

Санкт-Петербургский государственный университет

Кафедра системного программирования

Группа 22.Б10-мм

Алгоритмы геопривязки изображений с БПЛА на основе спутниковых снимков

Николаева Анна Константиновна

Отчёт по учебной практике
в форме «Решение»

Научный руководитель:
старший преподаватель кафедры СП, к.т.н., Ю.В. Литвинов

Консультант:
инженер-исследователь Mobile Robotics Lab, Skoltech А.В. Корнилова

Санкт-Петербург
2024

Оглавление

1. Введение	3
2. Постановка задачи	5
3. Обзор	6
3.1. Модели камер, используемые в БПЛА и спутниках . . .	6
3.2. Гомография изображений	9
3.3. Виды картографических проекций	11
3.4. Классификация подходов	12
3.5. Обзор датасетов	15
3.6. Используемые для оценки гомографии метрики	16
3.7. Алгоритмы геопривязки изображений	16
4. Методы	18
4.1. Нахождение гомографии между изображениями по парам ключевых точек	18
5. Эксперименты	19
5.1. Тестовые данные	19
5.2. Описание экспериментов	19
5.3. Полученные результаты	20
6. Заключение	22
Список литературы	23

1. Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) популярны для решения многих задач: авиаразведка, доставка грузов, инвентаризация складских помещений, мониторинг, картографирование. В связи с этим возникает задача локализации БПЛА, для которой становятся важны алгоритмы, определяющие положение летательного аппарата точно и эффективно.

Существующие методы локализации БПЛА в основном используют спутниковые системы навигации, например GNSS/GPS [1, 3]. При данном подходе посредством радиосвязи измеряется расстояние от БПЛА до спутников и на основе этих данных вычисляются географические координаты объекта. Несмотря на повсеместное использование такого метода локализации, он не является устойчивым [2]: из-за помех сигнала в удаленных регионах или фонового шума в больших городах в некоторых случаях невозможно определить положение БПЛА. Другим методом локализации может быть использование готовой карты в формате 3D-HD (High-definition 3D map), созданной с использованием 3D-картографического транспортного средства обзорного класса. Такие карты создаются с помощью дорогостоящих сенсоров, таких как лидар, радары, цифровые камеры. В результате локализация осуществляется сопоставлением данных с сенсоров транспортного средства и карты. Недостатками такого способа являются его трудоемкость вычислений и дороговизна оборудования.

Вышеописанных проблем можно избежать, если осуществлять локализацию посредством снимков со спутника. Идея этого метода заключается в том, что изображение с камеры транспортного средства сопоставляется со спутниковым снимком, после чего строится отображение из точек изображения с камеры в географические координаты. Преимуществом данного метода является автономность ввиду отсутствия внешних зависимостей, которые могут препятствовать локализации в некоторых случаях, например, когда использование GPS невозможно в труднодоступных для сигнала районах Земли. Кроме того, данный

подход является общедоступным, поскольку существует много открытых баз данных со спутниковыми снимками, например Google Earth¹, Bing maps², Open Street Map³.

В рамках данной работы ставится задача сделать обзор существующих методов, сопоставляющих кадры земной поверхности, снятые дронами, с кадрами, снятыми со спутников и сравнить их между собой на целевых данных. Большинство решений нацелено на получение информации о геолокации самого БПЛА, но не геопривязки изображений. Поэтому необходимо разработать инструмент, который позволял бы вычислять географические координаты любого пикселя в изображении БПЛА.

¹Google Earth [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.google.ru/intl/ru/earth/> (дата обращения 12.12.2023).

²Bing maps [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.microsoft.com/en-us/maps/bing-maps> (дата обращения 14.12.2023).

³Open Street Map [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.openstreetmap.org/map=3/69.62/-74.90> (дата обращения 14.12.2023).

2. Постановка задачи

Целью работы является реализация инструмента для геопривязки изображений, которые получены БПЛА, с помощью спутниковых изображений. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи.

1. Выполнить обзор существующих методов визуальной гео-локализации БПЛА с помощью спутниковых изображений и классифицировать их, выделить решения с открытой реализацией.
2. Выделить датасеты, использованные при проведении экспериментов с найденными методами. Выбрать метрики, которые использовались для оценки найденных методов.
3. Осуществить сравнение найденных методов на датасетах, используя подходящие метрики, выделить лучшие методы.
4. Реализовать алгоритм, осуществляющий гео-локализацию БПЛА на основе спутниковых снимков.
5. Включить в алгоритм методы, показавшие наилучшие результаты на выбранных метриках.

3. Обзор

При обзоре существующих решений задачи гео-привязки изображений было выявлено, что самым распространенным способом является использование гомографии изображений [11, 16]. В данном разделе будут обсуждены модели камеры, которые влияют на построение отображения из точек изображения-запроса (англ. query-image) в точки референсного изображения (англ. reference-image). Также будет обсуждено построение гомографии и картографические проекции. Кроме того, будет дана классификация методов, позволяющих найти гомографию между изображениями.

