

УДК 004.93

ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ ПАНОРАМНОГО ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ АПЕРТУРОЙ

Кудинов И.А., аспирант кафедры электронно-вычислительных машин Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина, e-mail: igor.kudinov@mail.ru;

Холопов И.С., к.т.н., декан факультета радиотехники и телекоммуникаций Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина, e-mail: kholopov.i.s@rsreu.ru.

IMPROVING THE PERFORMANCE OF THE ALGORITHM FOR GENERATING A PANORAMIC VIDEO IN VISION SYSTEMS WITH A DISTRIBUTED APERTURE

Kudinov I.A., Kholopov I.S.

The optimization of the calculations performed in panorama vision systems during the personal region of interest (RoI) forming, in particular – bilinear interpolation, morphological dilation and spatial filtering – is considered. Analytical expressions and algorithms for reducing the number of arithmetic operations involved in the implementation of these procedures are given. It is shown that when implementing computations on single core PC processor, the use of the considered optimization algorithms in a distributed panoramic system with five cameras allows to increase the speed of RoI forming by 5,4 times.

Key words: panorama vision systems, bilinear interpolation, morphological dilation, optimization algorithms.

Ключевые слова: панорамное изображение, матрица гомографии, блендинг, дилатация, метрика Манхеттена, билинейная интерполяция.

Введение

Анализ публикаций в отечественной [1-7] и зарубежной [8-12] периодике показывает актуальность исследований по формированию панорамных фото- и видеоизображений по информации от нескольких камер с пересекающимися полями зрения. Сшивка изображений с различных камер в единый панорамный кадр предполагает оценку матрицы гомографии [13-17], определяющей связь между системами координат i -й и j -й камер. Указанная оценка может выполняться по двум стратегиям: либо путем автоматического выделения особых (ключевых) точек с применением математического аппарата их дескрипторов [18-20], либо по результатам предварительной калибровки камер [21]. Первая стратегия является наиболее универсальной, но не обеспечивает хороших результатов сшивки в условиях плохой видимости, сцен с однородными текстурами, а также при объединении изображений различных спектральных диапазонов (видимого и инфракрасных). Вторая стратегия робастна к условиям съемки, однако обязательным условием ее применения является фиксированное взаимное расположение камер и наличие дальномерной информации до объектов наблюдаемой сцены.

Вне зависимости от выбранной стратегии формирование панорамы субъективно высокого качества («бесшовной» панорамы) предполагает выполнение двух операций с высокой асимптотической вычислительной сложностью (ABC):

Рассмотрены вопросы оптимизации вычислений, выполняемых при формировании персональной области интереса (ОИ), в частности – билинейной интерполяции, морфологической дилатации и пространственной фильтрации. Приведены аналитические выражения и алгоритмы для сокращения количества арифметических операций, затрачиваемых на реализацию перечисленных процедур. Показано, что при реализации вычислений на одном ядре процессора ПЭВМ применение рассмотренных алгоритмов оптимизации в распределенной панорамной системе с пятью камерами позволяет повысить скорость формирования ОИ в 5,4 раза.

1) билинейной интерполяции при поиске соответствия между пиксельными координатами камер;

2) сглаживания перепадов яркости (блендинга) на границах составных частей панорамного кадра, обусловленных различными условиями экспонирования при съемке с различных ракурсов.

Целью работы является оптимизация вычислительных затрат на реализацию билинейной интерполяции и блендинга при формировании панорамных изображений по информации от камер оптико-электронной системы с распределенной апертурой.

При оптимизации будем полагать, что все камеры формируют цифровое полутоновое изображение в формате 8 бит на цвет.

