

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-11-19

УДК 528.72: 514.88: 004.02

Расчетное прогнозирование в задаче идентификации стереоизображений

Марина Витальевна Самойленко¹✉, Владимир Александрович Хачикян²

¹ Независимый исследователь, Москва, Российская Федерация

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация

¹ samoi.mar@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4798-2414>

² zaktol@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-1279-7661>

Аннотация

Введение. Рассмотрены вопросы повышения эффективности и достоверности идентификации стереоизображений за счет расчетного прогнозирования положения и размеров зоны неопределенности, в которой заведомо находится искомая точка соответствия. **Метод.** На одном из стереоизображений выбирается контрольная точка, для которой требуется найти точку соответствия на втором стереоизображении. По известным параметрам стереоскопической телевизионной системы и координатам контрольной точки с помощью предложенного в работе математического аппарата рассчитываются координаты границ зоны неопределенности на втором стереоизображении. Вторая точка соответствия находится с использованием поисковой процедуры путем сопоставления одинаковых малых областей с центрами в контрольной точке на первом стереоизображении и в точках зоны неопределенности на втором. Сопоставление производится по критерию минимума квадратического рассогласования интенсивностей. Необходимой априорной информацией для реализации метода являются предельные высоты отображаемого на стереоизображениях рельефа. **Основные результаты.** Получены соотношения линейных размеров на плоском рельефе и на изображении, формируемом по принципу центрального проецирования. Выведены соотношения, позволяющие расчетным путем получить координаты точек соответствия и стереоскопического рассогласования для стереоизображений плоского рельефа. Для стереоизображений объемного рельефа приведены расчетные формулы определения границ зоны неопределенности на втором стереоизображении, в пределах которой осуществляется поиск точки соответствия. Корректность и работоспособность полученных соотношений подтверждены компьютерным моделированием. **Обсуждение.** Ограничение размеров области поиска посредством расчетного прогнозирования зоны неопределенности позволяет уменьшить вычислительные и временные затраты на поисковую процедуру. За счет этого повышается эффективность идентификации точек стереоизображений и уменьшается вероятность ложной идентификации.

Ключевые слова

стереоизображения, идентификация, зона неопределенности, точки соответствия, прогнозирование

Ссылка для цитирования: Самойленко М.В., Хачикян В.А. Расчетное прогнозирование в задаче идентификации стереоизображений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 1. С. 11–19. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-11-19

Computational prediction in the problem of stereo image identification

Marina V. Samoilenko¹✉, Vladimir A. Hachikian²

¹ Independent Researcher, Moscow, Russian Federation

² Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation

¹ samoi.mar@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4798-2414>

² zaktol@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-1279-7661>

Abstract

The paper examines the issues of increasing the efficiency and reliability of stereo image identification through computational prediction of the position and size of the uncertainty zone in which the desired correspondence point

is known to be located. A control point is selected on one of the stereo images, for which it is necessary to find a correspondence point on the second stereo image. Based on the known parameters of the stereoscopic television system and the coordinates of the control point, using the mathematical apparatus proposed in the work, the coordinates of the boundaries of the uncertainty zone on the second stereo image are calculated. The second point of correspondence is found by the search procedure by comparing identical small areas with centers in the control point on the first stereo image and in the points of the uncertainty zone on the second; the comparison is made according to the criterion of minimum quadratic mismatch of intensities. The necessary a priori information for implementing the method is the maximum heights of the relief displayed on stereo images. The ratios of linear dimensions on a flat relief and on an image formed according to the principle of central projection were obtained. Relationships have been obtained that make it possible to obtain, by calculation, the coordinates of the correspondence points and the stereoscopic mismatch for stereo images of a flat relief. For stereo images of a volumetric relief, calculation formulas are obtained for determining the boundaries of the zone of uncertainty in the second stereo image within which the search for the point of correspondence is carried out. The correctness and performance of the obtained relationships are confirmed by computer modeling. Limiting the size of the search area by means of calculated prediction of the uncertainty zone makes it possible to reduce the computational and time costs of the search procedure. Due to this, the efficiency of identifying stereo image points increases and the likelihood of false identification decreases.

Keywords

stereo images, identification, uncertainty zone, correspondence points, prognostication

For citation: Samoilenko M.V., Hachikian V.A. Computational prediction in the problem of stereo image identification. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 11–19 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-11-19

Введение

Обработка стереоизображений имеет самые разные применения и, соответственно, различается по способам обработки [1, 2]. При решении целевых задач используется специфика тех или иных объектов, на которые ориентировано применение стереосистем. Однако в любом случае применение стереосистем и стереоизображений приводит к получению пространственной информации, будь то расположение городских зданий [3], контроль с беспилотных летательных аппаратов состояния изоляторов энергосистем [4] или распознавание и локализация движущихся целей в помещении [5]. Для решения любых задач с применением стереосистем необходима идентификация стереоизображений, т. е. выявление на них геометрических или точечных соответствий.

Идентификация стереоизображений включает множество подходов — от работы оператора со стереоизображениями в интерактивном режиме до полностью автоматических систем. В настоящее время широкое распространение получили методы глубокого обучения [3, 4, 6] и другие вариации применения нейронных сетей [7]. Однако успешность этих широко разрабатываемых методов определяется обучающими данными, которые закономерно связаны с конкретным применением систем, от чего зависят используемые в обучении модели. При этом, чем более обобщенно сформулирована задача для обучаемой нейронной сети, тем будет сложнее сеть и тем больший объем памяти потребуется для хранения необходимых параметров, как отмечается, например, в [8].

Другой подход связан с процедурой выявления на стереоизображениях признаков, характерных для анализируемых сцен [9–12]. Собственно, на этом принципе базируется и применение нейронных систем. При этом делаются попытки, например, в [13], перехода к таким принципам идентификации стереоизображений, при которых решение не ограничивалось бы конкретными структурами данных.

В [14] отмечено, что при разработке методов идентификации стереоизображений важным фактором является обеспечение баланса между точностью и эффективностью. Желательна и универсальность алгоритма, его независимость от содержания и структуры наблюдаемой сцены. В этом плане актуальной является поточечная идентификация изображений, когда сопоставляются не структурные фрагменты, а точки стереоизображений [15–19]. Однако применение этого подхода ограничено из-за большого объема вычислений при идентификации каждой точки. В настоящей работе предложено решение, позволяющее существенно, на порядок, сократить вычислительные процедуры поиска, для чего разработан метод расчетного прогнозирования зоны неопределенности, в которой осуществляется поиск.

