

SECTION 4. Computer science, computer engineering and automation.

**Chekotilo Elena Yurievna**

candidate of Technical Sciences, scientific Secretary  
Samara State Technical University, Russia  
[e\\_chekotilo@mail.ru](mailto:e_chekotilo@mail.ru)

**Kuznesov Pavel Konstantinovich**

doctor of Technical Sciences, Professor, director of research Institute  
Samara State Technical University, Russia

**ALGORITHM OF HIGH-PRECISION SUPERPOSITION OF THE AFFINE-  
TRANSFORMED IMAGE**

***Abstract:** This article presents a self-adaptive algorithm of high-precision superposition of the affine-transformed images. Methodology is based on using method of functionalization of parameters of geometrical mismatch of the affine-transformed images of mobile objects.*

***Key words:** brightness object, optical-electron system, affine transformation, high-precision superposition of images, functionalization method.*

**АЛГОРИТМ ВЫСОКОТОЧНОГО СОВМЕЩЕНИЯ АФФИННО-  
ПРЕОБРАЗОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

***Аннотация:** В статье предложен самонастраивающийся алгоритм высокоточного совмещения изображений. Методика основана на использовании метода функционализации параметров геометрического рассогласования аффинно-преобразованных изображений подвижных объектов.*

***Ключевые слова:** яркостный объект, оптико-электронные системы, аффинное преобразование, высокоточное совмещение изображений, метод функционализации.*

Известные точные методы определения параметров движения изображений, основанные чаще всего на вычислении взаимно корреляционных функций анализируемых изображений, обладают большой вычислительной сложностью и, вследствие этого, мало приспособлены для реализации в реальном времени, особенно при идентификации параметров сложного, «аффинного», движения.

В данной работе для получения высокоточных оценок параметров геометрического рассогласования положения (взаимного смещения) аффинно-преобразованных изображений предложен компенсационный вариант метода функционализации, который позволяет без применения поисковых алгоритмов и вычисления сверток с высокой точностью определять параметры смещения как протяженных, так и малоразмерных объектов со случайным распределением яркостей.

Метод является обобщением известного градиентного метода вычисления «оптического потока» и основан на использовании соотношения (ФС-уравнения), функционально связывающего параметры движения наблюдаемого объекта с изменениями измеримых характеристик изображения [1, с. 28; 2, с. 96]. Метод может быть эффективно использован для определения параметров движения изображения, обладающего тремя степенями свободы (аффинно-преобразованного изображения без растяжения).

Рассмотрим изображение, заданное функцией распределения плотности (освещенности) изображения:

$$E(\vec{r}) \in R^1, \vec{r} = (x, y)^T, 0 < E(\vec{r}) \leq M, \quad (1)$$

где  $()^T$  - знак транспонирования,  $x, y \in R^1$  - координаты в декартовой системе координат  $XOY$ , лежащей в плоскости изображений. Условия непрерывности и дифференцируемости на функцию плотности изображения не накладываются.

На изображении расположим две идентичные по размерам области анализа прямоугольной формы  $\Psi^{\mathcal{D}}(\vec{r})$  (эталонная) и  $\Psi^K(\vec{r})$  (перемещаемая). На форму и ориентацию области анализа  $\Psi^{\mathcal{D}}(\vec{r})$  накладываются следующие ограничения:

$$\Psi^{\mathcal{D}}(\vec{r}) \cap \Psi^K(\vec{r}) \neq \emptyset, \Psi^K(\vec{r}) = T^K(\Psi^{\mathcal{D}}(\vec{r})), \quad (2)$$

где  $T^1$  - аффинное преобразование без растяжения:

$$T^1(\Psi(\vec{r})) = A^1 \cdot (\Psi(x + p_1(I), y + p_2(I))), \quad (3)$$

где  $A^1$  - матрица вращения [2, с. 97],  $p_3 \in R^1$  - угол поворота относительно начала координат системы  $XOY$ ,  $p_1(I), p_2(I) \in R^1$  - сдвиги изображения по осям  $OX$  и  $OY$ , соответственно.

Обозначим как  $\vec{p}(I) = (p_1(I), p_2(I), p_3(I))^T$  - вектор параметров  $I$ -ого аффинного преобразования (взаимного смещения изображений).

Задача состоит в том, чтобы на основе анализа изображений  $E^0(\vec{r})$  и  $E^K(\vec{r})$ , в областях анализа  $\Psi^{\mathcal{D}}(\vec{r})$  и  $\Psi^K(\vec{r})$ , где  $E^0(\vec{r}) = \Psi^{\mathcal{D}}(\vec{r}) \cap E(\vec{r})$  и  $E^K(\vec{r}) = \Psi^K(\vec{r}) \cap E(\vec{r})$ , определить параметры преобразования  $T^K$ .

Далее будем называть изображение  $E^1(\vec{r}) = \Psi^1(\vec{r}) \cap E(\vec{r})$  «кадром» с номером  $I$ .

