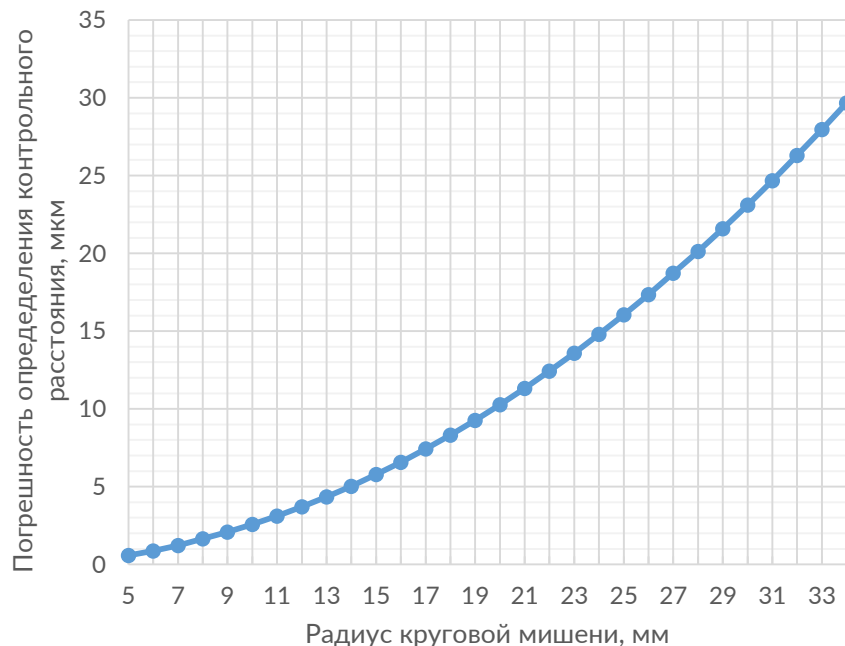
$$dx(\overline{x_n}) = \begin{bmatrix} 2kc_3 \cdot xy + kc_4 \cdot (r^2 + 2x^2) \\ kc_3 \cdot (r^2 + 2y^2) + 2kc_4 \cdot xy \end{bmatrix}; \quad r^2 = x^2 + y^2$$

УКРУПНЁННАЯ СТРУКТУРА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

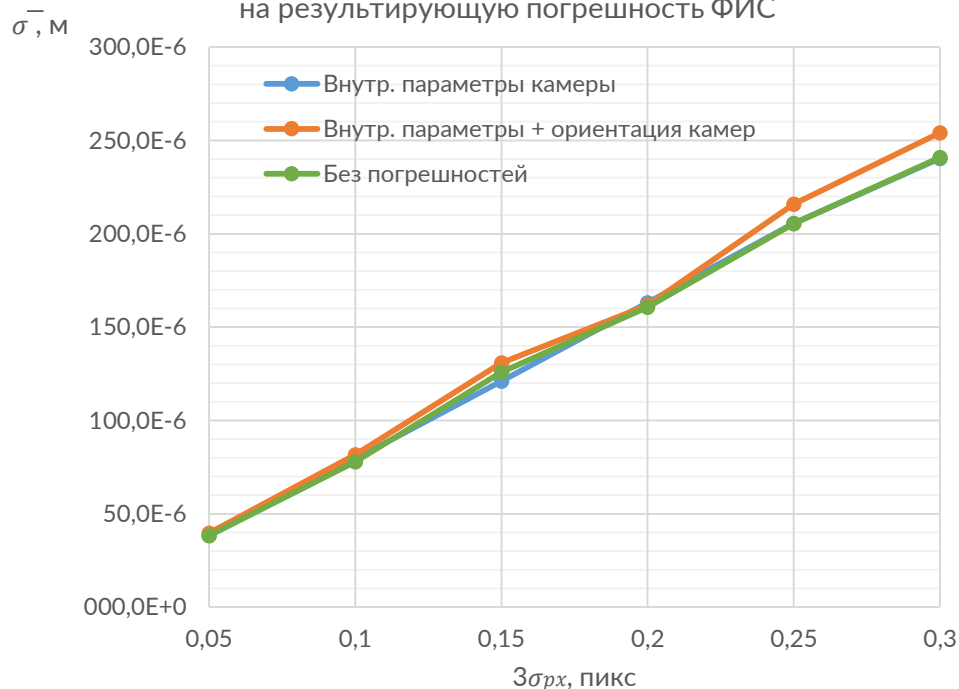


РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

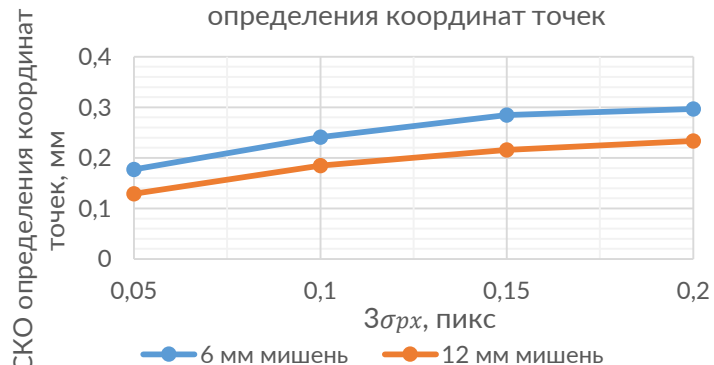
Влияние эксцентриситета эллипса на погрешность измерений