Варианты реализации процедуры билинейной интерполяции

Переход из системы координат камеры i в систему координат камеры j , реализуемый умножением однородных координат i -й камеры \mathbf{x}_i на матрицу гомографии \mathbf{H}_{ji} ,

$$\mathbf{x}_j = \mathbf{H}_{ji} \mathbf{x}_i, \quad (1)$$

где $\mathbf{x}_i = [x_i, y_i, 1]^T$, $\mathbf{x}_j = [x_j, y_j, 1]^T$, а (x_i, y_i) и (x_j, y_j) – пиксельные координаты i -й и j -й камер, приводит к дробным

однородным координатам x_j [13, 22]. Поскольку значения яркости цифровых изображений определены только в узлах дискретной решетки с целочисленными пиксельными координатами [22, 23], то для определения яркости $I(u_j, v_j)$ в точке (u_j, v_j) применяют двумерную интерполяцию. Широкое распространение в практике цифровой обработки изображений получила билинейная интерполяция (БИ) [22], суть которой сводится к двухэтапной последовательной интерполяции яркости: например, сначала по оси x – между точками $(\lfloor x_j \rfloor, \lfloor y_j \rfloor)$, $(\lfloor x_j \rfloor, \lfloor y_j \rfloor + 1)$ и $(\lfloor x_j \rfloor + 1, \lfloor y_j \rfloor)$, $(\lfloor x_j \rfloor + 1, \lfloor y_j \rfloor + 1)$, где символом $\lfloor \cdot \rfloor$ обозначено округление до ближайшего меньшего целого числа, а затем – по оси y . Результат БИ не зависит от порядка выполнения интерполяции по строкам и столбцам [23].

Геометрическая постановка задачи БИ [24-26] приведена на рис. 1.

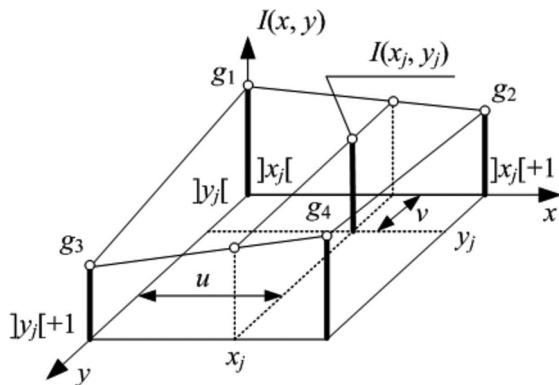


Рис. 1. Иллюстрация геометрической постановки задачи

Введя обозначения $x = \lfloor x_j \rfloor$, $y = \lfloor y_j \rfloor$, $u = x_j - x$, $v = y_j - y$, получив ее решение при последовательном (двухэтапном) выполнении интерполяции по строкам и столбцам:

$$I_{ij} = I_{21} + (I_{34} - I_{21})v, \quad (2)$$

где

$$I_{21} = g_1 + (g_2 - g_1)u, \quad I_{34} = g_3 + (g_4 - g_3)u. \quad (3)$$

На рис. 1 и в формулах (2) и (3) для компактности записи приняты следующие обозначения:

$$g_1 = I(x, y), \quad g_2 = I(x+1, y), \quad g_3 = I(x, y+1), \quad g_4 = I(x+1, y+1).$$

Реализация вычисления БИ по (2) требует наличия двух дополнительных ячеек оперативной памяти для хранения интерполированных яркостей I_{21} и I_{34} помимо вспомогательных переменных u и v .

Подставив (3) в (2) и приведя подобные члены относительно значений яркости g_k , $k = 1..4$, в узлах дискретной решетки, получим [25]:

$$I(x_j, y_j) = (1-x)(1-y)g_1 + x(1-y)g_2 + (1-x)yg_3 + xyg_4, \quad (4)$$

Недостатком реализации БИ непосредственно по (3) является относительно высокая вычислительная сложность: для вычисления яркости каждого пикселя требуется выполнить 8 умножений и 7 сложений.