Первые методы поточечной идентификации стереоизображений, применяемые и в настоящее время — *площадные методы* [20, 21]. Данные методы реализуются следующим образом: на одном из стереоизображений выбирается контрольная точка соответствия и вблизи нее выделяется окно идентификации; на втором стереоизображении таким же по форме и размерам «окном» сканируется зона неопределенности, в которой ищется вторая точка соответствия. В настоящей работе рассматривается площадной метод идентификации стереоизображений.

Важными параметрами для площадных методов являются окна идентификации и зона неопределенности. От них зависит как точность, так и вычислительные затраты и время идентификации. В [14] отмечается, что выбор габаритов «окна» происходит «эвристически, уменьшаясь на более информативных участках и увеличиваясь на менее информативных». Очевидно, так же эвристически выбирается и зона неопределенности.

В данной работе предложен аналитический, расчетный подход к определению размеров и локализации зоны неопределенности, в пределах которой на втором стереоизображении осуществляется поиск точки соответствия.

В работе рассматривается площадной метод идентификации, однако это не ограничивает значимость разработанного математического аппарата, поскольку прогнозирование размеров и локализации зоны неопределенности полезны при любом подходе к идентификации стереоизображений, будь то фрагментация или применение нейронных сетей.

Цель работы — повышение достоверности и эффективности идентификации стереоизображений за счет сокращения вычислительных и временных затрат.

Для достижения поставленной цели разработан математический аппарат, позволяющий расчетным путем прогнозировать параметры идентификации стереоизображений, включая положение границ зоны неопределенности, в которой расположена вторая точка соответствия. Расчетное уточнение границ зоны неопределенности приводит к сокращению как временных, так и вычислительных затрат на поисковую процедуру. Кроме этого, минимизируется вероятность ложной идентификации, под которой понимается ошибочное определение положения точки соответствия на втором изображении. Последнее преимущество показано в компьютерных экспериментах.

В основе работы лежат идеи и разработки доктора технических наук профессора В.И. Самойленко.

Постановка задачи

Рассмотрим стереоскопическую телевизионную систему (СТС), состоящую из двух камер. Для определенности изображение левой камеры обозначим как изображение 1, а правой — как изображение 2. Назовем точку соответствия на изображении 1 и «окно» вблизи этой точки *контрольными*. Контрольную точку соответствия обозначим $\mathbf{p}_{\Pi 1}$. На изображении 2 *сканирующим* «окном» осуществляется поисковая процедура для обнаружения второй точки соответствия $\mathbf{p}_{\Pi 2}$.

Показателем качества при поиске выберем квадратическое отклонение

$$\eta(\mathbf{p}_{02}) = (\mathbf{f}_1(\mathbf{p}_{\Pi 1}) - \mathbf{f}_2(\mathbf{p}_{02}))^T (\mathbf{f}_1(\mathbf{p}_{\Pi 1}) - \mathbf{f}_2(\mathbf{p}_{02})), \quad (1)$$

где $\mathbf{f}_1$ — вектор интенсивности контрольного «окна»; $\mathbf{p}_{\Pi 1}$ — координаты контрольной точки соответствия; $\mathbf{f}_2(\mathbf{p}_{02})$ — вектор интенсивности сканирующего «окна» при положении его центра $\mathbf{p}_{02}$; векторы «окон» получим разверткой их изображений.

При точном положении сканирующего «окна» центр его совпадает с истинным положением второй точки соответствия: $\mathbf{p}_{02} = \mathbf{p}_{\Pi 2}$. В результате поисковой процедуры по критерию минимума (1) получим оценку истинного положения второй точки соответствия $\hat{\mathbf{p}}_{\Pi 2}$.

Изображения левого и правого «окон» в общем случае не совпадают ни при каком положении сканирующего «окна» $\mathbf{p}_{02}$ вследствие стереоскопичности. Тем не менее, в идеальном случае в результате поисковой процедуры получим $\hat{\mathbf{p}}_{\Pi 2} = \mathbf{p}_{\Pi 2}$, а в неидеальном случае $\hat{\mathbf{p}}_{\Pi 2} \neq \mathbf{p}_{\Pi 2}$ и возникает ошибка идентификации

$$\Delta_{\Pi 2} = \|\hat{\mathbf{p}}_{\Pi 2} - \mathbf{p}_{\Pi 2}\|. \quad (2)$$

Ставится задача разработать математический аппарат, позволяющий расчетным путем прогнозировать параметры идентификации стереоизображений: положение второй точки соответствия $\mathbf{p}_{\Pi 2}$ (для плоского рельефа); стереоскопическое рассогласование $\delta = \mathbf{p}_{\Pi 2} - \mathbf{p}_{\Pi 1}$ и зону неопределенности на изображении 2, в которой находится точка соответствия (для объемного рельефа).

Соотношения размеров базовой плоскости рельефа и изображения

Найдем соотношения, описывающие соответствие горизонтального ε_r и вертикального ε_b размеров на изображении и соответствующих им размеров на опорной плоскости рельефа, которая совпадает с горизонтальной плоскостью базовой системы координат.

В соответствии с рис. 1 найдем соотношение ε_r на изображении и соответствующего размера отрезка a на опорной плоскости.

С учетом малости ε_r , получим

$$\frac{a}{\varepsilon_r} = \frac{\|\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K\|}{\|\mathbf{r}_0 + \mathbf{r}_{\Pi}\|} \quad (3)$$

где $\mathbf{r}_K$ — координатный вектор центра проецирования камеры; $\mathbf{r}_0$ — оптический вектор, направление которого совпадает с направлением оптической оси камеры, а длина определяется фокусным расстоянием; $\mathbf{r}_P$ — координатный вектор порождающей точки P ; $\mathbf{r}_{\Pi}$ — координатный вектор точки Π (отображения порождающей точки).

Найдем аналогичное соотношение для вертикального отрезка ε_b на плоскости изображения и соответствующего ему отрезка b на опорной плоскости (рис. 2).

