

УДК 621.397

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МИНИМУМОВ КРИТЕРИАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ

*Трофимов Д.В., начальник лаборатории АО «РИФ», e-mail: samael1978@rambler.ru.*

### IMPROVING THE QUALITY OF OBJECT TRACKING BASED ON THE ANALYSIS OF MINIMA OF THE CRITERION FUNCTION

*Trofimov D.V.*

*The problem of tracking failure for correlation automatic video tracking algorithms is actual. The conditions under which such failures occur are considered. To reduce the number of tracking failures under the considered conditions, a procedure for analyzing local minima of the criterion function has been developed, based on three features: the value of the minimum, the minimum sharpness and the distance from minimum to the center of the definition area. An example is shown that confirms the effectiveness of the proposed criteria.*

**Key words:** computer vision, object tracking, correlation algorithms, features, analysis of minima.

**Ключевые слова:** техническое зрение, сопровождение объектов, корреляционные алгоритмы, признаки, анализ минимумов.

#### Введение

Современные системы технического зрения, используемые в различных областях техники, решают множество задач. Одной из таких задач является сопровождение объектов на видеопоследовательностях [1-4].

Для решения данной задачи известны различные подходы, каждый из которых представлен широким набором алгоритмов [5-7]. При этом для сопровождения применяются также методы обнаружения объектов с последующим измерением их координат. В работе [5] выделены следующие классы методов сопровождения объектов на видеопоследовательностях:

- корреляционные методы;
- методы статистической сегментации;
- методы пространственной фильтрации;
- методы пространственно-временной фильтрации.

Несмотря на появление большого количества новых работ по данной тематике, широко распространены методы, основанные на корреляционном сопоставлении текущего кадра с заранее захваченным эталоном (шаблоном), обновляемым в ходе сопровождения. Такие методы представлены широким набором алгоритмов, общий принцип данных алгоритмов можно описать следующим образом.

По стробу изображения  $\mathbf{I}$  размером  $S_{IX} \times S_{IY}$  элементов перемещается эталон объекта  $\mathbf{R}$  размером  $S_{RX} \times S_{RY}$  элементов. Сдвиги эталона по двум координатам составляют  $x = \overline{1, S_X}$  и  $y = \overline{1, S_Y}$ , причём максимальные значения сдвига равны  $S_X = S_{RX} - S_{IX} + 1$  и  $S_Y = S_{RY} - S_{IY} + 1$  соответственно. Каждому значению сдвига  $(x, y)$  ставится в соответствие мера отличия эталона от соответствующего участка изображения  $F(x, y)$ , называемая в дальнейшем критериальной

*Для корреляционных алгоритмов автоматического сопровождения объектов на видеопоследовательностях актуальна проблема срыва сопровождения. Рассмотрены условия, при которых происходят такие срывы. Для уменьшения количества срывов сопровождения в указанных условиях разработана процедура анализа локальных минимумов критериальной функции, основанная на трех признаках: значение минимума, острота вершины и расстояние от центра области определения. Показан пример, подтверждающий эффективность предложенных критериев.*

функцией. По координатам минимума критериальной функции определяется положение сопровождаемого объекта относительно строба  $\mathbf{I}$ .

В данной работе рассмотрен наиболее простой с точки зрения вычислительных затрат способ определения значений критериальной функции, основанный на разностной корреляции [8]:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^{S_{RX}} \sum_{j=1}^{S_{RY}} |I_{i+x-1, j+y-1} - R_{i, j}|, \quad (1)$$

где  $R$  и  $I$  – соответственно элементы эталона  $\mathbf{R}$  и строба  $\mathbf{I}$ .

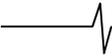
Для улучшения качества сопровождения при помощи корреляционных алгоритмов используются специальные модификации, описанные, например, в работе [9].

Как правило, в корреляционных алгоритмах для определения положения сопровождаемого объекта используется глобальный минимум критериальной функции. Однако, как показано далее, в некоторых ситуациях истинному положению сопровождаемого объекта соответствует не глобальный, а один из локальных минимумов функции  $F(x, y)$ .

При сопровождении подвижного объекта на видеопоследовательности возможны ситуации, когда значение средней яркости фона приближается к средней яркости эталона  $\mathbf{R}$ :

$$\sum_{i=1}^{S_{RX}} \sum_{j=1}^{S_{RY}} I_{i+x_n-1, j+y_n-1} \approx \sum_{i=1}^{S_{RX}} \sum_{j=1}^{S_{RY}} R_{i, j}, \quad (2)$$

где  $x_n, y_n$  – координаты локального минимума с поряд-



ковым номером  $n$ , не соответствующего истинному положению объекта.

