

ФОРМИРОВАНИЕ ЭТАЛОННЫХ ПАР СОВМЕЩЕННЫХ РАЗНОМОДАЛЬНЫХ РАЗНОВРЕМЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЛИНИЙ

Е.М. ШЕМЕТОВИЧ, Г.А. ФРОЛОВ, М.И. ЗОРЬКО, В.В. ЧЕПИКОВА, В.Ю. ЦВЕТКОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 20.04.2026

Аннотация. Рассматривается задача оценки устойчивости линий на изображениях видимого и инфракрасного диапазонов к изменению погодных-временных условий видеорегистрации. Исследованы значения взвешенного количества несоответствующих объектов на эталонных парах, совмещенных разномодальных разновременных изображений. Установлено, что вейвлет-преобразование по сравнению с преобразованием Кэнни обеспечивает выделение более устойчивых линий, сохраняющих свое положение при изменении погодных-временных условий формирования изображений в видимом и инфракрасном диапазонах.

Ключевые слова: Гомография, разномодальные изображения, разновременные изображения, компьютерное зрение, OpenCV, Qt, совмещение изображений, детектор линий, вейвлет.

Введение

Для ориентирования в пространстве мобильный робот использует ключевые объекты. Часто в качестве таких объектов выступают точки изображений, локализуемые на изображениях в местах резкого изменения градиента с помощью соответствующих детекторов [1, 2]. В условиях открытого пространства изменение погодных-временных условий формирования изображений резко усложняет задачу сопоставления ключевых объектов изображений. Локализация точек в этом случае оказывается крайне нестабильной, что требует использования более устойчивых ключевых объектов, например, линий. Исследование устойчивости ключевых объектов к изменению погодных-временных условий становится критически важной задачей и требует создания набора эталонных данных для тестирования детекторов ключевых точек. Целью работы является разработка программного средства пространственного совмещения разномодальных изображений, необходимого для последующего анализа и обработки данных из различных источников (оптические, тепловизионные, мультиспектральные, рентгеновские изображения, данные радара с синтезированной апертурой).

Алгоритм полуавтоматического формирования эталонных пар, совмещенных разномодальных разновременных изображений

Разработан алгоритм полуавтоматического совмещения разномодальных разновременных изображений, полученных в общем случае разнодиапазонными сенсорами в различных масштабах, ракурсах, в различные моменты времени (различные сезонность, время суток), в разных погодных условиях. Алгоритм состоит из следующих шагов.

1. Загрузка исходных изображений $I_A(t_1)$ и $I_B(t_2)$, полученных камерами А и В в моменты времени t_1 и t_2 .

2. Назначение опорной точки $P_{ATL}(t_1)$ в верхней левой четверти изображения $I_A(t_1)$. Выбор для нее соответствующей опорной точки $P_{BTL}(t_2)$ изображения $I_B(t_2)$.

3. Назначение опорной точки $P_{ATR}(t_1)$ в верхней правой четверти изображения $I_A(t_1)$. Выбор для нее соответствующей опорной точки $P_{BTR}(t_2)$ изображения $I_B(t_2)$.

4. Назначение опорной точки $P_{ABL}(t_1)$ в нижней левой четверти изображения $I_A(t_1)$. Выбор для нее соответствующей опорной точки $P_{BBL}(t_2)$ изображения $I_B(t_2)$.

5. Назначение опорной точки $P_{ABR}(t_1)$ в нижней правой четверти изображения $I_A(t_1)$. Выбор для нее соответствующей опорной точки $P_{BRL}(t_2)$ изображения $I_B(t_2)$.

6. Формирование матрицы $H(I_A(t_1), I_B(t_2))$ гомографии [3] с помощью алгоритма f_{DTL} (DLT – Direct Linear Transformation) на основе сопоставления соответствующих пар опорных точек изображений $I_A(t_1)$ и $I_B(t_2)$, $H(I_A(t_1), I_B(t_2)) =$

$$= f_{DTL}(P_{ATR}(t_1), P_{BTL}(t_2); P_{ATR}(t_1), P_{BTR}(t_2); P_{ABL}(t_1), P_{BBL}(t_2); P_{ABR}(t_1), P_{BRL}(t_2)),$$

$$H(I_A(t_1), I_B(t_2)) = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}.$$