Из рис. 2 с учетом малости ε_b найдем отношение $\frac{t}{\varepsilon_b} = \frac{\|\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K\|}{\|\mathbf{r}_0 + \mathbf{r}_{\Pi}\|}$, где отрезок t параллелен плоскости изо-

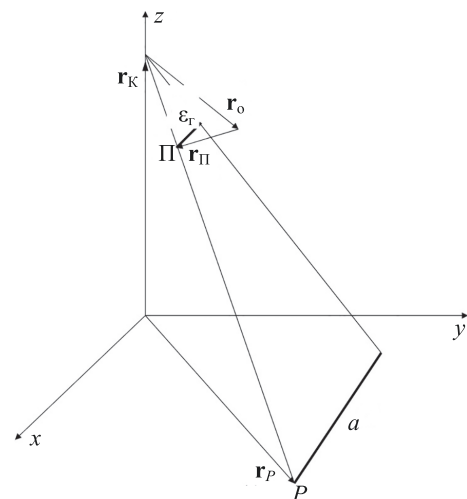


Рис. 1. К определению соотношения размеров горизонтального отрезка на изображении ε_r и соответствующего отрезка a на опорной плоскости

Fig. 1. For the ratio determination of the horizontal segment dimensions in the image ε_r and the corresponding segment a on the reference plane

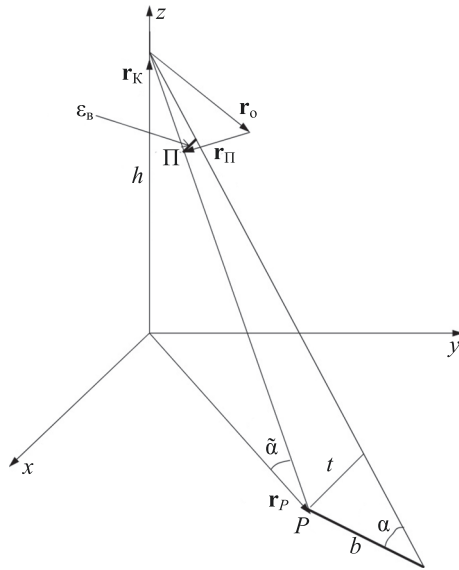


Рис. 2. К определению соотношения размеров вертикального отрезка на изображении ε_b и соответствующего отрезка на опорной плоскости b

Fig. 2. For the ratio determination of the vertical segment dimensions in the image ε_b and the corresponding segment on the reference plane b

бражения. Из этого же рисунка явствует, что $b \approx \frac{t}{\sin \alpha} \approx \frac{t}{\sin \tilde{\alpha}} = \frac{t \|\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K\|}{h}$, где h — высота камеры над опорной плоскостью.

Из полученных соотношений находим:

$$\frac{b}{\varepsilon_b} = \frac{\|\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K\|^2}{h \|\mathbf{r}_O + \mathbf{r}_{\Pi}\|} \quad (4)$$

Отметим, что выражения (3) и (4) неудобны тем, что, помимо параметров СТС, требуют знания наклонной дальности порождающей точки $\|\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K\|$. Сделаем эти формулы более удобными, избавившись от $\|\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K\|$.

С помощью несложных геометрических построений можно показать, что

$$\|\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K\| = \frac{h \|\mathbf{r}_O + \mathbf{r}_{\Pi}\|}{|r_{Oz} + r_{\Pi z}|}, \quad (5)$$

где r_{Oz} и $r_{\Pi z}$ — z -компоненты соответствующих векторов.

В результате подстановки (5) в выражения (3) и (4) получим

$$\frac{a}{\varepsilon_r} = \frac{h}{|r_{Oz} + r_{\Pi z}|} \quad (6)$$

$$\frac{b}{\varepsilon_b} = \frac{h \|\mathbf{r}_O + \mathbf{r}_{\Pi}\|}{(r_{Oz} + r_{\Pi z})^2} \quad (7)$$

Выражения (6) и (7) определяют соотношения размеров на опорной плоскости (a , b) и их отображений в плоскости изображения (ε_r , ε_b) только через параметры СТС, что делает удобным их использование.

Расчетное прогнозирование в задаче идентификации стереоизображений плоского рельефа

Приведем формулы, позволяющие расчетным путем определить стереоскопическое рассогласование и координаты точки соответствия на правом изображении по заданным координатам контрольной точки соответствия на левом изображении. Решим задачу для плоского рельефа, лежащего в горизонтальной плоскости базовой системы координат.

Точку на левом изображении, расположенную в центре изображения, назовем первой эталонной точкой соответствия:

$$\mathbf{p}_{1эт} = \mathbf{p}_C = \begin{bmatrix} x_{Cиз} \\ y_{Cиз} \end{bmatrix},$$

где $x_{Cиз}$, $y_{Cиз}$ — координаты центра изображения в системе координат изображения с началом в левом нижнем углу.

Заметим, что векторы $\mathbf{p}$ — двухмерные, обозначают координаты в системе координат изображения; векторы $\mathbf{r}$ — трехмерные, обозначают координаты в базовой системе координат. Преобразование векторов выполняется с помощью матрицы перехода [21] $\mathbf{M}$ по формулам $\mathbf{p} = \mathbf{M}\mathbf{r}$, $\mathbf{r} = \mathbf{M}^T\mathbf{p}$.

Координаты второй эталонной точки соответствия (на правом изображении) рассчитаем по формулам из работы [22]. Для этого вычислим координаты порождающей точки, отображающейся в центре изображения 1:

$$\mathbf{r}_P = \mathbf{r}_{K1} + \xi \mathbf{r}_O, \quad (8)$$

$$\xi = -\frac{h}{r_{Oz}}. \quad (9)$$

Координаты второй эталонной точки соответствия вычислим как отображение на правое изображение порождающей точки (8):

$$\mathbf{r}_{2эт} = \zeta(\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_{K2}) - \mathbf{r}_O, \quad (10)$$

где

$$\zeta = \frac{\mathbf{r}_O^T \mathbf{r}_O}{\mathbf{r}_O^T \mathbf{r}_P - \mathbf{r}_O^T \mathbf{r}_{K2}}. \quad (11)$$

В системе координат изображения с началом в левом нижнем углу

$$\mathbf{p}_{2эт} = \mathbf{M}\mathbf{r}_{2эт} + \mathbf{p}_C,$$

$$\mathbf{p}_{2эт} = \begin{bmatrix} x_{2эт} \\ y_{2эт} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $x_{2эт}$, $y_{2эт}$ — координаты второй эталонной точки соответствия на изображении.