В свою очередь, изменение условий освещения объекта может привести к значительному отличию средней яркости эталона  $\mathbf{R}$  от средней яркости сопровождаемого объекта, присутствующего в строке  $\mathbf{I}$ :

$$\left| \sum_{i=1}^{S_{RX}} \sum_{j=1}^{S_{RY}} I_{i+x_{gt}-1, j+y_{gt}-1} - \sum_{i=1}^{S_{RX}} \sum_{j=1}^{S_{RY}} R_{i,j} \right| \gg 0, \quad (3)$$

где  $x_{gt}$ ,  $y_{gt}$  – координаты «истинного» минимума, то есть минимума, соответствующего истинному расположению сопровождаемого объекта.

Если эталон и фон не имеют явно выраженной контрастной текстуры, то в описанных ситуациях один или несколько минимумов критериальной функции с координатами  $(x_n, y_n)$  имеют меньшее значение, чем «истинный» минимум с координатами  $(x_{gt}, y_{gt})$ :

$$F(x_n, y_n) < F(x_{gt}, y_{gt}), \quad (4)$$

Очевидно, что использование глобального минимума для определения координат сопровождаемого объекта в данном случае приведёт к срыву сопровождения. Тем не менее, в точке  $(x_{gt}, y_{gt})$ , как правило, имеется локальный минимум критериальной функции, обусловленный подобием текстур эталона и объекта.

Для того, чтобы такой «истинный» минимум имел меньшее значение, чем иные минимумы, в работе [0] используется штрафная функция, которая учитывает отличие измеренных координат сопровождаемого объекта от прогнозируемых.

В настоящей работе предложена процедура анализа минимумов критериальной функции, основанная на расчёте значений трёх признаков. Показано, что определение «истинного» минимума по данным признакам увеличивает длительность сопровождения по сравнению с аналогичным корреляционным алгоритмом, основанном на выборе глобального минимума.

#### Процедура анализа локальных минимумов критериальной функции

Для выбора локального минимума предлагается использовать три признака: значение минимума, острота вершины и расстояние от центра области определения критериальной функции. Полная процедура анализа локальных минимумов критериальной функции включает выделение локальных минимумов, расчёт значений признаков и совместное использование рассчитанных признаков для выбора «истинного» минимума. Данная процедура состоит из шести этапов.

1. Выделяются локальные минимумы критериальной функции в восьмисвязной области. При этом точка с координатами  $(x, y)$  считается локальным минимумом, если она является минимальной в окружающей её зоне  $\mathbf{O}$  размером  $3 \times 3$  элемента:

$$F(x, y) = \min(\mathbf{O}). \quad (5)$$

Смещения  $(x, y)$  области  $\mathbf{O}$  изменяются в пределах  $x = \overline{2, S_x - 1}$  и  $y = \overline{2, S_y - 1}$ . Такое исключение краевых пикселей строка  $\mathbf{I}$  из анализа необходимо не только

для упрощения реализации предлагаемой процедуры, но и для обеспечения устойчивости к минимумам, не являющихся минимальными значениями в восьмисвязной области.

2. Для приведения области значений критериальной функции к интервалу  $[0; 1]$  Производится нормировка и смещение значений  $F(x, y)$ :

$$\dot{F} = \frac{F - \min(F)}{\max(F) - \min(F)}, \quad (6)$$

где  $F$  – смещённая и нормированная критериальная функция.

3. Для каждого определённого ранее минимума с порядковым номером  $n = \overline{1, N}$  рассчитывается признак  $A_n$ , основанный на значении критериальной функции в точке  $(x_n, y_n)$ :

$$A_n = 1 - w_A \dot{F}(x_n, y_n), \quad (7)$$

где  $w_A$  – вес признака  $A$ , используемый при мультипликативном объединении трёх признаков.

4. Для каждого минимума рассчитывается расстояние  $d_n$  от точки  $(x_n, y_n)$  до центра области определения  $F$ , нормированное к половине диагонали этой области (то есть максимально возможному расстоянию):

$$d_n = \frac{\sqrt{\left(x_n - \frac{S_x + 1}{2}\right)^2 - \left(y_n - \frac{S_y + 1}{2}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{S_x + 1}{2}\right)^2 - \left(1 - \frac{S_y + 1}{2}\right)^2}}. \quad (8)$$

Значение второго признака рассчитывается на основе расстояния  $d_n$ :

$$B_n = 1 - w_B d_n, \quad (9)$$

где  $w_B$  – вес признака  $B$ .