3.1. Модели камер, используемые в БПЛА и спутниках

В данном разделе будут описаны основные модели камер, которые используются для получения снимков с БПЛА и спутников.

3.1.1. Pinhole camera (Камера обскура)

Вся изложенная теория относительно моделей камер подробно описана в [12]. При построении гомографии использовалось предположение, что камера имеет pinhole-модель.

$$\begin{bmatrix} f & p_x & 0 \\ & f & p_y & 0 \\ & & 1 & 0 \end{bmatrix} = K \quad (1)$$

K — камера калибровки камеры,

f, p_x, p_y — внутренние параметры камеры: фокусное расстояние, координаты пересечения главной оптической оси с плоскостью изображения (Рис. 1).

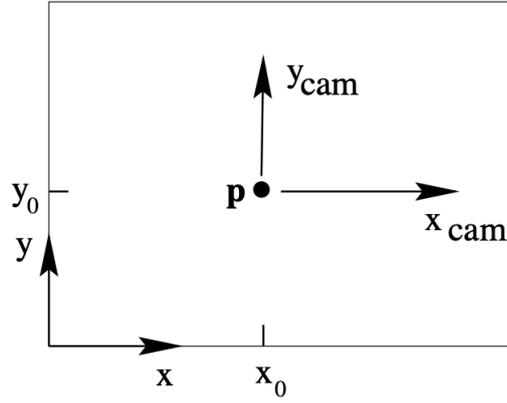


Рис. 1: Координаты пересечения главной оптической оси с плоскостью изображения

$$\begin{bmatrix} R & -RC \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = R[I|-C] \quad (2)$$

R , C — внешние параметры камеры.

Точка X в мировых однородных координатах переходит в точку x изображения по следующему правилу:

$$x = KR[I|\tilde{C}]X \quad (3)$$

Пусть

$$P = KR[I|-C] \quad (4)$$

C — координаты камеры в мировых координатах

$$t = -RC$$

Тогда матрица pinhole-камеры:

$$P = K[R|t] \quad (5)$$

3.1.2. Rational-polynomial camera

Rational-polynomial camera (RPC) — наиболее широко используемая модель камеры для получения спутниковых снимков высокого разрешения. Построение гомографии для данной модели описано в [10].

Описание модели Точке пространства в нормализованных мировых координатах ставится в соответствие точка изображения:

$$(lat_n, lon_n, hei_n) \rightarrow (samp_n, line_n)$$

$$samp_n, line_n$$

— координаты вдоль массива камеры и вдоль направления движения соответственно.

Связь между мировыми координатами и координатами изображения:

$$\begin{cases} samp_n = \frac{P_1^{fwd}(lat_n, lon_n, hei_n)}{P_2^{fwd}(lat_n, lon_n, hei_n)} \\ line_n = \frac{P_3^{fwd}(lat_n, lon_n, hei_n)}{P_4^{fwd}(lat_n, lon_n, hei_n)} \end{cases} \quad (6)$$

Обратное отображение:

$$\begin{cases} lat_n = \frac{P_1^{inv}(samp_n, line_n, hei_n)}{P_2^{inv}(samp_n, line_n, hei_n)} \\ lon_n = \frac{P_3^{inv}(samp_n, line_n, hei_n)}{P_4^{inv}(samp_n, line_n, hei_n)} \end{cases} \quad (7)$$

где

$$P(X, Y, Z) = \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=1}^{m_3} c_{ijk} X^i Y^j Z^k \quad (8)$$

Преобразование координат при гомографии Выражение (8) можно переписать для однородных координат следующим образом:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = \sum (a_i a_j a_k) x_i x_j x_k \quad (9)$$

$$x_1 \equiv 1, (a_i a_j a_k) (i, j, k \in 1, 2, 3, 4)$$

Пусть:

$$x_2 = lon_n, x_3 = lat_n, x_4 = hei_n$$

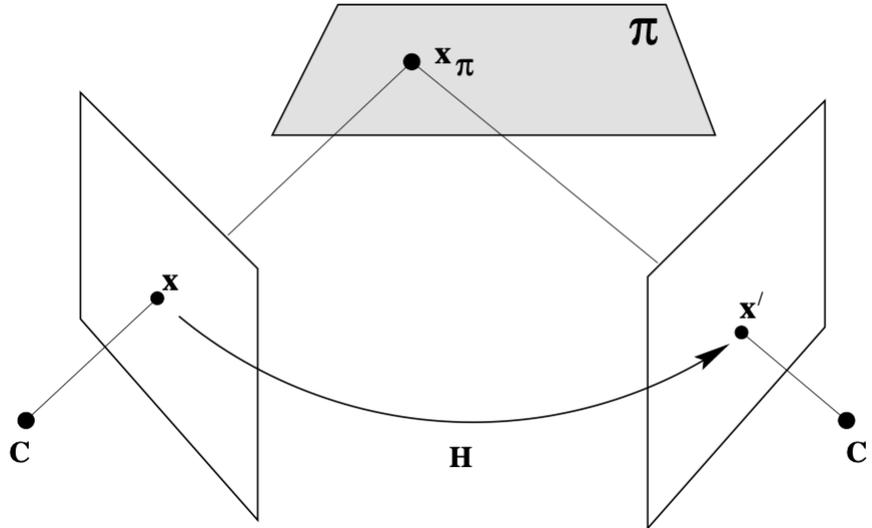


Рис. 2: Гомография индуцируется планарными поверхностями

Координаты в референсном изображении будут следующие:

$$\begin{cases} \text{sampr}_{r,n} = \frac{f_1^{fwd}(X_0)}{f_2^{fwd}(X_0)} \\ \text{line}_{r,n} = \frac{f_3^{fwd}(X_0)}{f_4^{fwd}(X_0)} \end{cases} \quad (10)$$

где $X_0 = (1, \frac{f_1^{inv}(X_s)}{f_2^{inv}(X_s)}, \frac{f_3^{inv}(X_s)}{f_4^{inv}(X_s)}, hei_n)$

3.2. Гомография изображений

Гомография — это проективное отображение из точек одной планарной поверхности в другую относительно заданной точки.

3.2.1. Построение гомографии через планарные поверхности

Проекции точки плоскости π на Рис. 1 на первое и второе изображение — x и x' соответственно, x соотносится с x' посредством гомографии. Плоскость π индуцирует гомографию между двумя изображениями. Гомография ставит в соответствие точкам из первого изображения точки

из второго таким образом, что пары соответствующих точек являются проекцией одной и той же точки на плоскости, которая индуцирует гомографию.

Луч, соответствующий точке x , продолжается до пересечения с плоскостью π в точке x_π ; эта точка проецируется в точку x' на другом изображении. Отображение от x до x' — это гомография, индуцированная плоскостью π .

Отображение между плоскостью π и плоскостью первого изображения задается уравнением:

$$x = H_{1\pi}x_\pi$$

Аналогично для второго изображения имеем:

$$x' = H_{2\pi}x_\pi$$

Композиция двух отображений — гомография между изображениями:

$$x' = H_{2\pi}H_{1\pi}^{-1}x$$

Если матрицы проекций камер для первого и второго изображения соответственно равны $P = [I|0]$ и $P' = [A|a]$ и плоскость π задана уравнением $\pi^T X = 0$, $\pi = (v^T, 1)^T$, тогда гомография порожденная плоскостью:

$$x' = Hx$$

$$H = A - av^T$$

3.3. Виды картографических проекций

В данном разделе будут описаны основные виды картографических проекций, в частности те, что имеют спутниковые снимки, использовавшиеся для проведения эксперимента. Картографическая проекция важна для задачи геопривязки изображений, так как вычисление мировых координат по координатам точки изображения зависит от вида картографической проекции.

3.3.1. Mercator

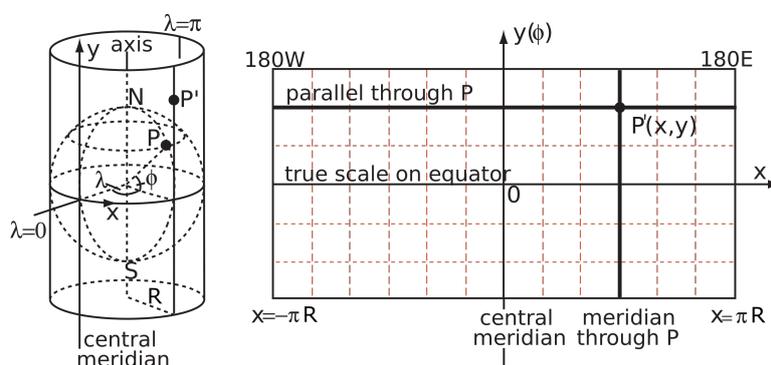


Рис. 3: Цилиндрическая проекция⁴

Проекция Меркатора представляет собой цилиндрическую проекцию земной поверхности. Данная проекция искажает размеры объектов по мере их удаления от экватора.

Карты таких провайдеров как Bing maps⁵, Google maps⁶, Open Street Map⁷, Yahoo! maps⁸ имеют проекцию меркатора.

⁴Цилиндрическая проекция [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Mercator_projection/media/File : Cylindrical_projection_basics2.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Mercator_projection/media/File:Cylindrical_projection_basics2.svg) (дата обращения 14.12.2023).