Вектор координат второй эталонной точки (12) позволяет вычислить векторное стереоскопическое рассогласование эталонных точек соответствия

$$\delta_0 = \mathbf{p}_{2эт} - \mathbf{p}_C = \begin{bmatrix} \delta_{0r} \\ \delta_{0b} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где δ_{0r} и δ_{0b} — горизонтальная и вертикальная составляющие стереоскопического рассогласования.

Рассчитаем эталонные линейные размеры на опорной плоскости, которые отображаются в центральной части изображения компонентами вектора (13) δ_{0r} и δ_{0v} . Для этого преобразуем выражения (6) и (7), подставив в них $\mathbf{r}_{\Pi} = 0$ и $r_{\Pi z} = 0$:

$$\begin{aligned} a_0 &= \delta_{0r} \frac{h}{|r_{oz}|} \\ b_0 &= \delta_{0v} \frac{h \|\mathbf{r}_o\|}{r_{oz}^2} \end{aligned} \quad (14)$$

В соответствии с принципом взаимности полагаем, что независимо от места на изображении, стереоскопическое рассогласование точек соответствия определяется одними и теми же эталонными размерами на рельефе (14). Тогда для любой заданной контрольной точки с координатами $\mathbf{r}_{\Pi}$, согласно (6) и (7), рассчитаем стереоскопическое рассогласование:

$$\begin{aligned} \delta_{r \text{ расч}} &= \frac{a_0 |r_{oz} + r_{\Pi z}|}{h}, \\ \delta_{v \text{ расч}} &= \frac{b_0 (r_{oz} + r_{\Pi z})^2}{h \|\mathbf{r}_o + \mathbf{r}_{\Pi}\|}, \\ \delta_{\text{расч}} &= \begin{bmatrix} \delta_{r \text{ расч}} \\ \delta_{v \text{ расч}} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (15)$$

Расчетные координаты второй точки соответствия найдем по формулам:

$$\begin{aligned} x_{\Pi 2 \text{ расч}} &= p_{\Pi 1x} - \delta_{r \text{ расч}}, \\ y_{\Pi 2 \text{ расч}} &= p_{\Pi 1y} - \delta_{v \text{ расч}}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $\mathbf{p}_{\Pi} = \begin{bmatrix} p_{\Pi 1x} \\ p_{\Pi 1y} \end{bmatrix} = \mathbf{M} \mathbf{r}_{\Pi}$; $\mathbf{M}$ — матрица перехода.

Выражения (15) и (16) позволяют рассчитать стереоскопическое рассогласование и координаты второй точки соответствия при заданных координатах контрольной точки соответствия.

Для плоского рельефа представленный математический аппарат позволяет идентифицировать стереоизображения расчетным путем. Достаточно выбрать контрольные точки соответствия на изображении 1 и вычислить для них стереоскопическое рассогласование (15) и координаты второй точки соответствия (16). Отметим, что данный расчет может быть применен только для плоского рельефа при отсутствии ошибок измерений и юстировки СТС. Более естественным, однако, является разновысотный рельеф. В этом случае полученные соотношения позволяют расчетным путем определить зону неопределенности на правом изображении, в которой заведомо находится вторая точка соответствия.

Расчетное прогнозирование в задаче идентификации стереоизображений объемного рельефа

Приведем решение задачи расчетного прогнозирования зоны неопределенности на правом изображении, в которой находится вторая точка соответствия.

Задачу решаем для одномерного случая, что обусловлено следующим.

В работе [12] показано, что асимметрия интенсивности в пределах «окна» приводит к ошибке идентификации. Профессор В.И. Самойленко показал, что на конечный результат определения пространственных координат точек рельефа основное влияние оказывает асимметрия по дальности. Это значит, что чем меньше высота «окна», тем меньше влияние асимметрии интенсивности на точность восстановления рельефа. В этом плане приоритет имеет СТС с одинаковыми камерами, оптические оси которых ортогональны базе стереоскопичности и параллельны между собой, плоскости изображений ортогональны оптическим осям. В такой системе, при отсутствии ошибок юстировки, любая порождающая точка отображается на одну и ту же строку обоих стереоизображений. Рассмотрим такую СТС. Минимальную высоту «окна» примем равной одному элементу разрешения изображения; такое «окно» имеет размеры $w_x \times dy$, где w_x — ширина «окна»; dy — размер элемента разрешения изображения по вертикальной оси.

В результате задача становится одномерной: поиск точки соответствия на правом изображении осуществим сканированием по строке «окном», представляющим собой фрагмент этой строки.

Если опорная плоскость, в которой лежит плоский рельеф, не совпадает с горизонтальной плоскостью базовой системы координат, а параллельна ей и находится на высоте H , то в формулы (9), (14) и (15) вместо h подставим $(h - H)$. Это приведет к изменению координат искомой точки соответствия (16). С учетом принятой конструкции СТС требует определения только абсциссы второй точки соответствия — $x_{2 \text{ расч}}$; ордината этой точки та же, что и у контрольной точки соответствия. В зависимости от значения H положение второй точки соответствия на строке будет меняться: чем больше H , тем больше стереоскопическое рассогласование и тем левее расположена точка соответствия на правом изображении.

Пусть известны максимальная $H_{\max}$ и минимальная $H_{\min}$ высоты рельефа, отображаемого на стереоизображениях. Подставим вместо h в формулы (16) разность $(h - H_{\max})$, найдем по первой формуле значение $x_{2 \text{ расч}}$, которое обозначим как $x_{2л}$. Аналогично, подставив $H_{\min}$, найдем $x_{2пр}$. Переменные $x_{2л}$ и $x_{2пр}$ обозначают левую и правую границы зоны неопределенности. В этой зоне отображается порождающая точка контрольной точки соответствия, при условии, что она лежит в диапазоне высот рельефа $H_{\min} - H_{\max}$.

Описанное расчетное прогнозирование зоны неопределенности осуществляется по параметрам СТС и априорной информации о предельных высотах рельефа. Такое прогнозирование позволяет не только сократить время и вычислительные затраты на поисковую процедуру идентификации точек соответствия, но и уменьшить вероятность ложной идентификации за счет максимального сокращения области поиска.

