

Алгоритмы автоматической идентификации объектов на разнородных изображениях и совмещения изображений

А.И. Новиков¹, А.И. Ефимов¹, Д.А. Колчаев¹

¹Рязанский государственный радиотехнический университет, Гагарина 59/1, Рязань, Россия, 390005

Аннотация. Актуальность формирования 3D изображений в системах технического зрения авиационного применения обусловлена необходимостью решения многих задач вертолетной и беспилотной авиацией. К ним относятся задачи монтирования с помощью вертолета различных технических установок, спасение живой силы в условиях сложного рельефа, посадка вертолета на незнакомые площадки. В предлагаемой работе исследуется возможность применения двух альтернативных методов для формирования 3D изображений подстилающей поверхности из последовательности 2D изображений, полученных с помощью стереопары, расположенной на борту летательного аппарата. Первый метод основан на распространении алгоритма совмещения плоских изображений с помощью матрицы гомографии на трехмерный случай. Математический аппарат, разработанный для случая плоской гомографии с произвольным числом ключевых точек обобщен на трехмерный случай. Матрица гомографии учитывает все виды деформаций облаков точек (сдвиг, поворот, изменение масштаба) и позволяет получать конечное решение за один шаг. Второй метод совмещения облаков точек основан на использовании итеративной процедуры последовательного уточнения преобразования одного облака точек к другому. На каждой итерации находятся ключевые точки с помощью алгоритма FAST, соответствие между ними устанавливается с использованием алгоритма неплотного оптического потока, а оптимальная оценка матрицы вращений находится в соответствии с алгоритмом Кабша.

1. Введение

В докладе приведено содержание и результаты исследования двух методов реконструкции 3D изображений подстилающей поверхности в плоскости Земли на основании последовательности плоских видеоизображений этой поверхности, полученных с борта летательного аппарата (ЛА). Предполагается, что обработка изображений должна проводиться в бортовом вычислителе ЛА в режиме реального времени. Процесс реконструкции 3D изображений подстилающей поверхности сопряжен с решением нескольких взаимосвязанных задач: формирования последовательности облаков точек на основании карт глубин и матрицы, содержащей параметры камеры; нахождения ключевых точек на паре соседних изображений и установления соответствия между ними; совмещения текущего и предшествующего облаков точек. Преобразование одного облака точек к другому предполагает выполнение двух преобразований: выполнение поворота облака точек в пространстве и сдвиг вдоль вектора. Искомые преобразования могут выполняться одновременно в рамках преобразования с

помощью матрицы гомографии, либо последовательно и, как правило, в результате нескольких итераций.

2. Объект исследования

Объектом исследования является процесс преобразования 2D изображений подстилающей поверхности в облака точек в пространстве R^3 с последующим «сшиванием» этих облаков в единое 3D изображение. Математическая постановка задачи сшивания облаков такова. Даны два облака точек $V = \{M_i(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^n$ и $V' = \{M'_i(x'_i, y'_i, z'_i)\}_{i=1}^m$ в пространстве R^3 . Второе облако точек смещено и повернуто в пространстве относительно первого облака. В первом и втором облаках точек есть некоторое множество k ($k \leq \min(n, m)$) точек, являющихся образами одинаковых точек реальной сцены. Эти точки называются соответствующими. Множество $G = \{M_j, M'_j\}_{j=1}^k$ соответствующих точек является основой для определения параметров преобразования F , позволяющего «сшить» две поверхности (два облака точек). Искомое преобразование F ($X = F(X')$) включает в себя подлежащие определению матрицу поворота $R = (r_{ij})_{i,j=1}^3$ и вектор сдвига $t = (t_x, t_y, t_z)^T$:

$$X = R \cdot X' + t = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

Параметры преобразования F находятся из условия

$$[R|t] = \arg \min_{R,t} \|X - R \cdot X' - t\|^2 \quad (2)$$

Здесь $X = (x \ y \ z)^T$ и $X' = (x' \ y' \ z')^T$ - векторы-столбцы, элементами которых являются координаты соответствующих точек из сшиваемых облаков точек.

Решение задачи совмещения двух облаков точек требует решения двух частных задач:

1) формирование множества $G = \{M_j, M'_j\}_{j=1}^k$ пар соответствующих точек в совмещаемых облаках точек;

2) определение параметров преобразования F (матрицы поворота R и вектора сдвига t).

Наиболее сложной из них является первая задача. Известные методы ее решения можно разделить на три группы:

- 1) идентификация поверхностных особенностей сравниваемых множеств точек [1];
- 2) использование сигнатур спин-изображений [2, 3];
- 3) полный перебор точек в сопоставляемых облаках [4].

Правильное установление взаимосвязей между соответствующими частями пары облаков точек позволяет выполнить их совмещение за один шаг. В противном случае приходится использовать многоступенчатые процедуры совмещения, уменьшающие последовательно ошибку, но требующие соответственно больших затрат машинного времени на их реализацию.

3. Методы исследования

Для формирования множества $G = \{M_j, M'_j\}_{j=1}^k$ соответствующих точек авторами разработан алгоритм, основанный на использовании сигнатур спин-изображений [2, 3]. Общая схема предлагаемого метода для регулярной сетки такова. В каждой точке M_{i_0} одного и второго облаков точек методом наименьших квадратов находятся оценки \hat{a}, \hat{b} коэффициентов a, b уравнения плоскости $z = ax + by$, проходящей через данную точку. Оптимальные оценки \hat{a}, \hat{b} находятся в результате минимизации уклонения искомой плоскости от некоторого множества

точек $\{M_{i_0}^t\}_{t=1}^t$, $t = 4s(s+1)$ из квадратной окрестности размером $(2s+1) \times (2s+1)$ точки M_{i_0} . Указанные оценки \hat{a}, \hat{b} необходимы для формирования в каждой точке вектора нормали $\mathbf{n} = (\hat{a}, \hat{b}, -1)$. Все векторы нормалей нормируются $\left(\mathbf{n}^0 = \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|} \right)$.