⁵Bing maps [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.microsoft.com/en-us/maps/bing-maps> (дата обращения 14.12.2023).

⁶Google maps [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.google.ru/maps> (дата обращения 14.12.2023).

⁷Open Street Map [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.openstreetmap.org/map=3/69.62/-74.90> (дата обращения 14.12.2023).

⁸Yahoo! maps [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.maps.net/yahoo-maps> (дата обращения 14.12.2023).

3.3.2. WGS84

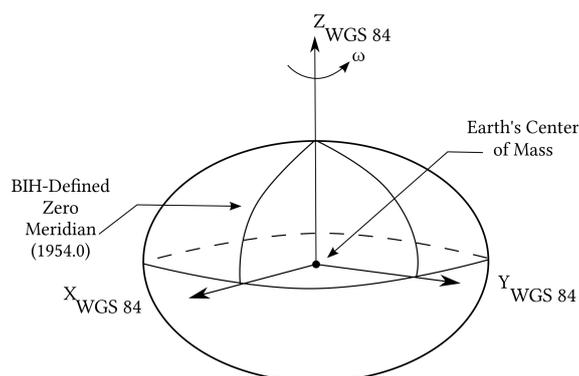


Рис. 4: WGS84⁹

WGS — World Geodetic System, всемирная система геодезических параметров Земли, используемая в картографии, геодезии и спутниковой навигации, например GPS. WGS84 — последняя версия стандарта. Начало координат WGS84 находится в центре масс Земли, модель данной системы координат — референсный эллипсоид, аппроксимирующий земную поверхность. Каждой точке земной поверхности ставится в соответствие три координаты — широта, долгота и высота над поверхностью Земли.

3.4. Классификация подходов

В данном разделе будут рассмотрены различные подходы к построению гомографии между двумя снимками земной поверхности.

3.4.1. Методы, основанные на извлечении признаков изображений

Данные методы извлекают ключевые точки из пары изображение-запрос + референсное изображение с помощью алгоритмов извлечения инвариантных признаков. Примером таких алгоритмов являются SIFT

⁹World Geodetic System [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/World_Geodetic_System/media/File:WGS84_reference_frame\(vector_graphic\).svg](https://en.wikipedia.org/wiki/World_Geodetic_System/media/File:WGS84_reference_frame(vector_graphic).svg) (дата обращения 14.12.2023).

(Scale Invariant Feature Transform) [14], ORB (Oriented FAST and rotated BRIEF) [18]. На основе найденных пар ключевых точек строится матрица гомографии с помощью алгоритма DLT (Direct Linear Transform). Чтобы получить оптимальную оценку преобразования, используется RANSAC (Random sample consensus) [12] (стр. 121-123). Методы, использующие данный подход, описаны в статье [19].

3.4.2. Прямые методы

Прямые методы ищут гомографию по всем точкам. Например, такими методами являются алгоритм Лукаса-Канаде [13], Affine Template Matching [8]. Алгоритм Лукаса-Канаде инициализирует начальные предположительные параметры гомографии и минимизирует функцию ошибки посредством градиентного спуска. В работе [8] используется метод ветвей и границ для возможных преобразований, чтобы найти оптимальное решение.

Алгоритм Лукаса-Канаде Данный алгоритм подробно описан в статье [13]. Алгоритм Лукаса-Канаде итеративно минимизирует выражение:

$$\min_{\Delta P} \left\| X_T + \frac{\partial W(X_T, 0)}{\partial P} \Delta P - W(X_I, P_k) \right\|_2^2$$

где P — гомография между изображениями, $P_k = P_{k-1} + (\Delta P)^{-1}$, W — функция, применяющая к X_I гомографию P_k , k - шаг итерации.

3.4.3. Основанные на использовании нейронных сетей

Данные подходы используют нейронные сети, чтобы найти гомографию между изображениями. Они делятся на алгоритмы без обучения и алгоритмы с обучением.

Методы с обучением Методы с обучением требуют в качестве абсолютной истины референсную гомографию, поэтому только сгенериро-

ванные пары изображений могут быть использованы в процессе обучения. Второе изображение получается из первого посредством применения преобразования. Недостаток таких методов заключается в том, что данные для обучения зачастую далеки от реальных случаев. Примером такого подхода может служить Homography Net [5]. Homography Net — глубокая сверточная нейронная сеть, которая непосредственно создает гомографию по паре изображений. Метод не требует отдельных шагов для определения углов и оценки гомографии, все параметры гомографии обучаются сквозным образом с использованием большого набора данных помеченных изображений.