Компьютерные эксперименты

С помощью компьютерных экспериментов продемонстрируем корректность и работоспособность разработанного математического аппарата, а также продемонстрируем возможность с помощью расчетного прогнозирования избежать ложной идентификации точек.

Параметры СТС в компьютерных экспериментах следующие: положение левой камеры в базовой системе координат $\mathbf{r}_{K1} = [7,5 \ -5 \ 5]^T$ м, положение правой камеры $\mathbf{r}_{K2} = [8 \ -5 \ 5]^T$ м. Угол наклона оптических осей камер по отношению к вертикали составляет 68° , размер изображений — 18×18 см², элемент разрешения изображения — $0,5 \times 0,5$ мм². Изображения оцифровываются 128-разрядными аналого-цифровыми преобразователями.

Рельеф представляет собой случайным образом расположенные на плоскости объекты (полусфера, конус и пирамида; радиус полусфер и высоты конусов и пирамид моделируются случайным образом в диапазоне 0,2–0,5 м). Максимальная высота рельефа составляет $H_{\max} = 0,5$ м, а минимальная — $H_{\min} = 0$. По всей по-

верхности рельефа распределена интенсивность, представляющая собой коррелированный шум.

В первом эксперименте зона неопределенности не прогнозировалась, а была принята из естественного понимания того, что на правом изображении точка соответствия лежит левее контрольной точки соответствия. Зона неопределенности в этом эксперименте лежит между $x_{2л} = 20,5$ мм и $x_{2пр} = 155$ мм; ширина ее составляет $d_{3н} = 134,5$ мм.

На рис. 3 показаны результаты идентификации точек соответствия. Точки соответствия являются центрами «окон» — контрольного на левом изображении и сканирующего на правом.

Координаты контрольной точки соответствия $\mathbf{p}_{П1} = (155 \ 170)^T$ мм (центр контрольного «окна» на рис. 3, а). Координаты ее порождающей точки при объемном рельефе нельзя определить расчетным путем, как это делалось для плоского рельефа (см. раздел «Расчетное прогнозирование в задаче идентификации стереоизображений плоского рельефа») из-за неизвестной высоты порождающей точки над горизонтальной плоскостью. Эти координаты определены программным методом при формировании

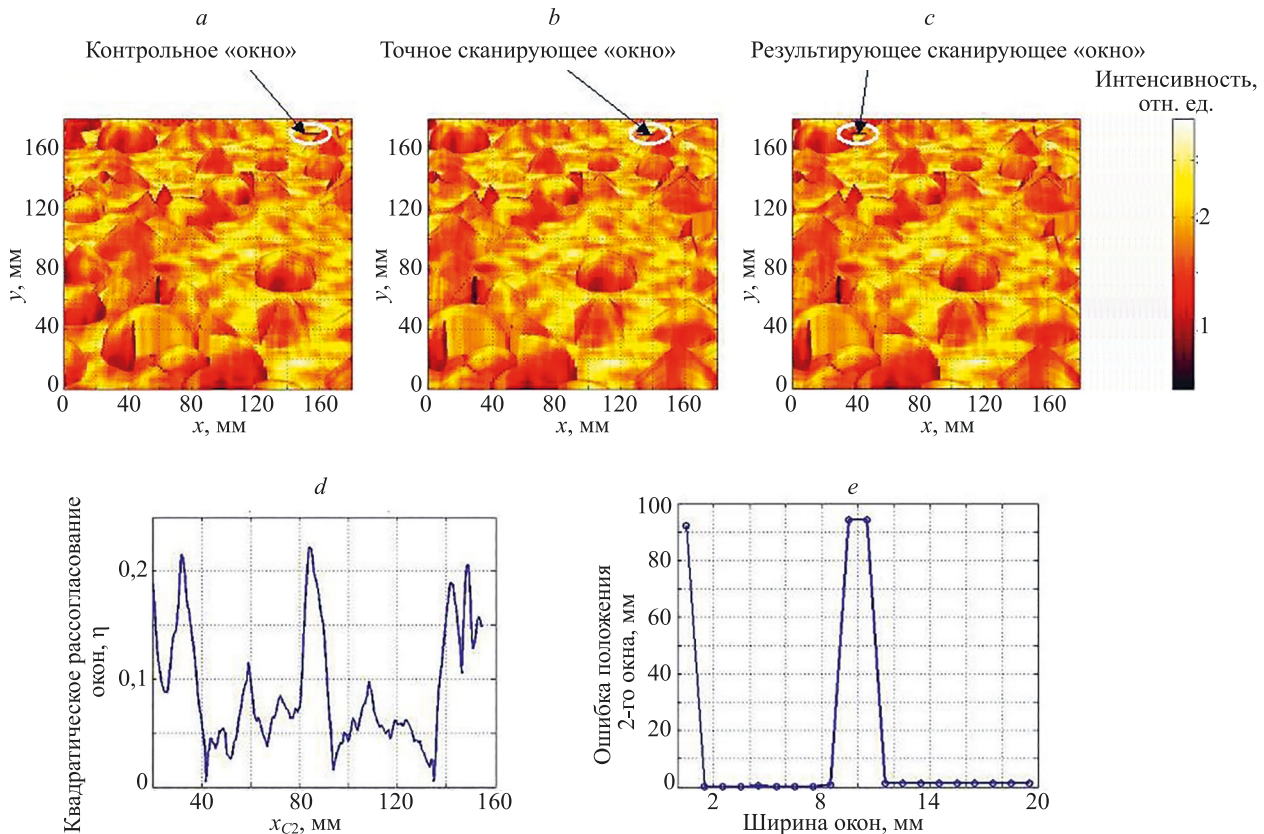


Рис. 3. Идентификация без использования расчетного прогнозирования: левое изображение с контрольным «окном» (а); правое изображение с точным положением сканирующего «окна» (b); правое изображение с результирующим положением сканирующего «окна» при ширине «окна» $w_x = 10,5$ мм (c); зависимость квадратического отклонения η от положения сканирующего «окна» при ширине «окна» $w_x = 10,5$ мм (d); зависимость ошибки идентификации $\Delta_{П2}$ от размера «окна» w_x (e)