Для решения задачи используем следующую итерационную процедуру:

$$\begin{cases} \vec{p}(I+1) = \vec{p}(I) + \Lambda \cdot \Delta \vec{p}(I), \\ \vec{p}(0) = \vec{p}_0, I = 1, 2, \dots, m; \end{cases} \quad (4)$$

где  $\Lambda$  - матрица коэффициентов обратной связи:

$$\Lambda = \text{diag} \{ \lambda_i \}, i = 1 \dots 3. \quad (5)$$

На каждом шаге процедуры (4) вычисляются поправки  $\Delta \vec{p}(I)$  к текущей оценке вектора смещения. Процедура останавливается, когда при некотором  $m$  выполняется условие малости приращения величины  $\Delta \vec{p}(I)$ :

$$\max \{ p_i(I) \} / i \leq \varepsilon_s, i = 1, 2, |p_3(I)| \leq \varepsilon_\alpha, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_s, \varepsilon_\alpha > 0$  - заранее заданные числа.

Поправки вычисляются на основе анализа изображений эталонного кадра  $E^{\mathcal{D}}(\vec{r})$  и кадра  $E^1(\vec{r})$ , смещаемого на каждой итерации [2, с. 106; 3, с. 81]. Трансформация смещаемого изображения ведется с использованием оператора, обратного оператору  $T^1$  который всегда существует, так как оператор  $T^1$  обладает групповым свойством:

$$E^{I+1}(\vec{r}) = (T^1)^{-1}(\Psi^K(\vec{r})) \cap E(\vec{r}), \quad (T^1)^{-1}(\Psi^K(\vec{r})) = (A^1)^{-1}(\Psi^K(x - p_1(I), y - p_2(I))). \quad (7)$$

Метод функционализации применяется следующим образом.

На первом шаге алгоритма, исходя из априорных оценок ожидаемого смещения, задают значение  $\vec{p}_0$ , а в качестве изображения, сравниваемого на первом шаге с эталонным, принимают изображение  $E^K(\vec{r})$ .

На каждой  $I$ -ой итерации кадры  $E^{\mathcal{D}}(\vec{r})$  и  $E^1(\vec{r})$  покрывают идентичной системой окон анализа  $\{D_i^\alpha\}$  ( $\alpha \in \{\mathcal{D}, I\}$ ,  $i = 1, \dots, N$ ,  $i$  - номер окна анализа) и для

каждой одноименной по  $i$  пары окон  $D_i^{\ominus}$ ,  $D_i^{\text{I}}$  формируют систему уравнений функциональной связи вида [2, с. 100]:

$$B^{\text{I}} \cdot \Delta \bar{p}(\text{I}) = \Delta \bar{\Phi}^{\text{I}}, \quad (8)$$

где  $B^{\text{I}} = [b_{ik}^{\text{I}}]$  – матрица коэффициентов,  $\Delta \bar{\Phi}^{\text{I}} = (\Phi_i^{\text{I}} - \Phi_i^{\ominus})$ ,  $\Phi_i^{\alpha}$  – функционал вида:

$$\Phi_i^{\alpha} = \iint_{D_i^{\alpha}} K_i^{\alpha}(\bar{r}) \cdot E^{\alpha}(\bar{r}) ds, \quad (9)$$

а  $K_i^{\alpha}(\bar{r})$  – непрерывная, дифференцируемая почти всюду по всем своим аргументам и равная нулю на границе окна анализа  $D_i^{\alpha}$  функция веса.

Система (8) в общем случае является переопределенной и может быть решена, например, методом квазиобращения.

Приведенный алгоритм требует настройки параметров  $\lambda_i$  и размеров окон анализа  $D_i^{\alpha}$  по условиям сходимости процедуры.

В [3, с. 82] представлена аналитическая оценка сходимости итерационного метода на примере тестового моночастотного изображения.

В результате исследований найдено достаточное условие сходимости итерационной процедуры: процесс сходится, если начальное рассогласование кадров  $E^{\ominus}$  и  $E^{\text{I}}$  по каждой из координат смещения не превышает трети периода  $T = 1/\omega$  тестового изображения:  $p_{10}, p_{20} < 1/3T$ .

В общем случае изображение по своей контрастно-частотной характеристике не является моночастотным. В приведенном алгоритме предлагается упрощенная, эвристическая, методика настройки параметров процесса совмещения изображений для случая, когда в Фурье-спектре исследуемого изображения существуют доминирующие частоты, т.е. частоты, на которых спектр имеет явно выраженные максимумы. Эти доминирующие частоты можно выделить с использованием полосовых фильтров и выбрать те из них, на которых условия сходимости процедуры совмещения изображений выполняются.

Заметим, что функционал (9), сам по себе, является фильтром с ядром  $K(\bar{r})$ . Поэтому, настраивая параметры ядра и окна анализа  $(l_x, l_y)$ , можно выделить частоту, для которой выполняются условия сходимости [3, с. 83].

В реальных наблюдениях функция распределения облученности изображения имеет случайный характер. Поэтому, несмотря на то, что измерения производятся на конкретных реализациях изображения, корректнее использовать не частотно-контрастный спектр изображения, а спектральную плотность мощности  $F_B(w_x, w_y)$  (энергетический спектр) видеосигнала [4, с. 96].

