

Метод функционализации в задаче согласованного оценивания оптического потока

П.К. Кузнецов¹, Б.В. Мартемьянов¹, В.А. Фурсов², А.П. Котов²

¹Самарский государственный технический университет, Галактионовская 141, Самара, Россия, 443010

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. Проблема анализа движения изображений активно решается уже более сорока лет, но ее полного решения, удовлетворяющего основным запросам практики до сих пор не получено. Связано это не только с тем, что кадры анализируемых последовательностей изображений зашумлены. Они могут отличаться по яркости, спектральному диапазону, масштабу, ориентации. Все это существенно затрудняет совмещение изображений. В современных терминах анализ движения изображения сцены формулируется как задача построения оптического потока, создаваемого последовательностью изображений динамически меняющейся сцены (динамическим изображением). Оптический поток – это векторное поле скоростей движения точек или фрагментов изображения. Оптический поток восстанавливается путем анализа и сравнения, чаще всего путем совмещения, последовательности кадров динамического изображения. В настоящей работе рассматривается подход к решению задачи определения динамических характеристик изображений, основанный на идеях функционализации критерия качества и построения согласованных оценок вектора скоростей оптического потока.

1. Введение

Первыми работами, в которых получены конструктивные методы восстановления оптического потока, относятся к концу 70-х [1, 2] и началу 80-х годов [3] прошлого века. До этих работ для совмещения изображений применялся вычислительно затратный взаимно корреляционный метод [4], что затрудняло построение систем, работающих в реальном времени. В [3] предложен вариационный подход к совмещению изображений, использующий пространственные и временные производные изображений. Метод позволяет строить плотный, то есть почти для всех точек изображения, оптический поток, но при этом остается существенно вычислительно затратным. В [1, 2] предложен метод, названный методом функционализации параметров изображения, в соответствии с которым осуществляется совмещение фрагментов, при этом совмещаются не сами изображения, а поля значений функционалов специального вида, определяемых на изображениях. Такой подход позволяет избежать операции дифференцирования изображений по пространственным координатам и тем самым уменьшить погрешность совмещения [5, 6].

В настоящей работе метод функционализации реализуется в комбинации с методом согласованного оценивания, который в течение ряда последних лет развивается в работах [7, 8].

2. Метод функционализации

Мы предлагаем технологию совмещения изображений, основанную на комбинировании методов функционализации и согласованного оценивания.

Основной функционал метода формируется комбинацией «примитивов»: регулярных функционалов вида

$$F_k(x, y, t) = \iint_D K(x, y) E(x, y, t) dx dy, \quad (1)$$

где $E(x, y, t)$ – функция распределения отсчетов изображения, $K(x, y) \subset R^1$ – функция веса, D – окно анализа. Наряду с функционалом вида (1) при совмещении разно-яркостных и разно-спектральных изображений могут использоваться также функционалы типа «первой» F' и «второй» F'' производной:

$$F'(x, y, t) = \iint_D K'(x, y) E(x, y, t) dx dy \quad (2)$$

$$F''(x, y, t) = \iint_D K''(x, y) E(x, y, t) dx dy \quad (3)$$

С целью построения системы, связывающей параметры изображения с параметрами его движения, основной функционал дифференцируется по времени в силу уравнения движения изображения, имеющего вид

$$\frac{ds(x, y, t)}{dt} = \mathbf{v}(x, y, t); \quad \mathbf{s}(t_0) = 0,$$

где $\mathbf{v}(x, y, t) = [v_x(x, y, t), v_y(x, y, t)]$; $\mathbf{s}(x, y, t)$ – вектор смещения, компонентами которого являются смещения по осям Ox и Oy . С использованием введенных соотношений задача определения вектора скорости $\mathbf{v} = [v_x, v_y]^T$ движения изображения в малой окрестности точки \mathbf{x} кадра формулируется следующим образом.