В [25] рассмотрен способ уменьшения вычислительной сложности, согласно которому в (4) приводятся подобные члены относительно u и v :

$$I(x_j, y_j) = uv(g_4 - g_3 - g_2 + g_1) + u(g_2 - g_1) + v(g_3 - g_1) + g_1. \quad (5)$$

Как видно из (5), для выполнения БИ для каждого

пикселя требуется 4 операции умножения и 8 операций сложения.

Дополнительно уменьшить число сложений на единицу можно введением вспомогательной суммы $g_{12} = g_1 - g_2$ или $g_{13} = g_1 - g_3$:

$$I(x_j, y_j) = uv(g_4 - g_3 + g_{12}) - ug_{12} + v(g_3 - g_1) + g_1 = uv(g_4 - g_2 + g_{13}) + u(g_2 - g_1) - g_{13}v + g_1. \quad (6)$$

В табл. 1 приведено сравнение времени выполнения БИ для изображения размером $W \times H$.

Таблица 1

Формулы для БИ	Умножений	Сложений	Количество записей вспомогательных переменных в оперативную память
(2)	$3WH$	$6WH$	$4WH$
(4)	$8WH$	$4WH$	$2WH$
(5)	$4WH$	$8WH$	$2WH$
(6)	$4WH$	$7WH$	$3WH$

Как следует из табл. 1, при выборе варианта реализации БИ следует учитывать время выполнения операций сложения, умножения и доступа к оперативной памяти для выбранного типа вычислителя. В то же время для некоторых вычислителей, например, ПЭВМ с процессором Intel Core-*i5* и оперативной памятью типа DDR4 время выполнения БИ по формулам (2), (4), (5) и (6) практически одинаково и отличается не более чем на 1 %.

Повышение быстродействия алгоритма блендинга

При формировании панорамы блендинг является одной из наиболее вычислительно ёмких операций [8, 27, 28] и имеет АВС, стремящуюся к $O(n^4)$. Это объясняется тем, что блендинг требует оценивания средней яркости в окрестности каждого из пикселей, составляющих панорамное изображение.

В процедуре блендинга можно выделить несколько основных этапов [8], АВС которых без оптимизации следующая:

1) формирование карт весовых коэффициентов для формирующих панораму изображений на основе меры удаления пикселя от центра кадра – АВС $O(n^2)$;

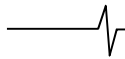
2) пространственная фильтрация изображений с камер с АВС $O(w^2n^2)$ для оценивания низкочастотной (НЧ), среднечастотной (СЧ) и высокочастотной (ВЧ) компонент, где w – горизонтальный и вертикальный размеры апертуры пространственного фильтра, а также аналогичная фильтрация для карт весовых коэффициентов; при w , стремящихся к размерам ОИ, АВС данного этапа будет стремиться к $O(n^4)$.

3) коррекция яркости пикселей на основе карт весовых коэффициентов – АВС $O(n^2)$.

Рассмотрим методы оптимизации вычислений для второго этапа блендинга, АВС которого более $O(n^2)$.

Повышение быстродействия низкочастотной фильтрации с применением ВОХ-фильтра

Для оценки яркости фоновой составляющей рационально применять процедуру быстрого сглаживания исходного изображения ВОХ-фильтром [29, 30]. Дополни-



тельно снизить вычислительные затраты позволяет использование подхода, рассмотренного в [31, 32]. Если при этом без нарушения общности задачи пространственной линейной фильтрации ввести дополнительное условие, что апертура фильтра $w \times w = 2^p \times 2^p$, $p \in \mathbb{N}$, то для вычисления отфильтрованного значения $Y_{\phi i}$ 1D ВОХ-фильтру требуется всего 2 сложения (вычитание яркости пикселя, вышедшего из апертуры фильтра, и суммирование с яркостью пикселя, накрытого ей) и одна операция сдвига на p разрядов вправо:

$$acc = acc + Y_{i+2^{p-1}} - Y_{i-2^{p-1}}, Y_{\phi i} = acc \gg p, \quad (7)$$

где acc – значение суммы яркостей пикселей, накрытых апертурой (аккумулятор), \gg – бинарный оператор сдвига вправо. Выражение (7) справедливо, если для индекса пикселя i выполняется неравенство:

$$2^{p-1} < i < W - 2^{p-1}.$$

Для реализации процедуры фильтрации по (7) требуется расширение изображения по высоте и ширине на размер апертуры фильтра [31] – по 2^{p-1} строк и столбцов сверху, снизу, слева и справа.