Каждой точке M_{i_0} из одного и второго облаков точек ставится в соответствие t -мерный вектор $\{\gamma_j, \alpha_j, \beta_j\}_{j=1}^t$, элементами которого являются тройки чисел $(\gamma_j, \alpha_j, \beta_j)$ - дескрипторы точки M_{i_0} . Здесь:

γ_j - угол между вектором нормали $\mathbf{n}_{i_0}^0$ текущей точки M_{i_0} и вектором \mathbf{n}_j^0 , $j \in \{1, 2, \dots, t\}$ точки M_j из окрестности точки M_{i_0} ;

β_j - алгебраическая проекция на вектор $\mathbf{n}_{i_0}^0$ вектора $\overline{M_{i_0}M_j}$, то есть $\beta_j = \text{Pr}_{\mathbf{n}_{i_0}^0} \overline{M_{i_0}M_j} = (\overline{M_{i_0}M_j}, \mathbf{n}_{i_0}^0)$; $\alpha_j = \sqrt{|\overline{M_{i_0}M_j}|^2 - \beta_j^2}$.

Сравнение дескрипторов точек из одного и второго облаков точек производится по следующему алгоритму. Пусть $\{\gamma_j^{(1)}, \alpha_j^{(1)}, \beta_j^{(1)}\}_{j=1}^t$ - множество дескрипторов фиксированной точки $M_{i_0}^{(1)}$ из первого облака, а $\{\gamma_j^{(2)}, \alpha_j^{(2)}, \beta_j^{(2)}\}_{j=1}^t$ - множество дескрипторов некоторой произвольной точки $M_i^{(2)}$ из второго облака, проверяемой на соответствие точке $M_{i_0}^{(1)}$. Для каждой точки $M_i^{(2)}$ из второго облака сначала проверяется условие близости по каждому параметру, а именно в цикле по j от 1 до t проверяется выполнение условий: $|\gamma_j^{(1)} - \gamma_j^{(2)}| < \varepsilon_1$, $|\alpha_j^{(1)} - \alpha_j^{(2)}| < \varepsilon_2$, $|\beta_j^{(1)} - \beta_j^{(2)}| < \varepsilon_3$. Здесь $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ - заданные числа. Если хотя бы для одного значения индекса j хотя бы одно из трех условий не выполнено, то осуществляется переход к новой точке второго облака. В противном случае находятся суммы

$$\sum \gamma(M_i^{(2)}) = \sum_{j=1}^t |\gamma_{i_0j}^{(1)} - \gamma_{ij}^{(2)}|, \quad \sum \alpha(M_i^{(2)}) = \sum_{j=1}^t |\alpha_{i_0j}^{(1)} - \alpha_{ij}^{(2)}|, \quad \sum \beta(M_i^{(2)}) = \sum_{j=1}^t |\beta_{i_0j}^{(1)} - \beta_{ij}^{(2)}|, \quad i \in I. \quad (3)$$

Для каждой суммы в составе (3) находятся точки $M_s^{(2)}$, $s=1, 2, 3$, в каждой из которых достигается минимум соответствующей суммы из (3)

$$M_{i_1}^{(2)} = \arg \min_{M_i^{(2)}} \sum \gamma(M_i^{(2)}), \quad M_{i_2}^{(2)} = \arg \min_{M_i^{(2)}} \sum \alpha(M_i^{(2)}), \quad M_{i_3}^{(2)} = \arg \min_{M_i^{(2)}} \sum \beta(M_i^{(2)}) \quad (4)$$

Если $i_1 = i_2 = i_3 = i^*$, то точка $M_{i^*}^{(2)}$ из второго облака идентифицируется как соответствующая точке $M_{i_0}^{(1)}$ из первого облака. В противном случае точка $M_i^{(2)}$ признается не соответствующей точке $M_{i_0}^{(1)}$.

Описанный алгоритм формирования пар соответствующих точек был апробирован на модельной паре облаков точек. Первое облако точек V является поверхностью гиперболического параболоида

$$V = \left\{ (x, y, z) \left| z = \frac{x^2}{50} - \frac{y^2}{75}, x = -10, 20; y = -8, 8 \right. \right\}.$$

Второе облако точек получено по аналогичной формуле и с теми же координатами по оси Oy , но со смещением по оси Ox

$$V' = \left\{ (x, y, z) \left| z = \frac{x^2}{50} - \frac{y^2}{75}, x = \overline{10,30}; y = \overline{-8,8} \right. \right\}.$$

Первое и второе облако точек имеют общую часть (область перекрытия) в количестве 187 точек: по координате x от 10 до 20, а по координате y - от -8 до 8. Оба облака точек представлены на рисунке 1.

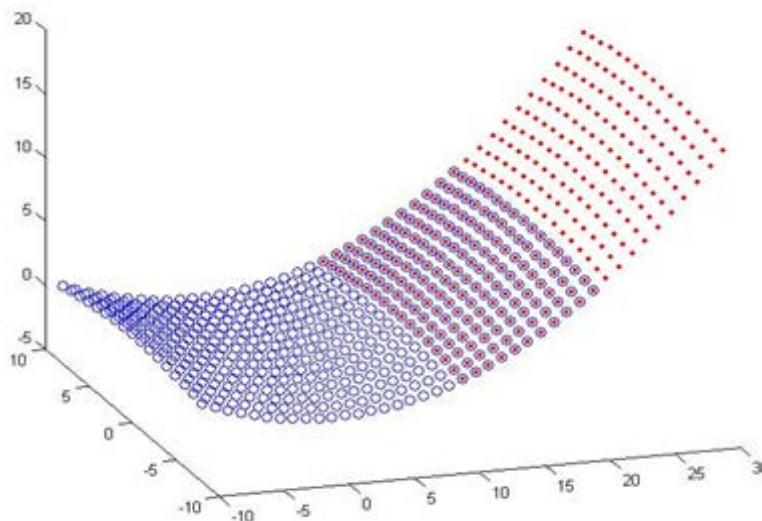


Рисунок 1. Первое и второе облака точек до преобразования.