На изображении выделим фрагмент, размеры которого таковы, что скорость движения всех точек внутри фрагмента можно считать одинаковой ($\mathbf{v} = const$), и покроем его системой окон $\{D_i, i = 1, 2, \dots, N\}$. Для каждого положения окна D_i применим обычную схему построения уравнений оптического потока с той лишь разницей, что вместо яркости отсчета в каждой точке изображения строится функционал (1). Тогда можно записать уравнение

$$F_x^i v_x + F_y^i v_y = F_t^i,$$

где

$$F_x^i = \iint_D \frac{\partial K^i(x, y)}{\partial x} E^i(x, y, t) dx dy, \quad (5)$$

$$F_y^i = \iint_D \frac{\partial K^i(x, y)}{\partial y} E^i(x, y, t) dx dy, \quad (6)$$

$$F_t^i = \iint_D \frac{\partial K^i(x, y)}{\partial t} E^i(x, y, t) dx dy.$$

(при записи соотношений (5) – (7) мы использовали известное свойство обобщенных функций:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f'(x) \varphi(x) dx = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \varphi'(x) dx).$$

Для N положений окна D_i с использованием приведенных соотношений (4) – (7) можно записать переопределенную систему N уравнений.

$$\mathbf{F}_{x,y} \mathbf{v} = \mathbf{F}_t, \quad (8)$$

где каждая строка составляется в соответствии с соотношениями, приведенными выше в формулах (4), (5), (6), (7). Здесь \mathbf{F}_t – матрица-столбец, размерности $N \times 1$, $\mathbf{F}_{x,y} = [\mathbf{F}_x, \mathbf{F}_y]$ – $N \times 2$ -матрица, а $\mathbf{F}_x, \mathbf{F}_y$ – $N \times 1$ -матрицы, составленные из F_x^i, F_y^i , вычисленных по соотношениям (5), (6).

3. Согласованное оценивание

Алгоритм решения переопределенной системы уравнений (8), основанный на принципе согласованности строится следующим образом. Из исходной системы (8) формируется L подсистем *верхнего уровня* размерности P :

$$\mathbf{F}_{x,y}(l)\mathbf{v}(l) = \mathbf{F}_t(l) + \xi_l, \quad l = \overline{1, L}, \quad M < P < N. \quad (9)$$

На каждой (l -й) подсистеме верхнего уровня формируется заданное число, например K , подсистем *нижнего уровня* размерности M :

$$\mathbf{F}_{x,y}(l,k)\mathbf{v}(l,k) = \mathbf{F}_t(l,k) + \xi_{l,k}, \quad k = \overline{1, K}. \quad (10)$$

Далее анализируется обусловленность квадратных $M \times M$ - матриц $\mathbf{F}_{x,y}(l,k)$. Подсистемы, у которых эти матрицы оказываются «почти» вырожденными, исключаются из дальнейшего рассмотрения. Далее на подсистемах, оставшихся после отсеивания плохо обусловленных, вычисляются оценки

$$\hat{\mathbf{v}}(l,k) = [\mathbf{F}_{x,y}^T(l,k)\mathbf{F}_{x,y}(l,k)]^{-1}\mathbf{F}_{x,y}^T(l,k)\mathbf{F}_t(l,k), \quad k = \overline{1, K}, \quad K = C_p^S. \quad (11)$$

Таким образом, для каждой (l -й) подсистемы верхнего уровня получаем множество оценок

$$\Theta_l = \{\hat{\mathbf{v}}(l,k) : k = \overline{1, K}, \quad l = \overline{1, L}\}. \quad (12)$$

Для характеристики множеств Θ_l вводится так называемая функция взаимной близости оценок (функция согласованности):

$$W(l) = \frac{2}{K(K-1)} \sum_{\substack{k,j=1 \\ j>k}}^K \|\hat{\mathbf{v}}(l,k) - \hat{\mathbf{v}}(l,j)\|, \quad (13)$$