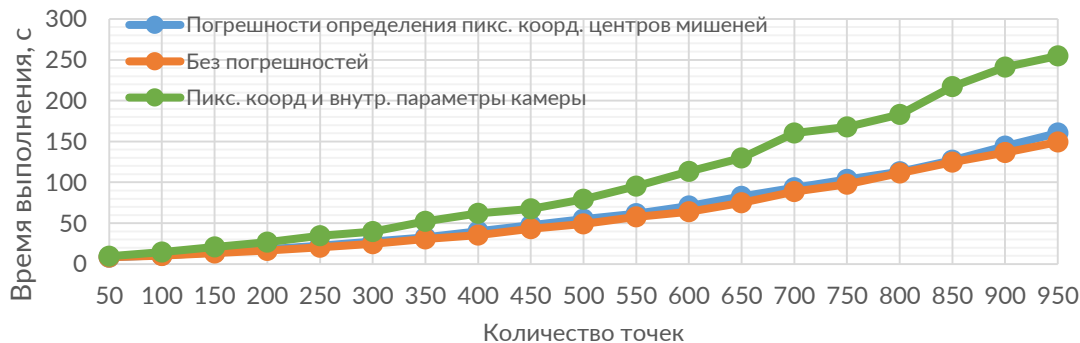
Влияние погрешностей в начальной калибровке камеры на результирующую погрешность ФИС



Влияние радиуса мишени на СКО определения координат точек



Влияние погрешностей в начальной калибровке камеры на производительность ФИС



РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НА МОДЕЛИ ФИС

- Выполнена оценка погрешности ФИС средствами имитационного моделирования
- Основная внутренняя характеристика ФИС, влияющая на погрешность – погрешность измерения пиксельных координат центров эллипсов
- Установлены источники погрешности
- Предложены меры по снижению погрешности ФИС:
 - Субпиксельное выделение контуров эллипсов
 - Борьба с погрешностью, вносимой эксцентриситетом круговых мишеней
- Система робастна к ошибкам первоначальной калибровки в широком диапазоне значений
- Ключевым фактором, влияющим на *совокупную точность измерений*, является относительный размер масштабной меры, а также ее точность изготовления (процедура калибровки кодовых марок позволяет существенно повысить точность)
- Обнаружен и устранен ряд узких мест в системе, повышена производительность системы
- Выполнена оценка производительности, максимально допустимое на нынешний момент число точек
- Получен инструмент, позволяющий заранее смоделировать фотограмметрическую сессию и спланировать оптимальное проведение эксперимента.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Выполнен анализ архитектуры фотограмметрической системы ФС-1
2. Разработана имитационная модель ФИС
3. Разработана математическая модель поиска соответствующих точек на снимках, выполнен анализ путей решения задачи
4. Разработан ряд эвристических алгоритмов поиска соответствующих точек, в частности, полиномиальный параллельный алгоритм Poly1PV
5. Выполнено исследование эффективности ФИС, в частности, разработанных алгоритмов, при помощи имитационной модели

АПРОБАЦИЯ

Международные конференции (5):

1. IV Международная научно-техническая конференция ICIEAM-2018, доклад Тушев С.А., Суховилов Б.М. **Надежная идентификация кодовых марок в условиях недостаточной освещенности**, г. Москва, 2018
2. II Международная научно-техническая конференция «Измерения: состояние, перспективы развития», доклад Тушев С.А., Суховилов Б.М. **Architecture of Industrial Close-Range Photogrammetric System with Multi-Functional Coded Targets**, г. Челябинск, 2017
3. XI Международная научная конференция «Параллельные вычислительные технологии 2017», доклад Тушев С.А., Суховилов Б.М. **Parallel Algorithms for Effective Correspondence Problem Solution in Computer Vision**. г. Казань, 2017
4. III Международная научно-техническая конференция ICIEAM-2017, доклад Тушев С.А., Суховилов Б.М. **Photogrammetric system accuracy estimation by simulation modelling**, г. Санкт-Петербург, 2017
5. II Международная научно-техническая конференция ICIEAM-2016, доклад Тушев С.А., Суховилов Б.М. **Эффективные алгоритмы поиска соответствий точек на снимках на основе графов**, г. Челябинск, 2016