Методы без обучения Примером метода без обучения может служить работа [20]. В данной реализации с помощью нейронной сети находят значение гомографии, которое минимизирует следующую функцию потерь:

$$L_{PW} = \frac{1}{x_i} \sum_{x_i} |I^A(\mathcal{H}(x_i)) - I^B(x_i)|$$

где \mathcal{H} — преобразование гомографии

I^B, I^A — изображение-запрос и референсное изображение
соответственно

Данная функция потерь не требует меток абсолютной истины.

3.4.4. Смешанные методы

Основанный на извлечении признаков и прямом методе Смешанные методы совмещают в себе несколько подходов одновременно (feature/direct/DNN). Примером совмещения метода, основанного на извлечении признаков, и прямого метода является работа [9]. Данный подход оперирует с плотной выборкой дескрипторов признаков изображений, для того чтобы найти значение гомографии. Метод совмещает в себе эффективность метода, основанного на извлечении признаков (его основным преимуществом является скорость работы), и точность прямого метода.

Основанный на нейросетевом подходе и прямом методе Примером таких решений являются статьи [4,21]. Алгоритм Лукаса-Канаде плохо оперирует с парой изображений разной яркости, поэтому в методе [21] сначала получили карты признаков изображения, чтобы применить к ним алгоритм поиска гомографии. Для получение карт признаков *reference* и *query* изображений используется сиамская нейронная сеть. Последний слой сети общий, в нем используется алгоритм Лукаса-Канаде для нахождения значения гомографии на картах признаков.

3.5. Обзор датасетов

В данном разделе будут перечислены и описаны датасеты, которые используются для экспериментов в задаче гепривязки изображений.

1. MSCOCO — используется в работе [21], состоит из наборов изображений различных сцен, которые предназначены для повышения уровня распознавания объектов. Подробнее в статье [15].
2. Google Earth¹⁰ — набор изображений земной поверхности, в котором доступны данные с разным датированием снимков.
3. Google Maps and Satellite — набор изображений разной модальности, предоставляемый Google Static Map API¹¹.
4. Sentinel-2¹² — широкомасштабная многоспектральная съемка с высоким разрешением, поддерживающая исследования Copernicus по мониторингу суши. Содержит изображения земной поверхности разрешения 10, 20 и 60 м/пиксель.

¹⁰Google Earth [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.google.ru/intl/ru/earth/> (дата обращения 12.12.2023).

¹¹Google Static Map API [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://developers.google.com/maps/documentation/maps-static/start?hl=en> (дата обращения 14.12.2023).

¹²Sentinel-2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (дата обращения 14.12.2023).

3.6. Используемые для оценки гомографии метрики

Для оценки гомографии были выявлены следующие метрики:

1. Mean Average Corner Error [6], [5], [7], [17].
2. RMSE [20].
3. Pixel Error [7].

Также в книге [12] (стр. 93-104) подробно изложены следующие метрики:

1. Algebraic distance.
2. Transfer error.
3. Symmetric transfer error.
4. Reprojection error.

3.7. Алгоритмы геопривязки изображений

Примером решения, в котором осуществляется геопривязка изображения, является [11]. В данном методе на основе ключевых точек вычисляется гомография между изображениями. Для всех возможных референсных орто-изображений¹³ известны их географические координаты правого верхнего и левого нижнего углов. Затем вычисляют координаты центра изображения-запроса исходя из найденной гомографии: находятся координаты центра полигона, который соответствует границам query-изображения под действием гомографии. Расчет географических координат для любого пикселя референсного изображения производится следующим образом:

$$\begin{aligned}lat &= lat_t + y/height * (lat_b - lat_t) \\lon &= lon_t + x/width * (lon_b - lon_t)\end{aligned}$$

¹³Орто-изображение — точное изображение поверхности Земли, скорректированное с учетом топографического рельефа, искажения объектива и наклона камеры, равномерного масштаба относительно картографической проекции.

где lat_t, lat_b — широта левого верхнего и правого нижнего углов референсного изображения

lon_t, lon_b — долгота левого верхнего и правого нижнего углов референсного изображения

4. Методы

4.1. Нахождение гомографии между изображениями по парам ключевых точек

Основа метода на ключевых точках - метод `findHomography` из библиотеки `OpenCV`¹⁴, который по парам ключевых точек вычисляет проективное преобразование между изображениями. Метод возвращает матрицу гомографии между двумя изображениями, по данной матрице можно вычислить координаты любой точки query-изображения в reference-изображении. Расчет координат точки query-изображения в reference-изображении:

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \end{bmatrix}$$

- произведение матрицы гомографии на вектор-столбец координат точки в query-изображении. Далее преобразуем полученные координаты точки (x'_1, x'_2) в гео-координаты следующим образом:

$$\begin{aligned} lat &= lat_t + \frac{y}{height \times (lat_b - lat_t)} \\ lon &= lon_t + \frac{x}{width} \times (lon_b - lon_t) \end{aligned}$$

где lat_t, lat_b – широта верхнего левого и нижнего правого углов reference-изображения соответственно, аналогично для lon_t, lon_b , $height$ и $width$ – длина и ширина изображения. В данном случае предполагаем что оптическая ось камеры спутника направлена перпендикулярно поверхности Земли.