В силу линейности ВОХ-фильтра 2D фильтрация сводится к двум последовательным проходам по изображению 1D ВОХ-фильтром [33]: по строкам и по столбцам. В результате АВС 2D низкочастотного пространственного фильтра уменьшается с $O(w^2 n^2)$ до $O(w n^2)$.

Повышение быстродействия алгоритма многодиапазонного выравнивания яркости

Одним из популярных алгоритмов выравнивания яркости при формировании панорамного кадра является многодиапазонный блендинг (*Multi-band blending*) [8]. Его основная идея заключается в том, что для смешения низкочастотных составляющих яркости исходных изображений применяют пространственную апертуру большего размера, чем для смешения высокочастотных составляющих [34]. Поэтому на каждом k -м шаге многодиапазонного блендинга для каждого пикселя панорамного изображения с координатами (x, y) находится взвешенная сумма яркостей НЧ $I_{НЧ}$, СЧ $I_{СЧ}$ и ВЧ $I_{ВЧ}$ компонент яркости для N формирующих панораму изображений, нормированная к сумме весовых коэффициентов:

$$I_{(k)xy}^{бленд} = \frac{\sum_{i=1}^N W_{(k)xy}^{(i)} I_{(k)xy}^{(i)}}{\sum_{i=1}^N W_{(k)xy}^{(i)}}, \quad (8)$$

где $k = \{НЧ, СЧ, ВЧ\}$, $i = 1, 2, \dots, N$, а $W_{(k)}^{(i)}$ и $I_{(k)}^{(i)}$ – соответственно матрицы весов и яркостей пикселей k -го диапазона частот i -го изображения, к которому применено обратное проективное преобразование (1) для перехода от системы пиксельных координат ОИ (x, y) в систему координат i -й камеры:

$$I_{xy}^{(i)} = I(x_i, y_i),$$

где $[x_i, y_i, 1]^T = \mathbf{H}_{ОИi}^{-1}[x, y, 1]^T$, $\mathbf{H}_{ОИi}$ – матрица гомографии, определяющая переход от пиксельных координат (x_i, y_i) к пиксельным координатам (x, y) . Итоговое изображение формируется как сумма НЧ, СЧ и ВЧ компонент, к которым применен блендинг:

$$\mathbf{I}^{бленд} = \sum_k \mathbf{I}_{(k)}^{бленд}. \quad (9)$$

Для формирования матриц весовых коэффициентов $W_{(k)}^{(i)}$ требуется выполнить следующие шаги [8, 34]:

1) рассчитать матрицы удаления пикселей с координатами (x_i, y_i) от центра изображения i -й камеры по горизонтали $D_X^{(i)}$ и вертикали $D_Y^{(i)}$:

$$D_{Xxy}^{(i)} = |x_i - 0,5W^{(i)}|, D_{Yxy}^{(i)} = |y_i - 0,5H^{(i)}|, \quad (10)$$

где $W^{(i)}$ и $H^{(i)}$ – соответственно ширина и высота i -го изображения;

2) сформировать матрицы весовых коэффициентов $V^{(i)}$, элементы которых принимают значение 1 при нулевом удалении и 0 – при максимуме:

$$V_{xy}^{(i)} = \frac{2(1 - D_{Xxy}^{(i)})}{W^{(i)}} \cdot \frac{2(1 - D_{Yxy}^{(i)})}{H^{(i)}} = \frac{4}{W^{(i)} H^{(i)}} (1 - D_{Xxy}^{(i)}) (1 - D_{Yxy}^{(i)}); \quad (11)$$