Fig. 3. Identification without the use of computational prediction: left image with a control “window” (a); right image with the exact position of the scanning “window” (b); right image with the resulting position of the scanning “window” with the width of the “window” $w_x = 10.5$ mm (c); dependence of the square deviation η vs. the position of the scanning “window” with the width of the “window” $w_x = 10.5$ mm (d); dependence of the identification error $\Delta_{П2}$ vs. the size of the “window” w_x (e)

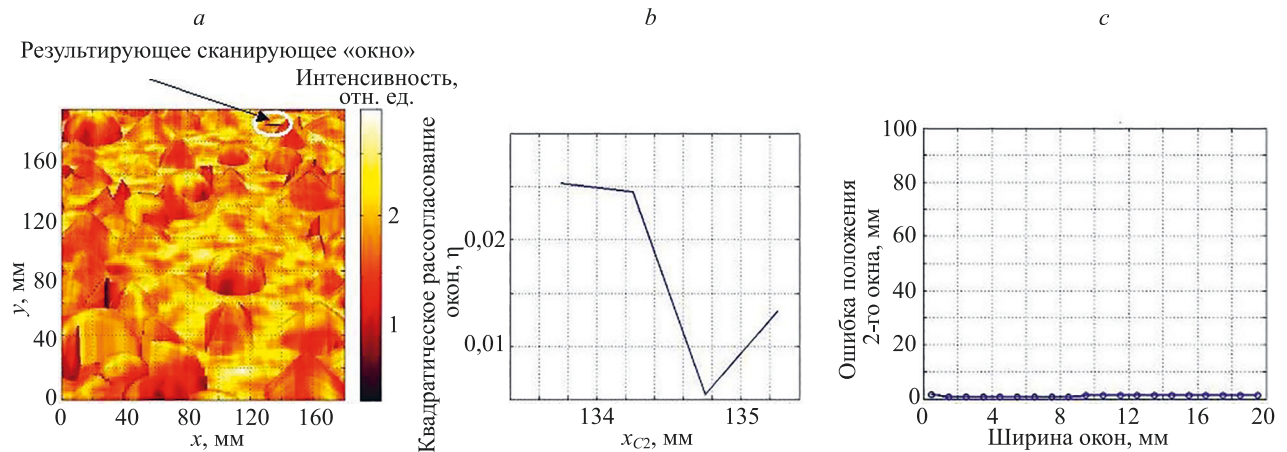


Рис. 4. Идентификация с расчетным прогнозированием зоны неопределенности: правое изображение с результирующим положением сканирующего «окна» (a); зависимость показателя η от положения сканирующего «окна» при ширине «окна» $w_x = 10,5$ мм (b); зависимость ошибки идентификации $\Delta_{П2}$ от размера «окна» w_x (c)

Fig. 4. Identification with calculated prediction of the uncertainty zone: right image with the resulting position of the scanning “window” with the width of the “window” (a); dependence of the indicator η vs. the position of the scanning “window” with the width of the “window” $w_x = 10.5$ mm (b); dependence of the identification error $\Delta_{П2}$ vs. the size of the “window” w_x (c)

изображений. По координатам порождающей точки рассчитано по формулам (10) и (11) точное положение второй точки соответствия, которое составило $\mathbf{p}_{П2 \text{ точн}} = (135,9 \ 170)^T$ мм (рис. 3, b). Сравнив с этим точным значением найденное результирующее положение сканирующего «окна», определим ошибку идентификации (2).

Результат поиска сканирующим «окном» на правом изображении зависит от ширины «окна» (рис. 3, e). На рис. 3, e видно, что при ширине «окна» $w_x = 10,5$ мм результат идентификации оказывается ложным: вместо $x_{П2 \text{ точн}} = 135,9$ мм или близкого к этому значения, результирующее положение сканирующего «окна» определилось как $\hat{x}_{П2} = 41,8$ мм (рис. 3, c). Такой ошибочный результат получен в соответствии с минимумом зависимости квадратического отклонения от положения сканирующего «окна» (рис. 3, d). Эта зависимость имеет два наименьших локальных минимума — ложный слева и правильный справа. Ложный локальный минимум оказался меньше правильного, что привело к ложной идентификации.

Во втором эксперименте (рис. 4) зона неопределенности прогнозировалась с использованием предложенного в работе математического аппарата. Результаты, вычисленные по первой формуле (16) для $H_{\max}$ и $H_{\min}$, получены следующие: $x_{2л} = 134,1$ мм, $x_{2пр} = 136,2$ мм. Ширина расчетной зоны неопределенности, таким образом, составила $d_{зн \text{ расч}} = 2,1$ мм, что более чем в 60 раз меньше, чем $d_{зн}$ в первом эксперименте.

Результирующее положение сканирующего «окна» на изображении составило 134,8 мм (рис. 4, a), что близко к точному положению второй точки соответствия; это наглядно видно из сравнения с рис. 3, b.

Такая успешная идентификация объясняется следующим. В результате сужения зоны неопределенности более чем в 60 раз зависимость квадратического отклонения от положения сканирующего «окна» имеет только один минимум, соответствующий точному положению второй точки соответствия (рис. 4, b). Ложный

минимум находится далеко за пределами расчетной зоны неопределенности. Ошибка определения положения второй точки соответствия незначительна при всех размерах «окна» (рис. 4, c), в том числе и при размере «окна» $w_x = 10,5$ мм, при котором в первом эксперименте получилась ложная идентификация.

Предложенный математический аппарат чувствителен к положению контрольной точки соответствия: чем выше она на изображении, тем меньше ширина зоны неопределенности (рис. 5).

И, конечно, расчетная зона неопределенности зависит от максимальной высоты рельефа, что видно на рис. 5: чем рельеф выше, тем больше зона неопределенности. Минимальная высота рельефа остается неизменной и равной нулю для всех представленных графиков.