Точки первого облака выделены окружностями синего цвета, а второго облака – красными квадратиками. Область пересечения облаков точек хорошо видна на рис. 1 как горизонтальная полоса из совмещенных точек первого и второго облаков в промежутке от 10 до 20 по оси Ox .

После формирования облаков точек второе облако подверглось преобразованиям сдвига и поворота. По координате z был выполнен сдвиг на 25 единиц, то есть вектор сдвига t имеет вид $t = (0, 0, 25)^T$. Затем оно было повернуто относительно каждой из трех осей Oz , Oy и Ox , на углы соответственно $3^\circ, 3^\circ, 6^\circ$. Поворот осуществлялся в указанной последовательности: сначала в плоскости крена на угол $\gamma = \frac{\pi}{30}$, затем в плоскости тангажа на угол $\theta = \frac{\pi}{60}$ и в заключение - в плоскости курса на угол $\psi = \frac{\pi}{60}$. В результате получена матрица поворота (5).

$$R(\psi, \theta, \gamma) = T(\psi) \cdot T(\theta) \cdot T(\gamma) = \begin{pmatrix} 0,9973 & -0,0466 & 0,0574 \\ 0,0523 & 0,9934 & -0,1017 \\ -0,0523 & 0,1044 & 0,9932 \end{pmatrix} \tag{5}$$

Результат преобразования точек второго облака по формуле (1) приведен на рисунке 2. Выполним теперь поиск соответствующих точек в паре облаков с помощью алгоритма (3)-(4). Результаты работы алгоритма представлены на рисунке 3.

Анализ полученных соответствий между точками двух поверхностей показал, что они найдены правильно. Однако алгоритм «отсеял» и некоторое множество истинных соответствий, оставив лишь 45 пар точек. В данном случае, как увидим ниже, этого количества точек вполне достаточно для выполнения корректного совмещения поверхностей.

Совмещение преобразованного облака точек (рисунок 2) с помощью алгоритма ICP, представленного стандартной программой из пакета MATLAB [12], приведено на рисунке 4.

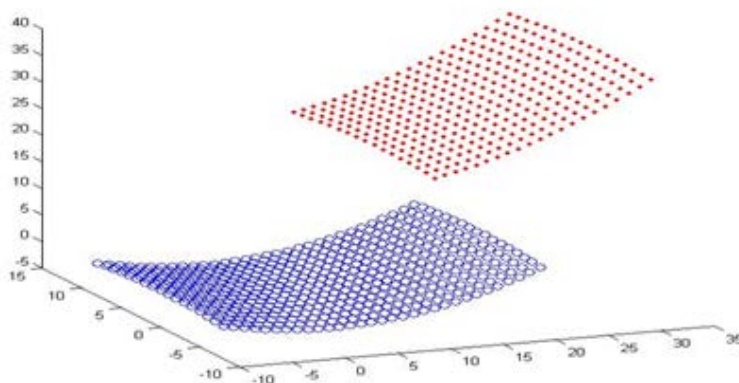


Рисунок 2. Облака точек после преобразования второго облака.

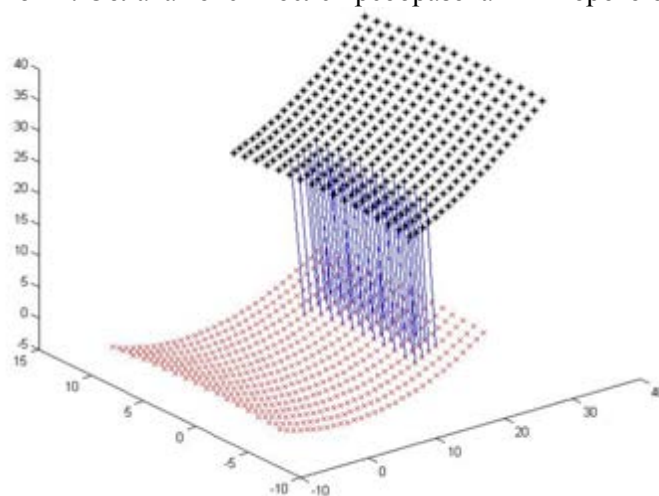


Рисунок 3. Найденные соответствия между точками в паре облаков.

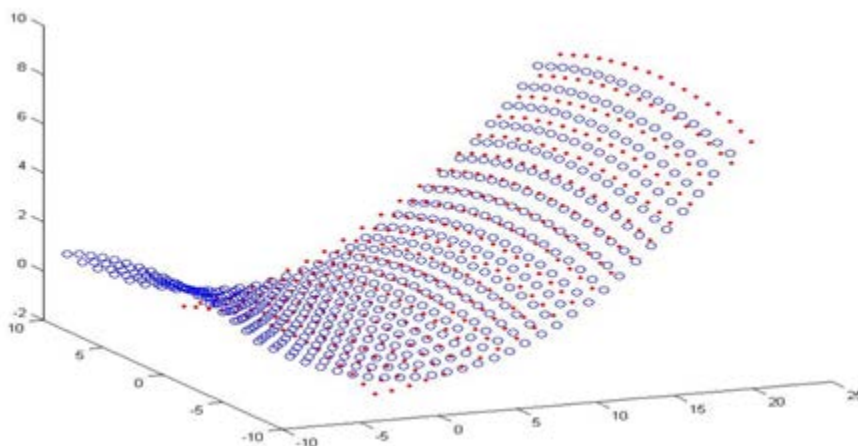


Рисунок 4. Результат преобразования облаков точек с помощью алгоритма ICP.

Как и следовало ожидать, в соответствии с логикой алгоритма ICP совмещение выполнено таким образом, что минимальным оказалось расстояние между всеми точками первого и второго облаков точек. Тогда как результат совмещения должен совпадать с положением облаков точек, приведенном на рисунке 1.