3) выполнить бинаризацию элементов матриц $V_{бин}^{(i)}$:

$$V_{бин-xy}^{(i)} = \begin{cases} 1, & \text{если } V_{xy}^{(i)} = \max_{i=1..N} (V_{xy}^{(i)}), \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (12)$$

4) выполнить свертку матриц бинарных элементов $V_{бин}^{(i)}$ с маской пространственного НЧ фильтра $g^{(k)}$ размерности $w^{(k)} \times w^{(k)}$ (в [8, 29] применяют гауссовский фильтр):

$$W_{(k)}^{(i)} = V_{бин}^{(i)} \otimes \check{A}g^{(k)}, \quad (13)$$

где \otimes – оператор свертки. Для дополнительного сокращения вычислений при оценке компонент $I_{(k)}^{(i)}$ вместо гауссовского фильтра целесообразно применять ВОХ-фильтр. При этом (13) преобразуется к виду:

$$W_{(k)}^{(i)} = V_{бин}^{(i)} \check{A}ВОХ^{(k)},$$

где $ВОХ^{(k)}$ – маска ВОХ-фильтра для k -го диапазона пространственных частот.

Для распределенных панорамных систем, камеры которых жестко закреплены и в процессе эксплуатации не перемещаются друг относительно друга, вычисления по формулам (10)-(13) выполняются однократно – только на этапе инициализации [21].

При относительно больших угловых размерах пересечения полей зрения камер панорамной системы (10 % и более от ширины поля зрения каждой камеры) для сокращения АВС можно выполнять блендинг по (7) не для всех пикселей изображения, а только в пределах некоторой области – вблизи границы пересечения бинарных изображений $V_{бин}^{(i)}$. Такое упрощение допустимо при ширине данной области не менее $0,1 W$. При этом выигрыш в производительности будет тем больше, чем больше угловые размеры пересечения полей зрения камер по сравнению с угловыми размерами области выполнения блендинга.

Для определения области применения блендинга в ОИ необходимо:

1) сформировать бинарную маску (БМ) $m_{бин}$ с границами пересечения в ОИ изображений $V_{бин}^{(i)}$, составляющих панорамное поле – АВС $O(n^2)$;

2) расширить область БМ с $m_{бин}$ до $M_{бин}$, выполнив морфологическую операцию дилатации (сложения Мин-

```

// первый проход
for (j = 0; j < H; j++)
  for (i = 0; i < W; i++) {
    if (Yij == 1)
      dij = 0;
    else {
      dij = W + H;
      if (j > 0)
        dij = min(dij, di(j-1) + 1);
      if (i > 0)
        dij = min(dij, d(i-1)j + 1);
    }
  }

```

```

// второй проход
for (j = H-1; j ≥ 0; j--)
  for (i = W-1; i ≥ 0; i--) {
    if (j+1 < H)
      dij = min(dij, di(j+1) + 1);
    if (i+1 < W)
      dij = min(dij, d(i+1)j + 1);
  }
// вычисление дилатации
for (j = 0; j < H; j++)
  for (i = 0; i < W; i++)
    if (dij < 0,5D - 1)
      Yдилij = 1;
    else
      Yдилij = 0;

```

Рис. 2. Псевдокод процедуры вычисления дилатации через МР

ковского) [35] с апертурой структурирующего элемента $D \times D$ и АВС $O(D^2 n^2)$.

Как видно, такое упрощение хотя и позволяет полностью отказаться от блендинга на участках ОИ, не накрытых БМ $M_{\text{блн}}$, но в то же время увеличивает АВС за счет необходимости выполнения процедуры морфологической дилатации.