7. Гомография изображения $I_B(t_2)$. Формирование преобразованного изображения $I_B(t_2)$ в результате переноса каждого пикселя изображения $I_B(t_2)$ с координатами (y_B, x_B) в пиксель изображения $I_B(t_2)$ с координатами (y_B, x_B) , вычисляемыми с помощью выражений [3]

$$y_B = \frac{h_{21}x_B + h_{22}y_B + h_{23}}{h_{31}x_B + h_{32}y_B + h_{33}}, \quad (1)$$

$$x_B = \frac{h_{11}x_B + h_{12}y_B + h_{13}}{h_{31}x_B + h_{32}y_B + h_{33}}. \quad (2)$$

8. Обрезка изображений $I_A(t_1)$ и $I_B(t_2)$. Выбор двух точек на изображении $I_A(t_1)$, отмечающих вершины на диагонали прямоугольного окна, и поиск алгоритмами (ORB, AKAZE, BRISK) двух соответствующих точек на изображении $I_B(t_2)$. Фрагменты изображений $I_A(t_1)$ и $I_B(t_2)$, ограниченные заданным прямоугольным окном, сохраняются в качестве соответствующих эталонных изображений.

Программное обеспечение подготовки пар, совмещенных разномодальных разновременных изображений

Для реализации разработанного алгоритма полуавтоматического формирования пар совмещенных разномодальных разновременных изображений разработано соответствующее программное средство на языке C++ с использованием Qt и OpenCV. Программное средство обеспечивает загрузку пары изображений (рис. 1), интерактивный выбор на них опорных точек с использованием масштабируемых окон и пиксельной мозаики для повышения точности или альтернативно через ввод координат (рис. 2), с возможностью их последующего редактирования. После выбора соответствующих точек вычисляется матрица гомографии, осуществляется преобразование второго изображения относительно первого, визуализация наложения трансформированного изображения для верификации, предоставляется возможность выделения и сохранения прямоугольной области интереса с помощью соответствующих программных инструментов. Для упрощения работы оператора поддерживается возможность сохранения и загрузки данных об изображениях и уже выставленных на них точках. Программное средство

позволяет создавать высококачественные размеченные наборы данных, необходимые для обучения и верификации алгоритмов анализа.