По аналогии с решением задачи совмещения двумерных изображений с помощью матрицы гомографии задачу совмещения (сшивания) двух облаков точек $V = \{x_i, y_i, z_i\}_{i=1}^n$ и

$V = \{x'_i, y'_i, z'_i\}_{i=1}^n$ можно решить с помощью гомографии в пространстве R^3 . Будем искать такую матрицу

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{41} & h_{41} & 1 \end{pmatrix},$$

которая обеспечивала бы выполнение следующих матричных равенств в однородных координатах

$$\begin{pmatrix} \lambda x_i \\ \lambda y_i \\ \lambda z_i \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \\ 1 \end{pmatrix} \tag{6}$$

В составе матрицы $H_{4 \times 4}$ подматрица $R = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix}$ - отвечает за вращение облака

точек, а подматрица $T = (h_{14} \ h_{24} \ h_{34})^T$ - за сдвиг облака точек.

Исключив параметр λ из системы уравнений (6), получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для каждой пары $M_i(x_i, y_i, z_i)$ и $M'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$, $i = \overline{1, k}$ соответствующих точек из совмещаемых облаков точек

$$\begin{cases} x'_i h_{11} + y'_i h_{12} + z'_i h_{13} + h_{14} - x'_i x_i h_{41} - y'_i x_i h_{42} - z'_i x_i h_{43} = x_i, \\ x'_i h_{21} + y'_i h_{22} + z'_i h_{23} + h_{24} - x'_i y_i h_{41} - y'_i y_i h_{42} - z'_i y_i h_{43} = y_i, \\ x'_i h_{31} + y'_i h_{32} + z'_i h_{33} + h_{34} - x'_i z_i h_{41} - y'_i z_i h_{42} - z'_i z_i h_{43} = z_i. \end{cases}$$

или в матричном виде $A \cdot G_H = B$. Здесь: A - блочная матрица размером $3k \times 15$:

$$A_{3k \times 15} = \begin{pmatrix} Z & O & O & W_1 \\ O & Z & O & W_2 \\ O & O & Z & W_3 \end{pmatrix}$$

с блоками в виде матриц $Z_{k \times 4} = (x_i, y_i, z_i, 1)_{i=1}^k$, $W_1 = (-x_i x'_i, -y_i x'_i, -z_i x'_i)_{i=1}^k$, $W_2 = (-x_i y'_i, -y_i y'_i, -z_i y'_i)_{i=1}^k$, $W_3 = (-x_i z'_i, -y_i z'_i, -z_i z'_i)_{i=1}^k$; O - нулевая матрица размером $k \times 4$, G_H - вектор-столбец неизвестных размером 15×1 :

$G_H = (h_{11} \ h_{12} \ h_{13} \ h_{14} \ h_{21} \ h_{22} \ h_{23} \ h_{24} \ h_{31} \ h_{32} \ h_{33} \ h_{34} \ h_{41} \ h_{42} \ h_{43})^T$; B - вектор-столбец свободных членов $B = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_k \ y_1 \ y_2 \ \dots \ y_k \ z_1 \ z_2 \ \dots \ z_k)^T$ размером $3k \times 1$. Матрицы W_1, W_2, W_3 имеют размер $k \times 3$ ($\dim W_i = k \times 3, i = 1, 2, 3$).

Из-за ошибок измерений матричное равенство (6) может не выполняться для некоторых точек из облаков точек. Будем искать матрицу H , которая минимизирует расстояние между точками одного множества и прообразами другого. Задачи нахождения матриц гомографии при преобразовании одного множества точек к другому множеству точек с произвольным количеством точек в них как в двумерном случае, так и в трехмерном формулируются одинаково

$$\|AG_H - B\|_{G_H}^2 \rightarrow \min. \tag{7}$$

Здесь $\|(\cdot)\|$ - евклидова норма.

Решение задачи (7) при трехмерной гомографии методом наименьших квадратов приводит к нормальной СЛАУ [5]

$$(A^T A)G_H = A^T B \tag{8}$$

с основной матрицей

$$A^T A = \begin{pmatrix} Z^T Z & O_{4 \times 4} & O & Z^T W_1 \\ O & Z^T Z & O & Z^T W_2 \\ O & O & Z^T Z & Z^T W_3 \\ W_1^T Z & W_2^T Z & W_3^T Z & \sum_{i=1}^3 W_i^T W_i \end{pmatrix}.$$

Правая часть нормального уравнения (8) имеет следующий вид:

$$A^T B = \left(Z^T B_1 \quad Z^T B_2 \quad Z^T B_3 \quad \sum_{i=1}^3 W_i^T B_i \right)^T. \quad \text{В этих выражениях } B_1 = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_k)^T,$$

$B_2 = (y_1 \ y_2 \ \dots \ y_k)^T$, $B_3 = (z_1 \ z_2 \ \dots \ z_k)^T$ - вектор-столбцы размером $k \times 1$.

Применим алгоритм трехмерной гомографии к совмещению облаков точек, изображенных на рис. 2. Система линейных алгебраических уравнений, вытекающая из матричного равенства (8), состоит из 45 уравнений относительно 15 неизвестных – элементов матрицы гомографии в трехмерном случае – и является переопределенной СЛАУ. Нормальное псевдорешение [6, 7] этой системы находилось как решение СЛАУ (8).

Матрица гомографии, полученная в результате решения СЛАУ (8) и обеспечивающая совмещение облаков точек (преобразование первого облака точек ко второму), имеет следующий вид

$$H = \begin{pmatrix} 0,997 & -0,047 & 0,057 & 2,58 \cdot 10^{-10} \\ 0,052 & 0,993 & -0,102 & 7,16 \cdot 10^{-12} \\ -0,052 & 0,104 & 0,993 & 25,0 \\ -2,29 \cdot 10^{-12} & -2,36 \cdot 10^{-15} & 3,69 \cdot 10^{-12} & 1 \end{pmatrix} \tag{9}$$

Отметим, что подматрица $H_R = \begin{pmatrix} 0,997 & -0,047 & 0,057 \\ 0,052 & 0,993 & -0,102 \\ -0,052 & 0,104 & 0,993 \end{pmatrix}$ в ее составе, являющаяся оценкой

матрицы поворота, в пределах выбранной точности ($\varepsilon = 10^{-5}$) совпадает с заданной матрицей $R(\psi, \theta, \gamma)$ (5). Подматрица $H_t = \begin{pmatrix} 2,58 \cdot 10^{-10} & 7,16 \cdot 10^{-12} & 25,0 \end{pmatrix}$ также дает практически точную оценку вектора сдвига t . Результат сшивания облаков точек с помощью полученной матрицы гомографии естественно практически идеальный.