где $\|\hat{\mathbf{v}}(l,k) - \hat{\mathbf{v}}(l,j)\|$ – заданная норма разности K оценок на подсистемах нижнего уровня, принадлежащих l -й подсистеме верхнего уровня. Далее ищется \hat{l} -я подсистема верхнего уровня, для которой

$$W(\hat{l}) : W(\hat{l}) = \min_{l=1,L} W(l). \quad (14)$$

Наилучшим считается решение, полученное на этой (\hat{l} -й) подсистеме верхнего уровня. Это решение может быть найдено любым из известных способов. Простейшей является МНК-оценка:

$$\hat{\mathbf{v}}(\hat{l}) = [\mathbf{F}_{x,y}^T(\hat{l})\mathbf{F}_{x,y}(\hat{l})]^{-1}\mathbf{F}_{x,y}^T(\hat{l})\mathbf{F}_t(\hat{l}). \quad (15)$$

Следует заметить, что (\hat{l} -я) подсистема верхнего уровня, на которой вычислена оценка (15), вообще говоря, включает уравнения переопределенной системы, которые соответствуют точкам изображения, имеющим близкие (согласованные) скорости оптического потока. Поэтому метод согласованного оценивания может рассматриваться как метод сегментации поля скоростей оптического потока.

4. Реализация метода

Эффективность описанного метода проверялась на тестовых изображениях со специально заданными известными сдвигами ($V_x=1, V_y=1$). В таблице 1 приведены сравнительные результаты исследований. Из таблицы видно, что формирование уравнений оптического потока по методу функционализации обеспечивает повышение точности определения сдвигов более чем на 7 % (с 10.26% до 2.75%). Подключение процедуры отбора согласованных оценок обеспечивает дополнительно увеличение точности более чем на 0.5% (до 2.23%).

На рисунке 1 приведены пример решения реальной задачи совмещения разномасштабных изображений, полученных космическим аппаратом «Аист-2Д», с использованием метода функционализации.

Таблица 1. Точность определения сдвига.

№ п/п	Тип уравнения оптического потока	Точность		
		$V_x\%$	V_y	СКО %
1	Классическое	0.9504	1.0529	10.26
2	Классическое с отбором согласованных оценок	0.9681	1.0209	3.82
3	Метод функционализации	1.0146	1.0128	2.75
4	Функционализация с отбором согласованных оценок	1.0177	1.0136	2.23

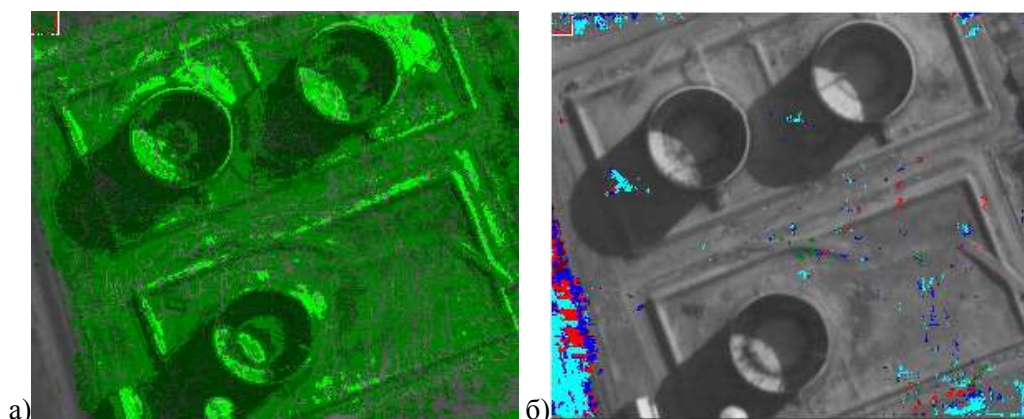


Рисунок 1. Результат совмещения изображений. а) – совмещенное (цветное) изображение, полученное в *GB* палитре; б) – изображение с выделенными фрагментами (цветами), для которых не найдены сопряженные точки.