Повышение быстродействия алгоритма дилатации

Оптимизация операции морфологической дилатации бинарного изображения с апертурой структурирующего элемента $D \times D$ приводится в [36] и заключается в следующем. Для нулевых пикселей бинарного изображения строится карта расстояний $\mathbf{d} = \{d_{ij}\}$, $i = 1..W, j = 1..H$, до ближайших к ним единичных пикселей с координатами (x_{i1}, y_{i1}) , причем мерой расстояния d выступает метрика Манхэттена (манхэттенское расстояние, L_1 -норма Минковского, расстояние городских кварталов, метрика такси) [37, 38]:

$$d_{ij} = L_1[(x_i, y_i), (x_{i1}, y_{i1})] = |x_i - x_{i1}| + |y_i - y_{i1}|.$$

При этом морфологическая операция дилатации сводится к сравнению манхэттенского расстояния (МР) для каждого пикселя с порогом $0,5D - 1$:

$$I_{\text{дил_{ij}} = \begin{cases} 1, & d_{ij} \leq 0,5D - 1, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Для формирования карты МР требуется всего два прохода по изображению [36]:

- 1) от левого верхнего угла (ЛВУ) к нижнему правому углу (НПУ), в ходе которого рассчитываются МР при удалении от пикселя в направлениях «вниз» и «вправо»;
- 2) в обратной последовательности – от НПУ к ЛВУ, в ходе которого рассчитываются МР при удалении от пикселя в направлениях «вверх» и «влево».

Псевдокод, реализующий оптимизированный алгоритм дилатации с апертурой структурирующего элемента $k \times k$ на основе карты МР, приведен на рис. 2.

Код программы на языке C++, реализующий псевдокод рис. 2, приводится в [36].

Следует отметить, что рассмотренные методы повышения быстродействия не применимы при реализации параллельных вычислений на графических ускорителях (например, поддерживающих технологию CUDA) или многоядерных процессорах. Это связано с тем, что обработка для каждого пикселя изображения согласно

(7) и процедуре вычисления дилатации через МР не является однородной [22].

Результаты полунатурного эксперимента. Исходные изображения для эксперимента получены с макета панорамной системы (рис. 3) [21, 39], содержащего управляемую пользователем персональную область интереса (ОИ).



Рис. 3. Макет мультиспектральной распределенной панорамной системы: сверху – пять телевизионных камер, снизу по центру – камера длинноволнового инфракрасного (ИК) диапазона 8-14 мкм, в левом нижнем углу – камера коротковолнового ИК диапазона 0,9-1,7 мкм

На рис. 4 приведена ОИ размера 1024×768 пикселей и шириной поля зрения $40^\circ \times 30^\circ$, содержащая сектора с изображениями от трех камер макета, а на рис. 5 и 6 – результаты промежуточных вычислений для реализации упрощенного блендинга: границы изображений камер в ОИ (рис. 5) и бинарная маска $M_{\text{блн}}$, по которой выполняется сглаживание яркости (рис. 6). Изображение рис. 6 получено в результате применения к рис. 5 морфологической дилатации с размером структурного элемента $D \times D = 127 \times 127$ пикселей согласно псевдокоду рис. 2, а размеры апертуры ВОХ-фильтра, принятые в работе для реализации многодиапазонного блендинга, составили соответственно $w_{\text{нч}} \times w_{\text{нч}} = 128 \times 128$, $w_{\text{сч}} \times w_{\text{сч}} = 16 \times 16$ и $w_{\text{вч}} \times w_{\text{вч}} = 4 \times 4$ пикселей.

Темп обновления информации при формировании ОИ по информации от пяти телевизионных камер и размерности ОИ 1024×768 на ПЭВМ с процессором Intel Core i5 без процедур оптимизации, рассмотренных в работе, и с ними приведен в табл. 2. Как было отмечено

выше, для данного типа вычислителя все стратегии выполнения билинейной интерполяции обеспечивают приблизительно одинаковое быстродействие.