Исследуем теперь влияние ошибок в определении координат точек в облаках точек на точность совмещения поверхностей с помощью матрицы гомографии. Добавим к координате z в каждом облаке точек нормально распределенную случайную составляющую с нулевым математическим ожиданием и с заданным уровнем шума. Выполним два эксперимента. В первом $\sigma = 0,01$, а во втором $\sigma = 0,1$.

При уровне шума $\sigma = 0,01$ матрица гомографии,

$$H = \begin{pmatrix} 0,996 & -0,046 & 0,060 & 0,009 \\ 0,053 & 0,993 & -0,103 & -0,006 \\ -0,052 & 0,104 & 0,993 & 24,985 \\ -7,46 \cdot 10^{-5} & 2,70 \cdot 10^{-5} & 0,0001 & 1 \end{pmatrix}$$

найденная по зашумленным данным, изменяется незначительно по сравнению с матрицей гомографии (9), полученной в примере без шума. В подматрице H_R вращений значения элементов изменились не более, чем на 0,001. Существенные изменения претерпели элементы четвертой строки матрицы, хотя их новые значения не могут повлиять значимо на результаты

преобразования облака точек. Незначительными на визуальном уровне кажутся и изменения в результатах совмещения поверхностей (рисунок 5).

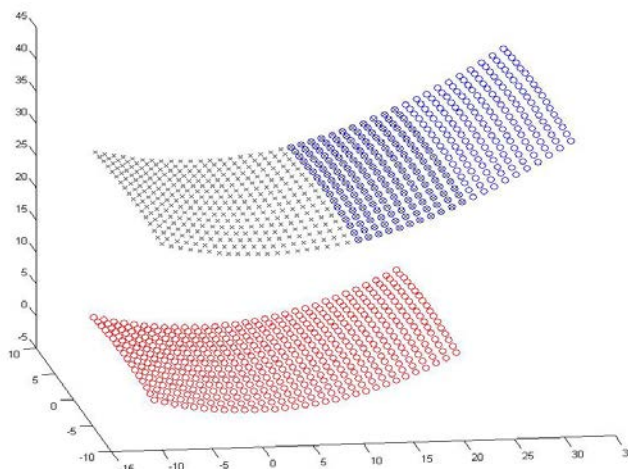


Рисунок 5. Результат совмещения облаков точек с помощью трехмерной гомографии при уровне шума $\sigma = 0,01$.

Однако изменения есть и это хорошо видно на рис. 6 в проекции точек совмещенных облаков на плоскость Oxy .

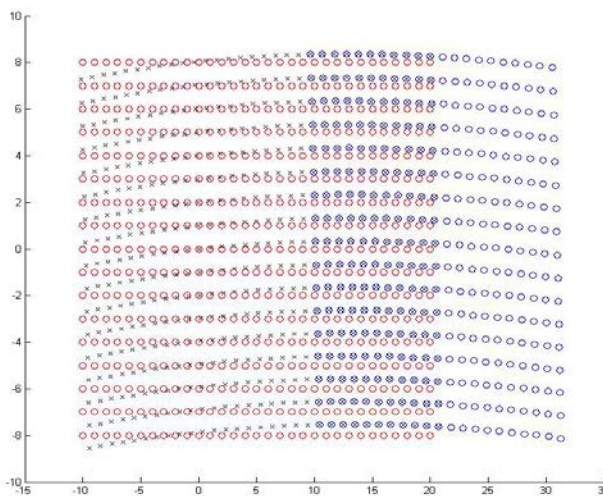


Рисунок 6. Результат совмещения облаков точек в проекции точек на плоскость Oxy при уровне шума $\sigma = 0,01$.

Ошибки совмещения поверхностей существенно увеличиваются с ростом уровня шума. Матрица гомографии, найденная по зашумленным данным при $\sigma = 0,1$, имеет следующий вид

$$H = \begin{pmatrix} 0,831 & -0,043 & 0,225 & 0,850 \\ 0,047 & 0,931 & -0,092 & 0,017 \\ -0,252 & 0,099 & 1,255 & 25,136 \\ -0,007 & 1,64 \cdot 10^{-5} & 0,012 & 1 \end{pmatrix}.$$

Появились существенные искажения в подматрице H_R , отвечающей за вращения. Значения элементов h_{13} и h_{31} увеличились [по сравнению с (9) в 4 раза, диагональные элементы этой подматрицы изменились абсолютно в пределах от 0,062 до 0,262 (на 26%)]. Изменились и

некоторые элементы четвертой строки матрицы. Они также влияют на результат преобразования облаков точек. Искажения преобразованного облака точек можно наблюдать на рисунке 7 в проекции облаков точек на плоскость Oxy .

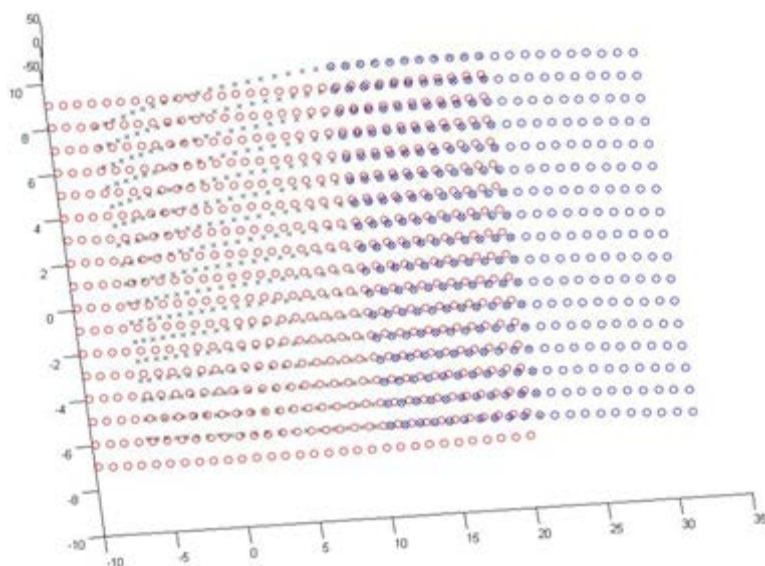


Рисунок 7. Результат совмещения облаков точек в проекции точек на плоскость Oxy при уровне шума $\sigma = 0,1$.