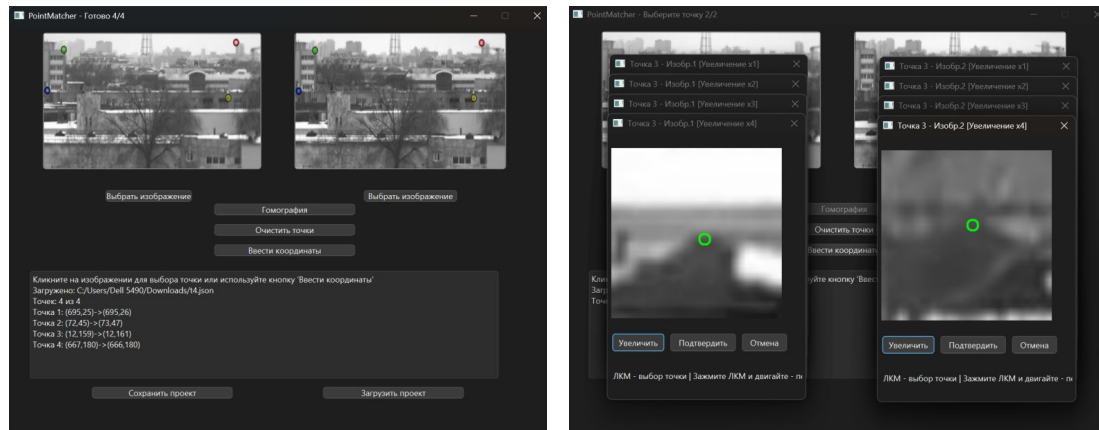


Рис. 1. Интерфейсы программы для загрузки изображений и выбора ключевых точек

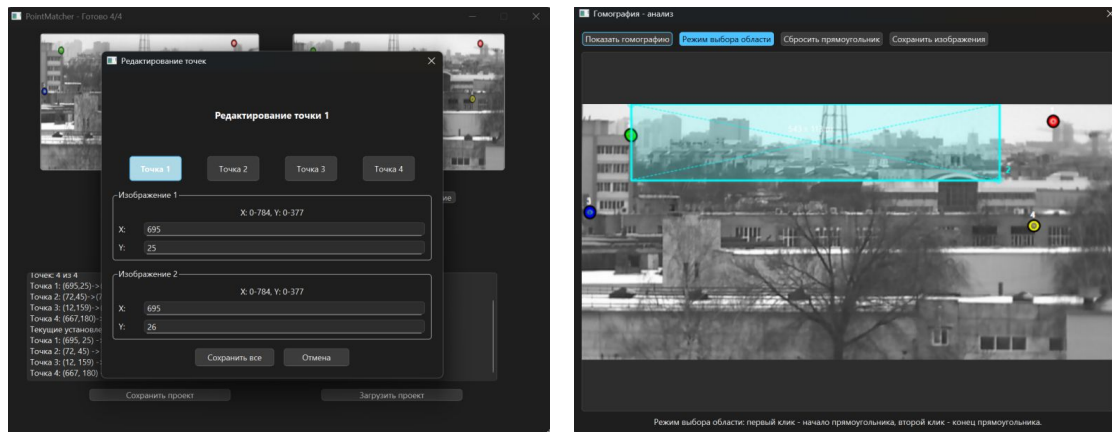


Рис. 2. Интерфейсы программы для ввода координат ключевых точек и формирования области интереса

Оценка качества детекторов линий с использованием эталонных пар совмещенных разномодальных разновременных изображений

Для оценки качества детекторов линий предлагается использовать устойчивость выделяемых ими линий к изменению погодных-временных условий формирования разномодальных изображений камерами видимого и инфракрасного диапазонов. Устойчивость линий предлагается оценивать по значению взвешенного количества N_E несоответствующих объектов, вычисляемые в результате приведения количества $N_E(t_1, t_2) + N_E(t_2, t_1)$ несоответствующих объектов $N_E(t_1, t_2)$ и $N_E(t_2, t_1)$ на изображениях $I_A(t_1)$ и $I_B(t_2)$ к общему количеству $N_O = N_O(t_1) + N_O(t_2)$ объектов на одном $N_O(t_1)$ и другом $N_O(t_2)$ изображениях с помощью выражения $N_E = \frac{N_E}{N_O}$. Изображения отличаются яркостью, контрастом,

распределением теней, положениями динамических объектов. Различия в условиях формирования изображений приводят к изменению количества и положения линий, выделяемых детекторами. В результате для многих линий одного изображения отсутствуют линии в соответствующих координатах на другом изображении. В итоге, при сравнении разновременных кадров возникает значительное количество ложноположительных и ложноотрицательных результатов детектирования. На рис. 3 и 4 показаны эталонные пары совмещенных изображений

видимого и инфракрасного диапазонов снятые с разных ракурсов в разные периоды времени и комбинированные изображения, которые являются результатом их слияния.

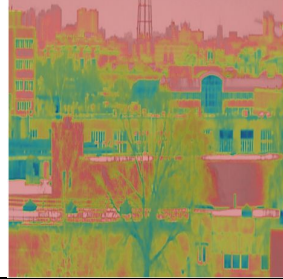
Изображения	Видимый диапазон	Инфракрасный диапазон	Комбинированный диапазон
$I_A(t_1)$			
$I_B(t_2)$			

Рис. 3. Эталонные пары совмещенных изображений (первый ракурс)

Изображения	Видимый диапазон	Инфракрасный диапазон	Комбинированный диапазон
$I(t_1)$			
$I(t_2)$			
$I(t_3)$			

Рис. 4. Эталонные пары совмещенных изображений (второй ракурс)

В табл. 1-3 приведены взвешенные ошибки (N_E) детектирования контуров детектором Кэнни и вейвлет-детектором, при коэффициенте перекрытия $k_x=0.75$ и дилатации $d=0$. Значение

$k_x=0.75$ означает, что 75 % линии на одном изображении совпало на втором, чтобы они считались совпавшими; $d=0$ означает, что контуры в экспериментах не расширяются.

Табл. 1. Взвешенные характеристики N_E результатов детектирования объектов (первый ракурс)

Детектор	Значения N_E для эталонных пар изображений в различных диапазонах		
	видимый	инфракрасный	комбинированный
Кэнни [3]	0,902	0,870	0,870
Вейвлет [4]	0,695	0,637	0,771

Табл. 2. Взвешенные характеристики N_E результатов детектирования объектов, полученные вейвлет-детектором (второй ракурс)

Сравниваемые пары изображений	Значения N_E для эталонных пар изображений в различных диапазонах		
	видимый	инфракрасный	комбинированный
$I(t_1)$ и $I(t_2)$	0,910	0,786	0,837
$I(t_1)$ и $I(t_3)$	0,764	0,729	0,723
$I(t_2)$ и $I(t_3)$	0,720	0,760	0,768

Табл. 3. Взвешенные характеристики N_E результатов детектирования объектов, полученные детектором Кэнни (второй ракурс)

Сравниваемые пары изображений	Значения N_E для эталонных пар изображений в различных диапазонах		
	видимый	инфракрасный	комбинированный
$I(t_1)$ и $I(t_2)$	0,982	0,978	0,983
$I(t_1)$ и $I(t_3)$	0,980	0,979	0,991
$I(t_2)$ и $I(t_3)$	0,984	0,976	0,988

Из табл. 1-3 следует, что линии, выделяемые с помощью вейвлет-преобразования, значительно более устойчивы к изменению погодных-временных условий формирования изображений по сравнению с линиями, выделяемыми с помощью преобразования Кэнни, для изображений всех диапазонов.