Другие публичные представления:

1. LXXI научная конференция ЮУрГУ, секция информатики, доклад Тушев С.А. **Оценка погрешности и устойчивости к неточностям калибровки фотограмметрической системы**, г. Челябинск, 2019
2. XI научная конференция аспирантов и докторантов ЮУрГУ, доклад Тушев С.А. **Исследование точности фотограмметрической системы средствами имитационного моделирования**. г. Челябинск, 2019
3. LXX научная конференция ЮУрГУ, секция информатики, доклад Тушев С.А. **Повышение эффективности высокоточной фотограмметрической системы**, г. Челябинск, 2018
4. LXVIII научная конференция ЮУрГУ, секция информатики, доклад Тушев С.А. **Алгоритмы поиска клик в задачах компьютерного зрения**, г. Челябинск, 2017
5. LXIX научная конференция ЮУрГУ, секция информационные технологии в экономике, доклад Суховилов Б.М., Тушев С.А. **Разработка имитационной модели фотограмметрической системы**, г. Челябинск, 2016
6. IX научная конференция аспирантов и докторантов ЮУрГУ, доклад Тушев С.А. **Анализ эффективности фотограмметрической системы методами имитационного моделирования**, г. Челябинск, 2016

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В списке журналов ВАК (3):

1. Тушев С.А., Суховилов Б.М. **Алгоритм полиномиальной сложности для поиска соответствующих точек на основе эпиполярной геометрии** // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2018. Т. 7, № 4. С. 83–104. DOI: 10.14529/cmse180406
2. Тушев С.А., Суховилов Б.М. **Анализ эффективности фотограмметрической системы методами имитационного моделирования** // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2018. Т. 11, № 1. С. 109–123. DOI: 10.14529/mmp180110
3. Tushev S.A., Sukhovilov B.M. **Parallel Algorithms for Effective Correspondence Problem Solution in Computer Vision** // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т. 6, № 2. С. 49–68. DOI: 10.14529/cmse170204

В международных БД SCOPUS/Web of Science (5):

1. Tushev S.A., Sukhovilov B.M. **Robust Coded Target Recognition in Adverse Light Conditions**. Proceedings of the 2018 4th International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Moscow. 2019. N.Y., IEEE Xplore (в печати)
2. Tushev S.A., Sukhovilov B.M., Sartasov E.M. **Architecture of Industrial Close-Range Photogrammetric System with Multi-Functional Coded Targets**. Proceedings of the 2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2017. IEEE Xplore Digital Library. pp. 435–442. DOI: 10.1109/URALCON.2017.8120748
3. S. Tushev and B. Sukhovilov, **Photogrammetric system accuracy estimation by simulation modelling**, 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, 2017, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076464.
4. Tushev S.A., Sukhovilov B.M. **Effective Graph-Based Point Matching Algorithms**. Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia, 2016. IEEE Xplore Digital Library. pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911628
5. Тушев С.А., Суховилов Б.М. **Анализ эффективности фотограмметрической системы методами имитационного моделирования** // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2018. Т. 11, № 1. С. 109–123. DOI: 10.14529/mmp180110

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В других изданиях (5 + 1 в печати):

1. Жукович Д.М., Тушев С.А., Паламарчук Л.Н. **Разработка редактора трехмерной сцены.** Молодой исследователь: материалы 5-й научной выставки-конференции научно-технических и творческих работ студентов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. С.103-109
2. Тушев С.А., Суховилов Б.М. **Оценка погрешностей измерения фотограмметрической системы методами имитационного моделирования** // Пром-Инжиниринг: труды III международной научно-технической конференции. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. С. 318–324
3. Tushev S.A., Sukhovilov B.M. **Parallel Algorithms for Effective Correspondence Problem Solution in Computer Vision.** // Параллельные вычислительные технологии – XI международная конференция, ПаВТ'2017, г. Казань, 3–7 апреля 2017 г. Короткие статьи и описания плакатов. короткие статьи и описания плакатов XI международной конференции / Российская академия наук; Суперкомпьютерный консорциум университетов России, 2017. С. 228-242
4. Тушев С.А., Суховилов Б.М. **Эффективные алгоритмы поиска соответствий точек на снимках на основе графов** // Пром-Инжиниринг труды II международной научно-технической конференции. ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет). 2016. С. 464-468.
5. Тушев С.А. Суховилов Б.М. **Некоторые способы повышения производительности автоматической калибровки цифровых камер**// Молодой исследователь: материалы 2-й научной выставки-конференции научно-технических и творческих работ студентов – Челябинск, 2015. – С. 434-439

Свидетельства РосПатента (3 + 2 заявлено):