5. Заключение

Предложенная технология определения параметров оптического потока, основанная на интеграции идей функционализации и согласованного оценивания, является перспективной. Метод функционализации, реализованный с помощью МНК обеспечивает повышение точности определения сдвига на тестовых изображениях по сравнению с использованием классических уравнений оптического потока более чем на 7%. Включение в технологию процедуры согласованного оценивания, которая осуществляет отбор наиболее согласованных (в смысле взаимной близости) оценок дает дополнительную прибавку в точности на 0.5%. Таким образом совместная реализация метода функционализации метода согласованного оценивания обеспечивает повышение точности на 8% (с 10.26% до 2.23%).

Указанные выше результаты получены на одном тестовом изображении. Для всесторонней оценки эффективности планируется проведение масштабных сравнительных исследований на тестовых и реальных видеопотоках. Приведенный пример применения метода функционализации к решению реальной задачи совмещения разномасштабных изображений, полученных космическим аппаратом «Аист-2Д», иллюстрирует визуально наблюдаемое высокое качество совмещения изображений, что вселяет определенный оптимизм.

6. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме FSSS-2020-0017 при частичной поддержке РФФИ (проект № 17-29-03112).

7. Литература

- [1] Абакумов, А.М. Способ измерения параметров движения протяженного объекта со случайным распределением яркости / А.М. Абакумов, И.А. Бережной, В.А. Денкевиц, В.С. Ляпидов, П.К. Кузнецов, В.Ю. Мишин, В.И. Семавин // А.с. № 753244 G 01 021/00. приоритет 14.02.1979 г. опубл. 29.09.2004 г.
- [2] Абакумов, А.М. Метод измерения параметров движения объекта / А.М. Абакумов, П.К. Кузнецов, В.Ю. Мишин, В.И. Семавин // Всесоюз. совещ. "Оптические сканирующие

- устройства и измерительные приборы на их основе" 4-5 июня: 1980: Тез. докл. А.с. № 753244 G 01 021/00. – Барнаул, 1980. Т. 1. – С. 50-51.
- [3] Horn, K.P. Determining Optical Flow / K.P. Horn, B.G. Schunck // Massachusetts Institute of Technology: Artificial Intelligence Laboratory – A.I. Memo, 1980. – № 572.
- [4] Еремеев, В.В. Современные системы обработки данных дистанционного зондирования Земли – М.: Физматлит, 2015. – 406 с.
- [5] Кузнецов, П.К. Техническое зрение подвижных объектов. Совмещение изображений как динамический процесс / П.К. Кузнецов, Б.В. Мартемьянов, В.И. Семавин // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2014. – Т. 2. – С. 3-10.
- [6] Кузнецов, П.К. Техническое зрение подвижных объектов. Методика совмещения изображений, полученных при наблюдении с подвижного основания / П.К. Кузнецов, Б.В. Мартемьянов, А.В. Ращупкин // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2014. – Т. 3. – С. 3-10.
- [7] Фурсов, В.А. Решение переопределенных систем уравнений с отбором согласованной подсистемы / В.А. Фурсов, Е.В. Гошин, А.П. Котов // Материалы конференции «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ), 2019. – С. 821-828.
- [8] Fursov, V.A. The technology of image matching by the criterion of conformity of image fragments samples / V.A. Fursov, A.V. Gavrillov, Ye.V. Goshin, K.G. Pugachev // Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – Vol. 1096. – P. 012084. DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012084.

Constructed matched parameter estimates of optical flow using of the functionalization method

P.K. Kuznetsov¹, B.V. Martemianov¹, V.A. Fursov² A.P. Kotov²

¹Samara State Technical University, Galaktionskaya Str. 141, Samara, Russia, 443010

²Image Processing Systems Institute of the RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

Abstract. The task of the image motion analysis has been over forty years old, but its full solution, has not yet been received. This is because images usually contain noise, differ in brightness, spectral range and orientation scale, etc. A scene image motion analysis task is formulated as a task of constructing an optical flow created by a sequence of images. Optical flow is a vector field of image point speeds. Optical flow can be restored by matching, a sequence of image frames. This paper considers the approach to solving the problem of determining parameters of optical flow, based on the ideas of the quality criterion functionalization and construction of matched parameters estimates.