Рис. 4. ОИ без блендинга

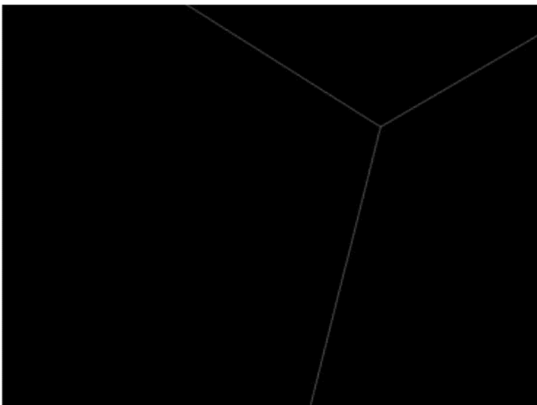


Рис. 5. Границы изображений камер в ОИ (БМ $m_{\text{бин}}$)



Рис. 6. БМ $M_{\text{бин}}$, полученная в результате дилатации



Рис. 7. ОИ после блендинга

Таблица 2

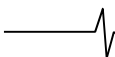
	Без оптимизации	С оптимизацией
Темп обновления информации в ОИ, Гц	1,24	6,7

Заключение

Таким образом, из полученных в ходе макетирования численных данных следует, что приведенные процедуры оптимизации и упрощения вычислений для реализации пространственной фильтрации, морфологической дилатации и блендинга позволяют повысить темп формирования ОИ более чем в 5 раз.

Литература

1. Лазаренко В.П., Джамийков Т.С., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Метод создания сферических панорам из изображений, полученных всенаправленными оптико-электронными системами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16, № 1. С. 46-53.
2. Прудников Н.В., Шлишевский В.Б. Панорамные оптико-электронные устройства кругового и секторного обзора // Вестник СГУГиТ. 2016. Т. 33, Вып. 1. С. 148-161.
3. Бельский А., Жосан Н., Брондз Д., Горбачев К., Гребенчиков В., Каргаев А. Круглосуточная панорамная система технического зрения для вертолетов // Фотоника. 2013. Т. 38, №2. С. 80-86.
4. Багдасарова О.В., Багдасаров А.А. Панорамные системы кругового обзора в устройствах отображения вторичной информации комплексов авионики и автобазирования // Фазотрон. 2012. № 3 (19). С. 28-33.
5. Аршакян А.А. Панорамное наблюдение сцены с борта летательного аппарата // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 4. С. 144-151.
6. Широков Р.И., Алехнович В.И. Увеличение углов поля зрения составной веб-камеры методом склеивания изображений // Контенант. 2014. № 4. С. 10-23.
7. Сильвестрова О.В. Оценка эффективности способов цветовой коррекции для панорамных изображений с малоразмерными объектами // Цифровая обработка сигналов. 2015. № 3. С. 25-28.
8. Brown M, Lowe D. Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features // International Journal of Computer Vision. 2007. Vol. 74(1). P. 59-73.
9. Szeliski R. Image alignment and stitching: a tutorial // Foundations and trends in computer graphics and vision. 2006. Vol. 2(1). P. 1-104.
10. Perazzi F., Sorkine-Hornung A., Zimmer H., Kaufmann P., Wang O., Watson S., Gross M. Panoramic video from unstructured camera arrays // Comput. Graph. Forum. 2015. Vol. 34(2). P. 57-68.
11. Agarwala A., Zheng K.C., Pal C., Agrawala M., Cohen M., Curless B., Salesin D., Szeliski R. Panoramic video textures // ACM Transactions on Graphics. Vol. 24(3). P. 821-827.
12. Shum H.-Y., Szeliski R. Construction of panoramic mosaics with global and local alignment // International J. of Computer Vision. 2000. Vol. 36(2). P. 101-130.