Оценка зависимости детектирования линий от показателей метрик оценивающих качество цифровых изображений

Оценка качества цифровых изображений (image quality assessment, IQA) – это неотъемлемый этап их анализа в различных автоматизированных системах. Понятие качества можно трактовать по-разному, в зависимости от целей использования изображений оно может быть связано как с визуальными, так и с художественными особенностями восприятия снимка человеком. Факторы, влияющие на качество, включают в себя равномерность освещения сцены и яркость изображения, его разрешение, контрастность, резкость и точность цветопередачи. Далее будут рассмотрены метрики $SSIM$ и корреляция Пирсона [5].

Функция вычисления индекса структурного подобия основана на локальных оценках сходства $ssim$, вычисленных между двумя окнами x и y размером $N \times N$ пикселей, рассчитанных вокруг соответствующих пикселей на изображениях A и B равных размеров согласно выражению:

$$ssim(x, y) = \frac{(2\mu_x \mu_y + c_1) * (2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1) * (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)},$$

где μ_x – среднее значение в окне x ; μ_y – среднее значение в окне y ; σ_x^2 – дисперсия значений в окне x ; σ_y^2 – дисперсия значений в окне y ; σ_{xy} – ковариация в окнах x и y ; константы $c_1 = (k_1 L)^2$ и

$c_2=(k_2L)^2$, $L=255$, – значения динамического диапазона допустимых значений яркости; $k_1=0.01$, $k_2=0.03$ – экспериментально определенные константы. Итоговый индекс $SSIM$ для изображений A и B вычисляется как среднее арифметическое локальных оценок по формуле:

$$SSIM(A,B)=\frac{1}{M}\sum_{x,y}ssim(x,y),$$

где A и B – два изображения одинакового размера, M – количество окон. Каждая локальная оценка $ssim(x,y)$ рассчитывается в окрестности каждого пикселя с координатами (x,y) с некоторым шагом. Значения индекса $SSIM$ лежат в диапазоне $[-1,1]$.

Функция вычисления коэффициента корреляции Пирсона основана на анализе линейной зависимости между двумя изображениями A и B одинакового размера $N \times M$ пикселей. Она вычисляется как отношение ковариации значений яркости пикселей изображений к произведению их стандартных отклонений согласно выражению:

$$corr(A,B)=\frac{\sum_{i=1}^N\sum_{j=1}^M(I_A(i,j)-\bar{I}_A)(I_B(i,j)-\bar{I}_B)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N\sum_{j=1}^M(I_A(i,j)-\bar{I}_A)^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^N\sum_{j=1}^M(I_B(i,j)-\bar{I}_B)^2}},$$

где $I_A(i,j)$ и $I_B(i,j)$ – значения яркости пикселей в координатах (i,j) изображения A и B соответственно; $\bar{I}_A$ и $\bar{I}_B$ – средние значения яркости по всему изображению A и B .

Значения коэффициента корреляции Пирсона лежат в диапазоне $[-1,1]$. Значение 1 достигается, когда изображения полностью идентичны (линейная зависимость); значение 0 указывает на отсутствие корреляции, а значение -1 свидетельствует о том, что изображения являются инвертированными (негативными) копиями друг друга. В отличие от индекса $SSIM$, коэффициент корреляции Пирсона вычисляется для всего изображения целиком (глобально), что обеспечивает его высокую вычислительную эффективность.

Табл. 4, рис. 5 являются сводными для показателей сходства изображений $SSIM$ и коэффициента корреляции Пирсона ($Pearson$). Из табл. 4 следует, что выбор метрик сходства влияет на оценку качества обработки: низкие показатели корреляции Пирсона в комбинированном диапазоне требуют использования более надежного структурного индекса $SSIM$.