Эти выводы легли в основу самонастраивающегося алгоритма настройки параметров процесса измерения, входящего в состав итерационной процедуры совмещения изображений.

#### **Алгоритм настройки параметров процесса совмещения изображений**

Исходными данными являются:

- функция спектральной плотности изображения  $F_B(w_x, w_y)$ ;
- априорная оценка начального смещения  $\bar{p}_0$  кадра  $E^{\text{K}}$  относительно кадра  $E^{\ominus}$ ;
- предельно допустимое значение соотношения сигнал/шум -  $\gamma > 0$ .

1. Определение допустимых доминирующих частот

1.1. Определяют доминирующие частоты  $(\Xi = \{w_x^v, w_y^v\})$ ,  $(v=1..n_v)$  – частоты, являющиеся экстремумами функции спектральной плотности  $F_B(w_x, w_y)$ , для которых соотношение сигнал/шум превышает допустимое значение  $\gamma$ .

1.2. В соответствии с достаточным признаком сходимости итерационной процедуры по текущей оценке смещения изображения  $\bar{p}(I)$  вычисляют предельно допустимую по условиям сходимости частоту спектральной плотности сигнала:

$$w_{np}(I) = \left\{ (w_{xnp}(I), w_{ynp}(I)) : w_{xnp}(I) = 2\pi/3 \cdot T_x(I) \vee w_{ynp}(I) = 2\pi/3 \cdot T_y(I) \right\}.$$

1.3. Формируют множество пар допустимых доминирующих частот:

$$\Xi^* \subset \Xi, \Xi^* : \{w_x^{*v}, w_y^{*v}\} : w_x^{*v} < w_{xnp}(I) \vee w_y^{*v} < w_{ynp}(I).$$

## 2. Настройка параметров процесса совмещения

2.1. Для каждой пары допустимых доминирующих частот  $\Xi^*$  выбирают типоразмер  $(l_x^v \times l_y^v)$  окна анализа, максимизирующий амплитудно-частотную характеристику  $W(w_x, w_y, l_x, l_y)$  фильтра с функцией веса  $[K(\vec{r})]_{\vec{r}}$  на этих частотах:

$$\max_{l_x, l_y} W(w_x^{*v}, w_y^{*v}, l_x, l_y) = W^*(w_x^{*v}, w_y^{*v}, l_x^v, l_y^v).$$

Каждый типоразмер окна анализа используют далее для образования покрытия изображения. В результате получают несколько покрытий (система слоев покрытия) одних и тех же участков изображения окнами разного типоразмера. Для текущей системы покрытий определяют вектор – столбец  $B^1$  коэффициентов системы уравнений функциональной связи (8). Для каждого типоразмера окна анализа  $(l_x^v \times l_y^v)$  выбирается критическое (максимальное) значение коэффициента обратной связи  $\lambda_i^{kp}$ , отвечающее достаточному признаку сходимости.

Слои покрытия и условия останова итерационного процесса (6) ранжируются. Для каждого слоя вычисляют новое значение оценки смещения  $\bar{p}(I+1)$ , начиная с типоразмера наивысшего ранга, соответствующего самым низким доминирующим частотам. Полученные оценки параметров обратного оператора используют в качестве начальных данных для уточнения смещений по слою следующего ранга и так до исчерпания всех слоев покрытия на  $i$ -ой итерации. Повторяют пункты 1 – 2. Процесс останавливается при выполнении условия (6) для покрытия самого высокого ранга. В результате получается двойной итерационный процесс вычисления параметров аффинного преобразования. Внутренние итерации последовательно смещают изображение  $E^1(\vec{r})$ , приближая его к эталонному, а внешние – по слоям покрытия  $\{D_i^1\}$  «от грубого к точному».

Для апробации предложенной итерационной процедуры и определения погрешности получаемых оценок было применено компьютерное моделирование.

Проведенные численные эксперименты показали работоспособность метода и его существенное преимущество по быстрдействию в сравнении с другими известными методами.

## Литература

1. Кузнецов П.К., Семавин В.И. Метод определения параметров движения яркостного поля // Известия ВУЗов. Приборостроение. 1990. №6. С. 26 – 30.
2. Кузнецов П.К., Мартельянов Б.В., Семавин В.И., Чекотило Е.Ю. Метод определения вектора скорости движения подстилающей поверхности // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки. 2008. № 2(22). С. 96 - 110.

3. *Кузнецов П.К., Чекотило Е.Ю., Мартемьянов Б.В.* Исследование сходимости итерационной процедуры определения параметров движения изображений методом функционализации// Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки. 2010. №2(26). С. 80 - 85.

4. *Кузнецов П.К., Чекотило Е.Ю., Мартемьянов Б.В.* Самонастраиваемый алгоритм высокоточного совмещения аффинно-преобразованных изображений// Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки. 2011. №1(29). С. 92 - 100.