¹⁴OpenCV [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://opencv.org> (дата обращения 07.01.2024).

5. Эксперименты

5.1. Тестовые данные

Тестовые данные состоят из пар изображений, каждая пара содержит спутниковое и снятое БПЛА изображение. Всего 44 изображений с БПЛА, покрывающих зону подмосковья и предоставленных лабораторией Skoltech. Спутниковые карты взяты у следующих провайдеров: ESRI World Imagery и Google satellite. Для получения спутниковых данных использовалась геоинформационная система QGIS¹⁵. Спутниковые карты покрывают интересующую зону (поселок Клишево), каждый из наборов состоит из 25 изображений в формате TIFF¹⁶, каждый снимок имеет разрешение .

	размеры изображения	картографическая проекция
Google Satellite	800 × 507	Mercator
ESRI	800 × 507	Geodetic alias ¹⁷ (lat, lon)

5.2. Описание экспериментов

Целью эксперимента является определение точности метода вычисления гомографии, основанного на ключевых точках, а также сравнение работы данного метода на спутниковых данных от разных провайдеров. Для нахождения гомографии между парами снимков использо-

¹⁵QGIS [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://qgis.org/ru/site/> (дата обращения 07.01.2024).

¹⁶TIFF — tagged image file format, формат изображения, использующийся для хранения растровых снимков с метаданными.

¹⁷Geodetic alias сопоставляет точке её широту и долготу.

вался алгоритм из библиотеки OpenCV (см. раздел 4.1). Для каждой пары изображений считалась матрица гомографии и ошибка репроекции на парах ключевых точек. Ошибка репроекции:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|\bar{x} - x'\|$$

где \bar{x} - ground truth координаты точки в спутниковом изображении, x' - координаты точки из изображения с БПЛА под действием гомографии.

5.3. Полученные результаты

Первый эксперимент

провайдер	матожидание ошибки ре- проекции	стандартное отклонение	min	max
<i>ESRI</i>	29	26	7	110
<i>GoogleSatellite</i>	25	24	4	143

Таблица 1: Ошибка репроекции на парах спутниковый снимок + снимок с БПЛА в пикселях

Ошибка репроекции в паре, состоящей из Google Satellite и БПЛА изображений, наименьшая.