13. Hartley R., Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision: 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 656 p.
14. Faugeras O., Lustman F. Motion and structure from motion in a piecewise planar environment // International J. of Pattern Recognition and Artificial Intelligence. 1988. Vol. 2(3). P. 485-508.
15. Malis E., Vargas M., Deeper understanding of the homography decomposition for vision-based control, Technical report, INRIA, 2007.
16. Ефимов А.И., Новиков А.И. Алгоритм поэтапного уточнения проективного преобразования для совмещения изображений // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40, № 2. С. 258-265.
17. Стротов В.В. Сравнение двух структурных алгоритмов оценки параметров геометрических преобразований изображений // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 3. С. 21-25.
18. Lowe D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // International Journal of Computer Vision. 2004. Vol. 60(2). P. 91-110.
19. Fischler M., Bolles R. Random Sample Consensus: a Paradigm for Model Fitting with Application to Image Analysis and Automated Cartography // Communications of the ACM. 1981. Vol. 24(6). P. 381-395.
20. Novikov A.I., Sablina V.A., Nikiforov M.B., Loginov A.A. The contour analysis and image-superimposition problem in computer vision systems // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. Vol. 25(1). P. 73-80.
21. Kudinov I.A., Pavlov O.V., Kholopov I.S., Khramov M.Yu. The algorithm for a video panorama construction and its software implementation using CUDA technology // CEUR Workshop Proceedings. Vol. 1902. 2017. P. 37-42.
22. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.
23. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург. 2011. 608 с.
24. Parker J.A., Kenyon R.V., Troxel D.E. Comparison of interpolating methods for image resampling // IEEE Trans. on Medical Imaging. 1983. Vol. 2(1). P. 31-39.
25. Li J., Su J., Zeng X. A solution method for image distortion correction model based on bilinear interpolation // Computer Optics. 2019. Vol. 43(1). P. 99-104.
26. Тимофеева Н.Е., Гераськин А.С. Исследование возможности улучшения алгоритма билинейной интерполяции для корректировки цифровых изображений применением теории полей ориентации // Вестник ВГУ. Серия: системный анализ и информационные технологии. 2018. № 1. С. 119-125.
27. Zhu Z., Lu J., Wang M., Zhang S., Martin R.R., Liu H., Hu S.-M. A comparative study of algorithms for realtime panoramic video blending // IEEE Trans. on image processing. 2018. Vol. 27, No. 6. P. 2952-2965.
28. Канаева И.А., Болотова Ю.А. Методы коррекции цвета и яркости при создании панорамных изображений // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42, № 5. С. 885-897.
29. Jähne B. Digital image processing: 6th ed, revised and extended. New York: Springer, 2005. 585 p.
30. Муратов Е.Р., Устюков Д.И. Алгоритм выравнивания освещённости объектов на изображениях с поточным выполнением // Техническое зрение в системах управления - 2017: тезисы докладов. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 29-31.
31. Lukin A. Tips & Tricks: Fast Image Filtering Algorithms // GraphiCon: Proc. of GraphiCon'2007Russia conference, Moscow, June 23-27, 2007.
32. Jarosz W. Fast Image Convolutions [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://elynxsdk.free.fr/ext-docs/Blur/Fast_box_blur.pdf. Дата обращения: 17.05.2017.
33. Pratt W.K. Digital image processing: 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. 807 p.
34. Burt P., Adelson E. A multiresolution spline with application to image mosaics // ACM Transactions on Graphics. 1983. Vol. 2(4). P. 217-236.
35. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В., Ососков М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: курс лекций и практических занятий. М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
36. Efficiently implementing dilate and erode image functions [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://blog.ostermiller.org/dilate-and-erode> (дата обращения: 17.10.2017).
37. Minkowski H. Geometrie der zahlen. Leipzig und Berlin: Druck und Verlag von B.G. Teubner, 1910. 256 p.
38. Krause E.F. Taxicab geometry: an adventure in non-euclidean geometry. New York: Dover Publications, 2012. 96 p.
39. Кудинов И.А., Холопов И.С., Храмов М.Ю. Технология формирования панорамных разноспектральных видеоизображений для обзорных авиационных оптико-электронных систем // Труды МАИ. 2019. Вып. 104. С. 1-20.