Проведенное исследование позволяет сделать следующий вывод. Совмещение 3D поверхностей, основанное на преобразовании одного облака точек к другому с помощью матрицы гомографии, дает хорошие результаты при точно известных координатах точек в облаках точек и требует низких вычислительных затрат. Однако даже не очень высокий уровень ошибок в координатах точек в совмещаемых облаках может приводить к существенным искажениям результатов совмещения.

Неустойчивость результатов совмещения 3D изображений с помощью матрицы гомографии вынуждает искать другие методы совмещения. Метод, предназначенный для формирования 3D изображений подстилающей поверхности в бортовом вычислителе летательного аппарата, должен соответствовать жестким требованиям как по быстродействию, так и по точности результатов. Этим требованиям в целом удовлетворяет метод последовательного уточнения преобразования одного облака точек к другому. В предлагаемом алгоритме формирование облаков точек производится по последовательности пар 2D изображений подстилающей поверхности, полученных от стереопары, размещенной на борту ЛА. Сшивание облаков точек производится с помощью алгоритма Кабша (Kabsch) [8]. Алгоритм состоит из нескольких взаимосвязанных блоков, каждый из которых решает свою самостоятельную задачу, а именно:

- блок формирования карт глубин по последовательности пар 2D изображений подстилающей поверхности от стереопары;
- блок формирования последовательности облаков точек на основании карт глубин и матрицы, содержащей параметры камеры;
- блок нахождения ключевых точек на $i-om$ и $i+1-om$ изображениях с помощью алгоритма FAST [9];
- блок установления соответствия между ключевыми точками в паре облаков точек с помощью алгоритма неплотного оптического потока Лукаса-Канаде [10];
- блок совмещения $i-go$ и $i+1-go$ облаков точек с поиском матрицы вращения R с помощью алгоритма Кабша.

Стандартный вариант алгоритма ICP дает плохие результаты при совмещении изображений, содержащих однородные поверхности (стол, пол, плоские участки земной поверхности без выраженных особенностей и т.д.). На таких поверхностях трудно находить ключевые точки и

устанавливать между ними соответствия. Использование детектора ключевых точек FAST и алгоритма оптического потока в схеме со стереопарой позволяет находить ключевые точки на соседних кадрах плоских изображений и устанавливать между ними соответствие в двумерном пространстве. Установленные соответствия между точками на плоских изображениях позволяют найти соответствия между ключевыми точками точек и в трехмерном пространстве.

Выбор в качестве детектора ключевых алгоритма FAST обусловлен, в первую очередь, его высоким быстродействием. В отличие от других детекторов, использующих вычисление частных производных, данный алгоритм основан на сравнении непосредственно яркостей исследуемых пикселей и потому имеет минимальное число вычислительных операций. В алгоритме FAST строится окружность в составе 16 пикселей, вписанная в квадрат со стороной из 7 пикселей. Яркости каждого из этих пикселей сравниваются с яркостью центрального пикселя и относятся к одному из трех классов (темнее, сопоставимо, ярче). В итоге множество P всех проверяемых пикселей делится на три подмножества, строится дерево решений в соответствии с алгоритмом [9]. Построенное дерево решений используется для идентификации особых точек.

Карта глубин строится на основании нахождения величины смещения между соответствующими пикселями левого и правого изображений. Поиск соответствующего пикселя в строке производится в результате прохода окном заданного размера по изображению и нахождения максимума целевой функции. Для улучшения качества получаемой карты глубин предварительно производится калибровка камер и ректификация изображений [13], а так же может выполняться фильтрация изображения в строке.

На втором шаге формируются облака точек P_i и Q_{i+1} для $i-20$ и $i+1-20$ кадров методом отображения отвечающих им карт глубин в трехмерное пространство с помощью матрицы H , содержащей параметры камеры.

Третий шаг алгоритма предназначен для поиска множества пар ключевых точек. На i -м изображении детектором FAST находятся ключевые точки. Для найденных ключевых точек, используя оптический поток, находятся соответствующие точки на $i+1$ -м изображении. В рассматриваемом методе оптический поток реализован с помощью алгоритма Лукаса - Канаде [10].

Для соседних по времени поступления кадров от стереопары формируются упорядоченные массивы $P_i^0 = \{p_{i1}^0, p_{i2}^0, \dots, p_{ik}^0\}$ и $Q_{i+1}^0 = \{q_{i+1,1}^0, q_{i+1,2}^0, \dots, q_{i+1,k}^0\}$ ключевых точек. В этих массивах точке $p_{ij}^0 = (x_j, y_j, z_j)$ с номером j из $i-20$ облака точек соответствует точка $q_{i+1,j}^0 = (x'_j, y'_j, z'_j)$ с таким же номером из $i+1-20$ облака.

Следующие 8 шагов алгоритма реализуют итерационную процедуру совмещения двух облаков точек в соответствии с логикой алгоритма ИСР. При этом матрица вращений R находится с применением алгоритма Кабша [8, 11]. Последовательно реализуются следующие вычислительные процедуры.