1. Свидетельство 2018610079. **Поиск соответствующих точек изображений на графе потенциальных соответствий (PCAlgorithms):** программа для ЭВМ / Тушев С.А. (RU); правообладатель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (RU). № 2018610079; заявл. 02.11.2017; опубл. 10.01.2018, 246 Кб.
2. Свидетельство 2017664275. **Имитационная модель фотограмметрической системы для анализа ее точности и масштабируемости:** программа для ЭВМ / Тушев С.А., Суховилов Б.М. (RU); правообладатель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (RU). № 2017664275; заявл. 30.10.2017; опубл. 20.12.2017, 110 Кб.
3. Свидетельство 2017664163. **Параллельное формирование графа потенциальных соответствий между точками на основе анализа эпиполярной геометрии фотограмметрической сцены (CPPCandidateS):** программа для ЭВМ / Тушев С.А., Суховилов Б.М. (RU); правообладатель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (RU). № 2017664163; заявл. 27.10.2017; опубл. 18.12.2017, 65 Кб.

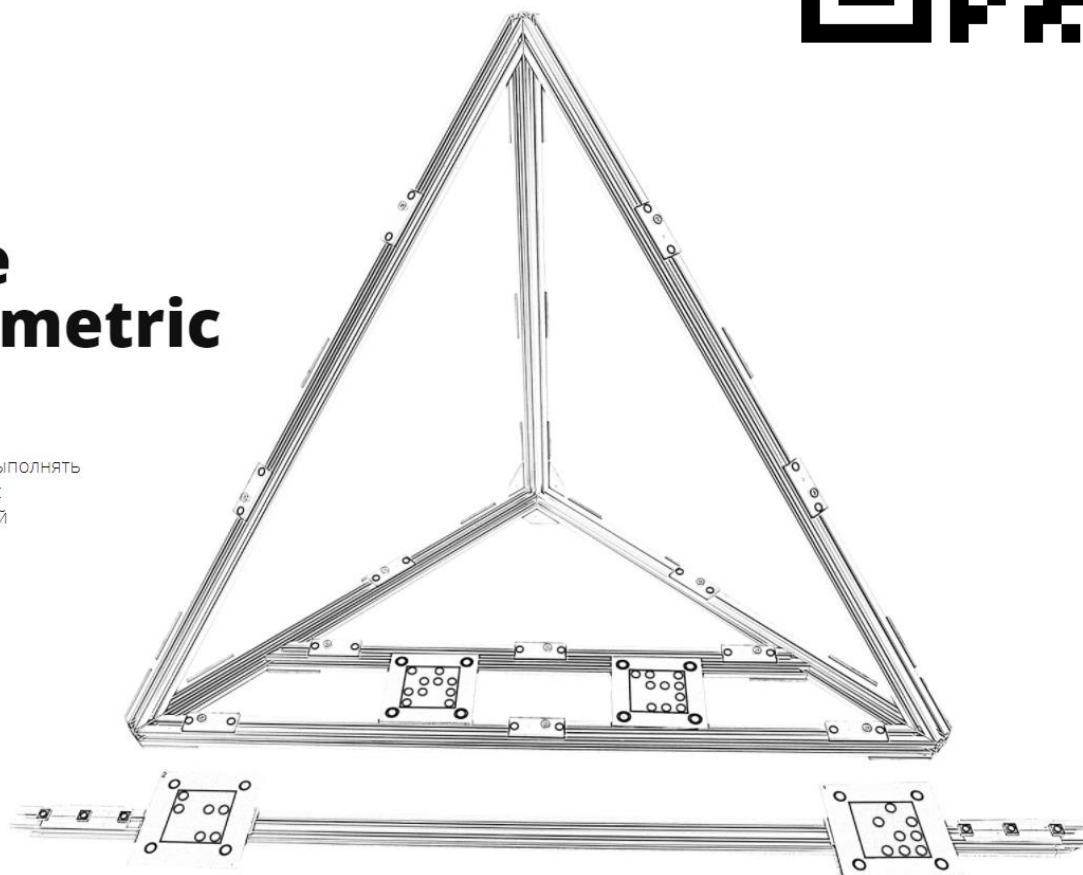


ГЛАВНАЯ ПРЕИМУЩЕСТВА ФОТО ОПИСАНИЕ ПРИМЕНЕНИЕ СОЗДАТЕЛИ КОНТАКТЫ

Industrial close-range photogrammetric system

Мы разрабатываем систему, способную выполнять бесконтактные измерения 3D-координат с высокой точностью (до 9 мкм/м) и высокой скоростью работы.

УЗНАТЬ БОЛЬШЕ





СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Семен Тушев

аспирант кафедры ИТЭ НИУ ЮУрГУ

tushevs@usu.ru

Борис Суховилов

д.т.н., зав. кафедрой ИТЭ НИУ ЮУрГУ

sukhovilovbm@usu.ru