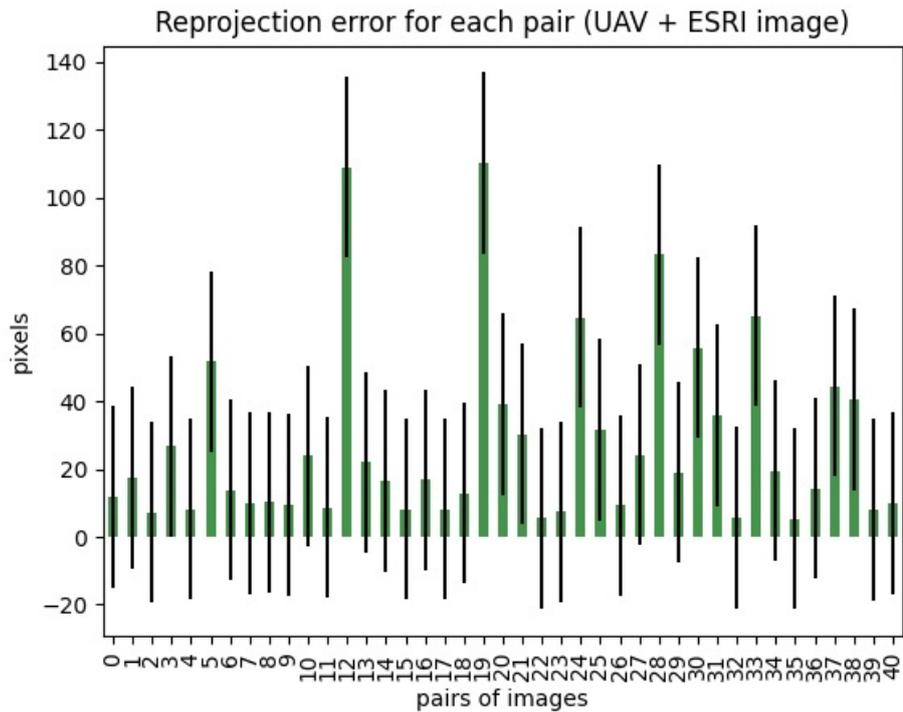


Рис. 5: Столбчатая диаграмма ошибки репроекции для набора изображений ESRI

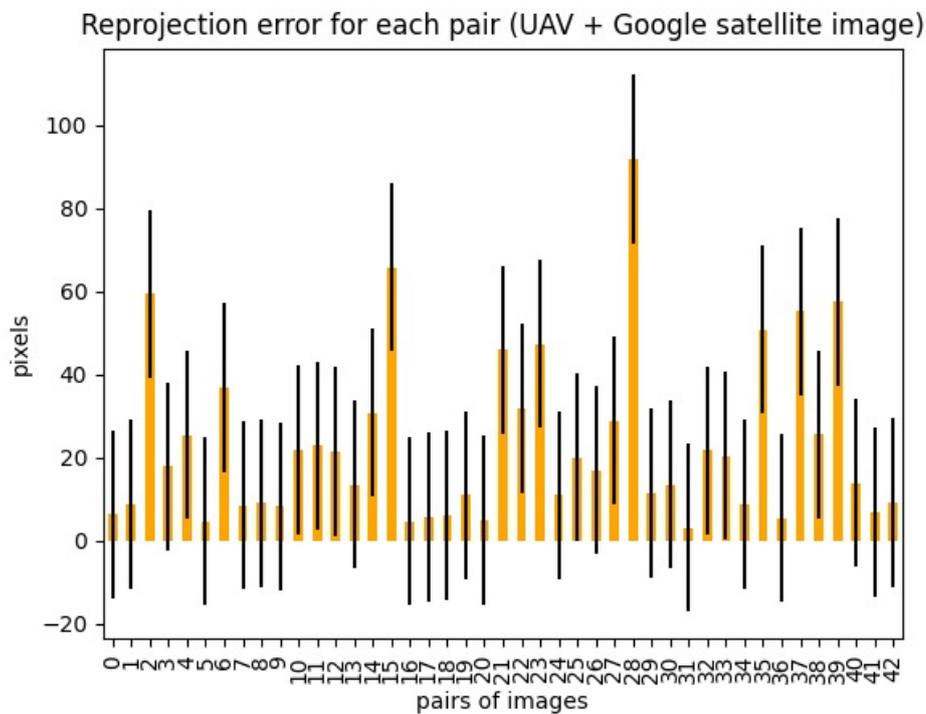


Рис. 6: Столбчатая диаграмма ошибки репроекции для Google Satellite набора изображений

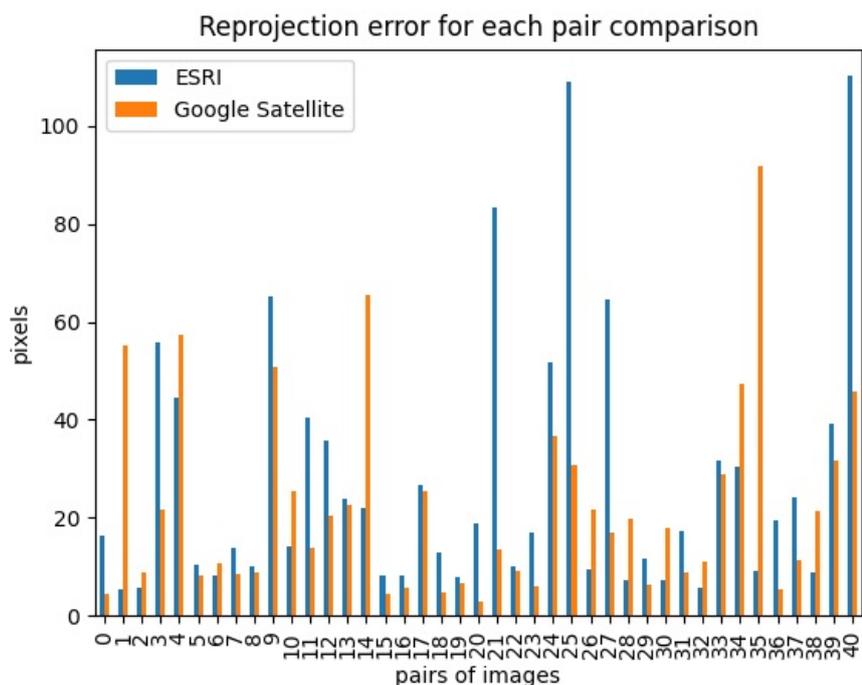


Рис. 7: Сравнение ошибки репроекции на каждой паре для провайдеров спутниковых данных

6. Заключение

В рамках данной работы были выполнены следующие задачи:

1. Выполнен обзор существующих решений задачи геопривязки изображений с БПЛА на основе спутниковых снимков, а также обзор использованных датасетов. Выбрана подходящая метрика для оценки точности методов.
2. Поставлены эксперименты с найденными методами на предложенных данных.
3. Реализован метод для геопривязки изображений¹⁸.