Вычисляются центры масс массивов P_i^0 и Q_{i+1}^0

$$\bar{p}_i^0 = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k p_{ij}^0, \quad \bar{q}_{i+1}^0 = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k q_{i+1,j}^0 \quad (10)$$

Найденные координаты центров масс вычитаются из координат каждой точки соответствующего массива

$$p_{ij}^1 = p_{ij}^0 - \bar{p}_i^0 \quad q_{i+1,j}^1 = q_{i+1,j}^0 - \bar{q}_{i+1}^0 \quad j = \overline{1, k},$$

или в матричной форме

$$P_i^1 = P_i^0 - \bar{p}_i^0 \cdot E, \quad Q_{i+1}^1 = Q_{i+1}^0 - \bar{q}_{i+1}^0 \cdot E \quad (11)$$

Затем вычисляется ковариационная матрица

$$H = \left(P_i^1 \right)^T Q_{i+1}^1 \quad (12)$$

и находится ее сингулярное разложение

$$H = USV^T \quad (13)$$

Произведение правой и транспонированной левой сингулярных матриц дает искомую матрицу R вращений

$$R = VWU^T \quad (14)$$

где $W = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & d \end{pmatrix}$, а $d = \text{sign}(\det(VU^T))$.

Вычисляется вектор сдвига

$$t = \bar{p}_i^0 - R \cdot \bar{q}_{i+1}^0 \quad (15)$$

Производится совмещение $i+1$ -го облака точек (массива точек Q_{i+1}^0) с i -м облаком

$$\hat{Q}_{i+1} = R \cdot Q_{i+1}^0 + t \quad (16)$$

На последнем 11-м шаге алгоритма вычисляется ошибка приближения преобразованного $i+1$ -го облака точек \hat{Q}_{i+1} к i -му облаку P_i^0 на $r+1$ итерации

$$\delta_{i+1}^{r+1} = \left\| \hat{Q}_{i+1} - P_i^0 \right\| = \sum_{j=1}^k \left((\hat{x}_j - x_j)^2 + (\hat{y}_j - y_j)^2 + (\hat{z}_j - z_j)^2 \right).$$

Если выполняется неравенство $|\delta_{i+1}^{r+1} - \delta_{i+1}^r| < \varepsilon$, то принимается решение о завершении итерационного процесса последовательного приближения $i+1$ -го облака точек к i -му облаку. В противном случае цикл вычислений повторяется.

Рассмотрим пример применения описанного алгоритма к формированию и совмещению последовательности облаков точек на основании видеоизображений подстилающей поверхности, полученных с помощью пары видеокамер, размещенных на подвеске гексакоптера. На рисунке 8 а приведены два облака точек (массивы P_i^0 и Q_{i+1}^0), полученные на выходе второго блока алгоритма, а на рисунке 8 б – результат их совмещения. На рисунке 9 приведены результаты сшивания облаков точек, полученных по двум последовательностям стереоизображений для двух вариантов съемки одного и того же участка подстилающей поверхности.

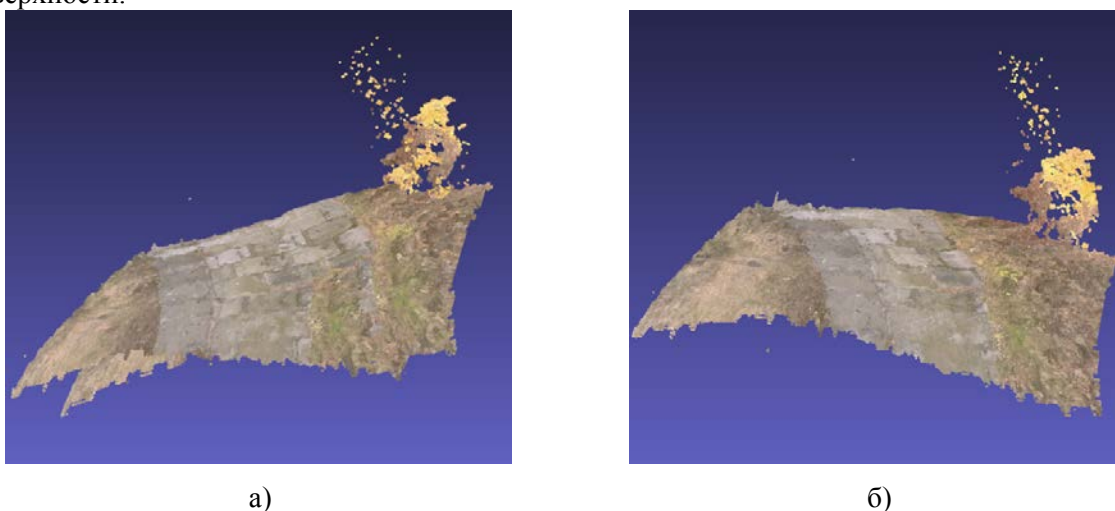


Рисунок 8. Иллюстрация совмещения облаков точек: а – положение облаков точек до совмещения, б – результат совмещения.

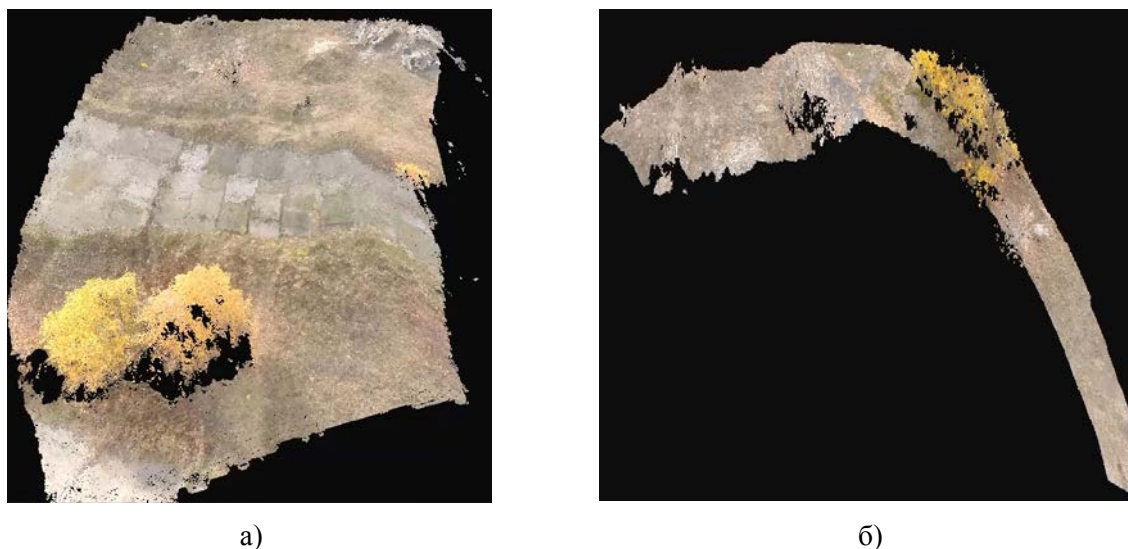


Рисунок 9. Результат шивания облаков точек: а – по первой последовательности стереоснимков, б – по второй последовательности.