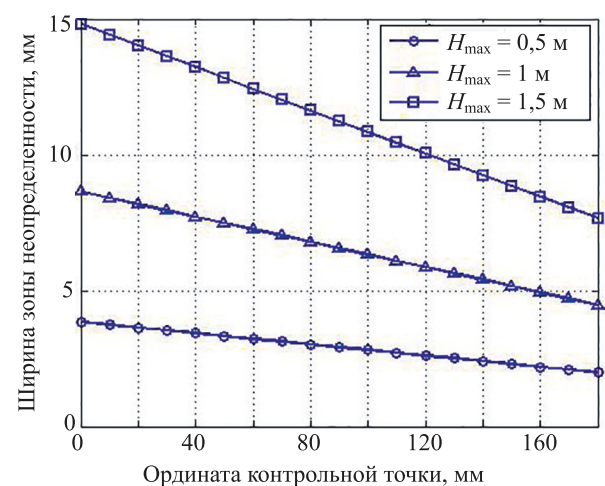


Рис. 5. Зависимости размера зоны неопределенности от положения контрольной точки соответствия при разных значениях $H_{\max}$

Fig. 5. Dependence of the size of the uncertainty zone vs. the control correspondence point position for different values of $H_{\max}$

Заключение

Разработанный математический аппарат позволя-ет априори, расчетным путем, ограничить зону неопределенности минимальным интервалом, в котором заведомо находится точка соответствия на правом изображении. Такая возможность повышает эффективность идентификации за счет сокращения времени и вычислительных затрат на поисковую процедуру. Кроме этого, расчетное прогнозирование зоны неопределенности существенно уменьшает вероятность ложной идентификации, что наглядно продемонстрировано в компьютерных экспериментах.

Расчетное прогнозирование зоны неопределенности осуществлено по параметрам стереоскопической телевизионной системы, которые известны, и априорной информации о предельных высотах рельефа. Отметим, что зона неопределенности имеет разную ширину в зависимости от положения на изображении контроль-

ной точки, что говорит о гибкости и оптимальности предложенного математического аппарата.

Для плоского рельефа разработанный математический аппарат позволяет прогнозировать положение искомой точки соответствия на втором изображении и стереоскопическое рассогласование по заданным координатам на изображении контрольной точки соответствия.

В работе не рассмотрен случай отсутствия точки соответствия на втором изображении из-за смещения полей зрения камер или из-за окклюзий. Однако предложенный подход позволяет расчетным путем определить положение границ зоны неопределенности на втором изображении. Если эти границы находятся вне области изображения, то очевидно отсутствие точки соответствия на втором изображении вследствие смещения полей зрения камер. Если же имеет место окклюзия, то те же расчетные границы зоны неопределенности позволяют надежнее обнаружить это явление, чем поиск второй точки соответствия в более широкой области, не ограниченной расчетным путем.

Литература

1. Луманн Т., Робсон С., Кайл С., Бом Я. Ближняя фотограмметрия и 3D-зрение / пер. с англ. М.: ЛЕНАНД, 2018. 704 с.
2. Назаров А.С. Фотограмметрия: пособие для студентов вузов / 2-е изд., перераб. и доп. Минск: ТетраСистемс, 2010. 400 с.
3. Pepe M., Costantino D., Alfio V.S., Voza G., Cartellino E. A novel method based on deep learning, GIS and geomatics software for building a 3D city model from VHR satellite stereo imagery // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. V. 10. N 10. P. 697. <https://doi.org/10.3390/ijgi10100697>
4. Ma Y., Li Q., Chu L., Zhou Y., Xu C. Real-time detection and spatial localization of insulators for UAV inspection based on binocular stereo vision // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. N 2. P. 230. <https://doi.org/10.3390/rs13020230>
5. Ding J., Yan Z., We X. High-accuracy recognition and localization of moving targets in an indoor environment using binocular stereo vision // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. V. 10. N 4. P. 234. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040234>
6. Albanwan H., Qin R. A comparative study on deep-learning methods for dense image matching of multi-angle and multi-date remote sensing stereo-images // *The Photogrammetric Record*. 2022. V. 37. N 180. P. 385–409. <https://doi.org/10.1111/phor.12430>
7. Fan R., Wang H., Cai P., Wu J., Bocus M.J., Qiao L., Liu M. Learning collision-free space detection from stereo images: Homography matrix brings better data augmentation // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2022. V. 27. N 1. P. 225–233. <https://doi.org/10.1109/tmech.2021.3061077>
8. Yang G., Liao Y. An improved binocular stereo matching algorithm based on AANet // *Multimedia Tools and Applications*. 2023. V. 82. N 26. P. 40987–41003. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-15183-6>
9. Han Y., Pan C., Cheng Z., Xu Y. A PTV-based feature-point matching algorithm for binocular stereo photogrammetry // *Measurement Science and Technology*. 2023. V. 34. N 12. P. 125602. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/acf875>
10. Wei H., Meng L. An accurate stereo matching method based on color segments and edges // *Pattern Recognition*. 2023. V. 133. P. 108996. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2022.108996>
11. Якасова Н.В. Алгоритмы поиска регулярных объектов на изображениях // *Образовательные ресурсы и технологии*. 2016. № 2. С. 277–281.
12. Фаворская М.Н., Тупицын И.В. Метод повышения устойчивости сопоставлений на стереоизображениях // *Механика, управление и информатика*. 2012. № 3(9). С. 139–144.
13. Chen M., Duan Z., Lan Z., Yi S. Scene reconstruction algorithm for unstructured weak-texture regions based on stereo vision // *Applied*