Дальнейшие планы для данной работы:

1. Провести эксперименты на других найденных методах и сравнить полученные результаты с уже имеющимися.
2. Добавить новые методы в инструмент геопривязки.

¹⁸Ссылка на реализованный инструмент геопривязки: <https://github.com/AnNyiiik/AlignmentOfUAVImages>

Список литературы

- [1] Autonomous UAV with vision based on-board decision making for remote sensing and precision agriculture / Bilal Hazim Younus Al-salam, Kye Morton, Duncan Campbell, Felipe Gonzalez // 2017 IEEE Aerospace Conference / IEEE. — 2017. — P. 1–12.
- [2] Balamurugan Ganesan, Valarmathi J, Naidu VPS. Survey on UAV navigation in GPS denied environments // 2016 International conference on signal processing, communication, power and embedded system (SCOPE5) / IEEE. — 2016. — P. 198–204.
- [3] Capture of UAVs through gps spoofing using low-cost SDR platforms / João Gaspar, Renato Ferreira, Pedro Sebastião, Nuno Souto // Wireless Personal Communications. — 2020. — Vol. 115. — P. 2729–2754.
- [4] Chang Che-Han, Chou Chun-Nan, Chang Edward Y. Clkn: Cascaded lucas-kanade networks for image alignment // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. — 2017. — P. 2213–2221.
- [5] DeTone Daniel, Malisiewicz Tomasz, Rabinovich Andrew. Deep image homography estimation // arXiv preprint arXiv:1606.03798. — 2016.
- [6] Deep homography estimation for dynamic scenes / Hoang Le, Feng Liu, Shu Zhang, Aseem Agarwala // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. — 2020. — P. 7652–7661.
- [7] Erlik Nowruzi Farzan, Laganieri Robert, Japkowicz Nathalie. Homography estimation from image pairs with hierarchical convolutional networks // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision workshops. — 2017. — P. 913–920.
- [8] Fast-match: Fast affine template matching / Simon Korman, Daniel Reichman, Gilad Tsur, Shai Avidan // Proceedings of the IEEE

Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2013. — P. 2331–2338.

- [9] Feature-based lucas–kanade and active appearance models / Epameinondas Antonakos, Joan Alabort-i Medina, Georgios Tzimiropoulos, Stefanos P Zafeiriou // IEEE Transactions on Image Processing. — 2015. — Vol. 24, no. 9. — P. 2617–2632.
- [10] Gao Jian, Liu Jin, Ji Shunping. Rational polynomial camera model warping for deep learning based satellite multi-view stereo matching // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. — 2021. — P. 6148–6157.
- [11] Gurgu Marius-Mihail, Queralta Jorge Peña, Westerlund Tomi. Vision-Based GNSS-Free Localization for UAVs in the Wild // 2022 7th International Conference on Mechanical Engineering and Robotics Research (ICMERR) / IEEE. — 2022. — P. 7–12.
- [12] Hartley Richard, Zisserman Andrew. Multiple view geometry in computer vision. — Cambridge university press, 2003.
- [13] Lucas Bruce D, Kanade Takeo. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // IJCAI’81: 7th international joint conference on Artificial intelligence. — Vol. 2. — 1981. — P. 674–679.
- [14] Markel John. The SIFT algorithm for fundamental frequency estimation // IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. — 1972. — Vol. 20, no. 5. — P. 367–377.
- [15] Microsoft coco: Common objects in context / Tsung-Yi Lin, Michael Maire, Serge Belongie et al. // Computer Vision–ECCV 2014: 13th European Conference, Zurich, Switzerland, September 6-12, 2014, Proceedings, Part V 13 / Springer. — 2014. — P. 740–755.
- [16] Mughal Muhammad Hamza, Khokhar Muhammad Jawad, Shahzad Muhammad. Assisting UAV localization via deep con-

- textual image matching // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.— 2021.— Vol. 14.— P. 2445–2457.
- [17] Niblick David, Kak Avinash. Homography estimation with convolutional neural networks under conditions of variance // arXiv preprint arXiv:2010.01041.— 2020.
- [18] ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF / Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige, Gary Bradski // 2011 International conference on computer vision / Ieee.— 2011.— P. 2564–2571.
- [19] RF-Net: An end-to-end image matching network based on receptive field / Xuelun Shen, Cheng Wang, Xin Li et al. // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition.— 2019.— P. 8132–8140.
- [20] Unsupervised deep homography: A fast and robust homography estimation model / Ty Nguyen, Steven W Chen, Shreyas S Shivakumar et al. // IEEE Robotics and Automation Letters.— 2018.— Vol. 3, no. 3.— P. 2346–2353.
- [21] Zhao Yiming, Huang Xinming, Zhang Ziming. Deep lucas-kanade homography for multimodal image alignment // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition.— 2021.— P. 15950–15959.