4. Заключение

Получены вычислительные формулы и проведено исследование на модельных изображениях алгоритма совмещения 3D изображений, основанного на использовании матрицы гомографии. В рамках этого подхода предложен алгоритм поиска соответствующих точек в совмещаемых облаках, основанный на использовании сигнатур спин изображений. Матрица гомографии позволяет учитывать все виды возможных трансформаций облаков точек. Алгоритм может работать в реальном времени и обеспечивает хорошее качество совмещения поверхностей при отсутствии ошибок в задании координат точек в совмещаемых облаках. Вместе с тем, в процессе исследований установлено, что вычислительный алгоритм очень чувствителен к возмущениям координат точек в совмещаемых облаках точек.

Предложен модифицированный вариант итеративного алгоритма ICP, обеспечивающий решение задачи реконструкции 3D изображений подстилающей поверхности в реальном времени и с хорошим качеством. Основные отличия предлагаемого варианта итеративного алгоритма от его классического варианта – использование алгоритма Лукаса-Канаде неплотного оптического потока в сочетании с алгоритмом FAST для формирования множества пар ключевых точек и алгоритма Кабша для нахождения матрицы вращений.

Литература

- [1] Stein, F. Structural Indexing: Efficient 3-D Object Recognition / F. Stein, G. Medioni // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – Vol. 14(2). – P. 125-145.
- [2] Johnson, A. Surface Registration by Matching Oriented Points // A. Johnson, M. Hebert / Proc. 3 DIM. – 1997. – P. 145-152.
- [3] Черников, И.С. Трехмерная реконструкция и распознавание по наборам дальнометрических данных / И.С. Черников, А.А. Крыловецкий // Компьютерное моделирование 2009: труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2009. – С. 284-287.
- [4] Chen, C. Ransac-Based Darcses: A New Approach to Fast Automatic Registration of Partially Overlapping Range Images / C. Chen, Y. Hung, J. Cheng // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1999. – Vol. 21(11). - P. 1229-1234.
- [5] Демидович, Б.П. Основы вычислительной математики / Б.П. Демидович, И.А. Марон. – М.: Наука, 1966. – 664 с.
- [6] Воеводин, В.В. Матрицы и вычисления / В.В. Воеводин, Ю.А. Кузнецов. – М.: Наука, 1984. – 320 с.

- [7] Андрушевский, Н.М. Анализ устойчивости решений систем линейных алгебраических уравнений / Н.М. Андрушевский. – М.: Издательский отдел факультета ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова; МАКС Пресс, 2008. – 71 с.
- [8] Kabsch, W. A solution for the best rotation to relate two sets of vectors / W. Kabsch // Acta Crystallographic a Section A. – 1976. – Vol. 32(5). – P. 922-923.
- [9] Nikolajczyk, K. Scale and affine invariant interest point detectors / K. Nikolajczyk, C. Schmid // International Journal of Computer Vision. – 2004. – 60(1). – P. 63-86.
- [10] Bouguet, J-Y. Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description of the algorithm / J-Y. Bouguet // Intel Corporation Microprocessor Research Labs [Электронный ресурс]. URL: http://robots.stanford.edu/cs223b04/algo_tracking (Дата обращения 11.10.2017).
- [11] Stein, F. Structural Indexing: Efficient 3-D Object Recognition / F. Stein, G. Medioni // IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – Vol. 14(2). – P. 125-145.
- [12] Bergström, P. Robust registration of point sets using iteratively reweighted least squares / P. Bergström, O. Edlund // Computational Optimization and Applications. – 2014. – Vol 58(3). – P. 543-561. DOI: 10.1007/s10589-014-9643-2.
- [13] Bouguet, J.Y. Camera Calibration Toolbox for Matlab / J.Y. Bouguet // Computational Vision at the California Institute of Technology [Электронный ресурс]. – URL: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ (Дата обращения 16.10.2017).

Algorithms for automatic identification of objects on heterogeneous images and images superimposition

A.I. Novikov¹, A.I. Efimov¹, D.A. Kolchaev¹

¹Ryazan State Radio Engineering University, Gagarina 59/1, Ryazan, Russia, 390005

Abstract. The relevance of 3D images formation in machine vision systems and aviation applications is due to the necessity to solve many problems in the helicopter and unmanned aircraft. These include the tasks of mounting various technical installations using a helicopter, saving people in difficult terrain, landing a helicopter on unfamiliar sites. The proposed work explores the possibility of using two alternative methods for the formation of 3D images of the underlying surface from a sequence of 2D images, obtained from on board aircraft stereo pair. The first method based on the extension of the algorithm for 2D images superimposition with the help of the homography matrix for the three-dimensional case. The mathematical apparatus developed for the case of plane homography with an arbitrary number of key points is generalized to the three-dimensional case. The homography matrix takes into account all kinds of cloud deformations (shift, rotation, scale change) and allows to obtain the final solution in one step. The second method of points cloud combining is based on using an iterative procedure to sequentially refine the transformation of one point cloud to another. At each iteration we found key points using the FAST algorithm, the correspondence between them is established by using the algorithm of a non-dense optical flow, and the optimal estimation of the rotation matrix is in accordance with the Kabsh algorithm.

Keywords: stereovision, homography matrix, point clouds, 3D images superimposition, rotation matrix, shear vector, singular decomposition of the matrix.