References

1. Luhmann T., Robson S., Kyle S., Boehm J. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. Moscow, LENAND Publ., 2018, 704 p.
2. Nazarov A.S. *Photogrammetry*. 2nd ed., Minsk, TetraSystems Publ., 2010, 400 p. (in Russian)
3. Pepe M., Costantino D., Alfio V.S., Voza G., Cartellino E. A novel method based on deep learning, GIS and geomatics software for building a 3D city model from VHR satellite stereo imagery. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, vol. 10, no. 10, pp. 697. <https://doi.org/10.3390/ijgi10100697>
4. Ma Y., Li Q., Chu L., Zhou Y., Xu C. Real-time detection and spatial localization of insulators for UAV inspection based on binocular stereo vision. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 230. <https://doi.org/10.3390/rs13020230>
5. Ding J., Yan Z., We X. High-accuracy recognition and localization of moving targets in an indoor environment using binocular stereo vision. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, vol. 10, no. 4, pp. 234. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040234>
6. Albanwan H., Qin R. A comparative study on deep-learning methods for dense image matching of multi-angle and multi-date remote sensing stereo-images. *The Photogrammetric Record*, 2022, vol. 37, no. 180, pp. 385–409. <https://doi.org/10.1111/phor.12430>
7. Fan R., Wang H., Cai P., Wu J., Bocus M.J., Qiao L., Liu M. Learning collision-free space detection from stereo images: Homography matrix brings better data augmentation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 225–233. <https://doi.org/10.1109/tmech.2021.3061077>
8. Yang G., Liao Y. An improved binocular stereo matching algorithm based on AANet. *Multimedia Tools and Applications*, 2023, vol. 82, no. 26, pp. 40987–41003. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-15183-6>
9. Han Y., Pan C., Cheng Z., Xu Y. A PTV-based feature-point matching algorithm for binocular stereo photogrammetry. *Measurement Science and Technology*, 2023, vol. 34, no. 12, pp. 125602. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/acf875>
10. Wei H., Meng L. An accurate stereo matching method based on color segments and edges. *Pattern Recognition*, 2023, vol. 133, pp. 108996. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2022.108996>
11. Yakasova N.V. Search algorithms for the regular objects in the image. *Educational Resources and Technologies*, 2016, no. 2, pp. 277–281. (in Russian)
12. Favorskaya M.N., Toupitsyn I.V. Improving robust method of feature points correspondences on stereo images. *Mechanics, Control and Informatics*, 2012, no. 3(9), pp. 139–144. (in Russian)

- Sciences. 2023. V. 13. N 11. P. 6407. <https://doi.org/10.3390/app13116407>
14. Liu C.W., Wang H., Guo S., Bocus M.J., Chen Q., Fan R. Stereo matching: fundamentals, state-of-the-art, and existing challenges // *Autonomous Driving Perception: Fundamentals and Applications*. Springer Nature Singapore, 2023. P. 63–100. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4287-9_3
 15. Фаворская М.Н., Тупицын И.В. Иерархический метод поиска соответствующих точек на стереоизображениях // *Вестник Сибирского государственного Аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнёва*. 2012. № 1(41). С. 62–67.
 16. Степанов Д.Н. Методики сопоставления особых точек в задаче визуальной навигации БПЛА // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика*. 2015. Т. 4. № 4. С. 32–47. <https://doi.org/10.14529/cmse150402>
 17. Гошин Е.В., Фурсов В.А. Метод согласованной идентификации в задаче определения соответственных точек на изображении // *Компьютерная оптика*. 2012. Т. 36. № 1. С. 131–135.
 18. Орлов В.П., Шариков Е. Алгоритм нахождения и классификации особых точек объекта на основе детектора Харриса // *Наноиндустрия*. 2017. № S(74). С. 171–178.
 19. Гук А.П., Алтынцева М.А. Автоматическая идентификация соответственных точек на аэроснимках лесных массивов // *Вестник СГУГиТ*. 2017. Т. 22. № 4. С. 68–77.
 20. Загорский М.Ю., Богданов В.Л., Гарманов В.В., Королева В.П., Рябов Ю.В. Математическая модель снимков стереопары и алгоритм восстановления рельефа местности на ее основе // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 3. С. 36–51.
 21. Самойленко М.В. Векторно-матричный метод восстановления пространственных координат точки в общем случае стереосъемки // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18. № 6. С. 954–960. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-6-954-960>
 22. Самойленко М.В. Влияние асимметрии интенсивности на ошибку идентификации стереоизображений // *Измерительная техника*. 2023. № 5. С. 22–28. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-5-22-28>
 13. Chen M., Duan Z., Lan Z., Yi S. Scene reconstruction algorithm for unstructured weak-texture regions based on stereo vision. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 11, pp. 6407. <https://doi.org/10.3390/app13116407>
 14. Liu C.W., Wang H., Guo S., Bocus M.J., Chen Q., Fan R. Stereo matching: fundamentals, state-of-the-art, and existing challenges. *Autonomous Driving Perception: Fundamentals and Applications*. Springer Nature Singapore, 2023, pp. 63–100. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4287-9_3
 15. Favorskaya M.N., Tupitsyn I.V. Hierarchical method of search of corresponding points at stereoimages. *The Siberian Aerospace Journal*, 2012, no. 1(41), pp. 62–67. (in Russian)
 16. Stepanov D.N. Techniques of feature points matching in the problem of uav's visual navigation. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*, 2015, vol. 4, no. 4, pp. 32–47. <https://doi.org/10.14529/cmse150402>
 17. Goshin Ye.V., Fursov V.A. Conformed identification in corresponding points detection problem. *Computer Optics*, 2012, vol. 36, no. 1, pp. 131–135. (in Russian)
 18. Orlov V.P., Sharikov E.N. Algorithm of finding and classifying special points of object on the basis of Harris's detector. *Journal Nanoindustry*, 2017, no. S(74), pp. 171–178. (in Russian)
 19. Guk A.P., Altyntsev M.A. Automatic identification of corresponding points for aerial images of forest areas. *Vestnik of SSUGT*, 2017, vol. 22, no. 4, pp. 68–77. (in Russian)
 20. Zagorskii M.Yu., Bogdanov V.L., Garmanov V.V., Koroleva V.P., Ryabov Yu.V. Mathematical model of stereo images and terrain reconstruction algorithm based on it. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, vol. 12, no. 3, pp. 36–51. (in Russian)
 21. Samoilenko M.V. Vector-matrix method for restoration of point spatial coordinates in stereo photography general case. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 954–960. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-6-954-960>
 22. Samoilenko M.V. Effect of Intensity asymmetry on stereo image identification error. *Measurement Techniques*, 2023, vol. 66, no. 5, pp. 311–319. <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02229-2>

Авторы

Самойленко Марина Витальевна — кандидат технических наук, доцент, независимый исследователь, Москва, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-4798-2414>, samoi.mar@mail.ru

Хачикян Владимир Александрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0006-1279-7661>, zaktol@yandex.ru

Authors

Marina V. Samoilenko — PhD, Associate Professor, Independent Researcher, Moscow, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4798-2414>, samoi.mar@mail.ru

Vladimir A. Hachikian — PhD, Associate Professor, Senior Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0006-1279-7661>, zaktol@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 04.09.2023
Одобрена после рецензирования 09.12.2023
Принята к печати 16.01.2024

Received 04.09.2023
Approved after reviewing 09.12.2023
Accepted 16.01.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»