Табл. 4. Показатели структурного и линейного сходства изображений

Диапазон	Сравниваемые пары изображений	$SSIM$	$Pearson$	Сравниваемые пары изображений	$SSIM$	$Pearson$
Видимый	$I(t_1)$ и $I(t_2)$	0,71	0,85	$I(t_2)$ и $I(t_3)$	0,59	0,76
	$I(t_1)$ и $I(t_3)$	0,58	0,72	$I_A(t_1)$ и $I_B(t_2)$	0,81	0,94
Инфракрасный	$I(t_1)$ и $I(t_2)$	0,73	0,84	$I(t_2)$ и $I(t_3)$	0,69	0,78
	$I(t_1)$ и $I(t_3)$	0,69	0,73	$I_A(t_1)$ и $I_B(t_2)$	0,81	0,85
Комбинированный	$I(t_1)$ и $I(t_2)$	0,66	0,20	$I(t_2)$ и $I(t_3)$	0,63	0,42
	$I(t_1)$ и $I(t_3)$	0,60	0,17	$I_A(t_1)$ и $I_B(t_2)$	0,85	0,84

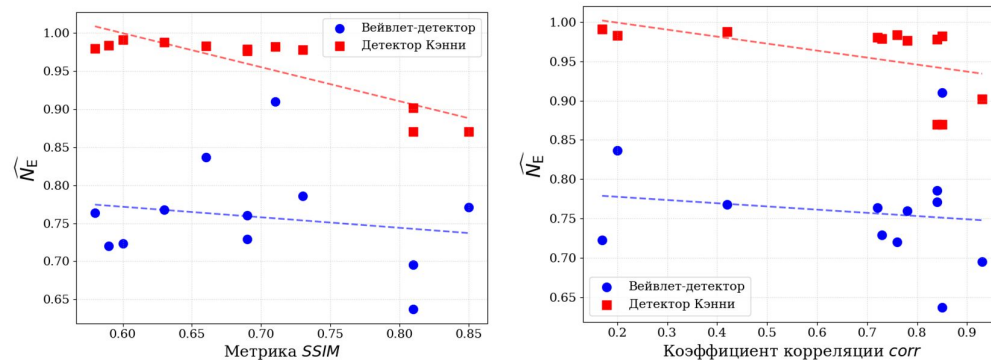


Рис. 5. Зависимости ошибок выделения контуров от $SSIM$ и коэффициента корреляции Пирсона

Из рис. 5 следует, что присутствует связь между сходством изображений, определяемых метриками и устойчивости детектирования линий.

Заключение

Разработан алгоритм формирования эталонных пар, совмещенных разномодальных разновременных изображений, позволяющий с помощью гомографии по четырем заданным парам опорных точек на двух совмещаемых изображениях получать их синхронизированные по растру фрагменты. Эталонные пары изображений использованы для оценки качества детекторов линий на основе взвешенного количества несоответствующих объектов. Установлено, что для изображений видимого и инфракрасного диапазонов вейвлет-преобразование по сравнению с преобразованием Кэнни обеспечивает выделение более устойчивых линий, сохраняющих свое положение при изменении погодных-временных условий формирования изображений. Установлена зависимость устойчивости детектирования линий к изменению погодных-временных условий их формирования от схожести изображений.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) и Национального фонда естественных наук Китая (НФЕНК) в рамках проекта T25КИ-054 «Технология многокамерной локализации и построения карты открытого пространства».

FORMATION OF REFERENCE PAIRS OF MULTIMODAL MULTI-TEMPORAL IMAGES FOR EVALUATING LINE DETECTION QUALITY

E.M. SHEMETOVICH, G.A. FROLOV, M.I. ZORKO, V.V. CHEPIKOVA, V.YU. TSVIATKOU

Abstract. The problem of evaluating the stability of lines in visible and infrared range images to changes in weather and temporal video recording conditions is considered. The values of the weighted quantity of mismatched objects on reference pairs of aligned multimodal multi-temporal images are investigated. It is established that the wavelet transform, compared to the Canny transform, provides the extraction of more stable lines that maintain their position when weather and temporal conditions of image formation change in both visible and infrared ranges.

Keywords: Homography, multimodal images, multi-temporal images, computer vision, OpenCV, Qt, image alignment, line detector, wavelet.

Список литературы

1. Lowe D. // International Journal of Computer Vision. 2004. Vol. 60. P. 91–110.
2. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. // Proc. of the 9th European Conference on Computer Vision (ECCV). 2006. P. 404–410.
3. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing. 3rd ed. Prentice Hall, 2008.
4. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005.
5. Голуб Ю. И., Старовойтов В. В. Оценка качества цифровых изображений. Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2023.