5. Для каждого минимума  $(x_n, y_n)$  рассчитывается коэффициент остроты вершины  $v_n$ :

$$v_n = \left( \frac{1}{(2S_v + 1)^2} \sum_{i=-S_v}^{S_v} \sum_{j=-S_v}^{S_v} \dot{F}(x_n + i, y_n + j) \right) - \dot{F}(x_n, y_n), \quad (10)$$

где  $S_v$  – половина размера окрестности минимума. В данной работе использовалось значение  $S_v = 5$ .

Для тех минимумов  $(x_n, y_n)$ , для которых значения  $x_n + i$  или  $y_n + j$  при  $i, j = \overline{-S_v, S_v}$  выходят за границы области определения критериальной функции  $F(x, y)$ , пределы изменения переменных  $i$  и  $j$  уменьшаются таким образом, чтобы описанного выхода за границы не происходило.

После того как для каждого локального минимума получены значения  $v_n$ , данные значения смещаются и нормируются в ходе преобразования, аналогичному преобразованию (6). Нормированные и смещённые коэффициенты  $\dot{v}_n$  используются для расчёта значений третьего признака:

$$C_n = w_C \dot{v}_n + (1 - w_C), \quad (11)$$

где  $w_C$  – вес признака  $C$ .

6. Рассчитанные признаки объединяются для принятия решения о выборе минимума:

$$T_n = A_n B_n C_n. \quad (12)$$

Минимум с наибольшим значением  $T_n$  принимается за «истинный» минимум.

### Анализ результатов работы предложенной процедуры

Типовой пример критериальной функции, при которой происходит срыв сопровождения по описанным выше причинам, показан на рисунке.

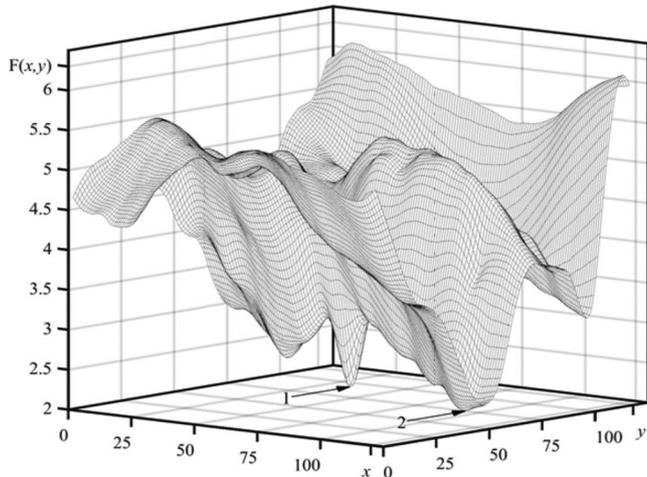


Рис. 1. Пример формы критериальной функции, при которой происходит срыв сопровождения при использовании только глобального минимума

Цифрой 1 на данном рисунке отмечен «истинный» минимум, а цифрой 2 – глобальный минимум.

Из анализа рисунка следуют выводы:

Минимум 1 не является глобальным, то есть выбор глобального минимума приведёт к срыву сопровождения.

Данный минимум расположен ближе остальных минимумов к центру области определения критериальной функции, то есть данному минимуму должно соответствовать наибольшее значение признака  $B$ .

«Истинный» минимум имеет более острую вершину

по сравнению с другими минимумами, то есть данному минимуму должно соответствовать наибольшее значение признака  $B$ .

Значения критериев  $A$ ,  $B$  и  $C$  для различных минимумов, а также их произведение  $T$  при равных весах  $w_A = w_B = w_C = 1$ , представлены в табл. 1.

В первой строке данной таблицы представлены значения для «истинного» минимума, во второй – для глобального, а далее – для остальных минимумов показанной на рисунке критериальной функции.

Из анализа табл. 1 следует, что «истинный» минимум проигрывает другим минимумам, только по признаку  $A$ . При этом помимо глобального минимума ( $n = 2$ ) ещё два минимума (порядковые номера 6 и 7) имеют близкие значения критериальной функции. По двум предложенным признакам  $B$  и  $C$  «истинный» минимум существенно превосходит остальные минимумы. В результате объединения трёх признаков данное превосходство увеличивается: по значениям произведения  $T$  превосходство «истинного» минимума по сравнению с ближайшим по  $T$  составляет 0,952 против 0,162, при этом глобальному минимуму соответствует значение  $T_2 = 0,071$ .

Для оценки качества сопровождения объектов создана программа, позволяющая в полуавтоматическом режиме размечать треки объектов на видеопоследовательности. При помощи данной программы размечены треки семи объектов на семи различных видеопоследовательностях.

Сопровождение данных объектов производилось двумя способами: при помощи предложенной процедуры и при помощи выбора глобального минимума. В каждом кадре рассчитывалась ошибка определения координат объекта, нормированная к половине его диагонали. За срыв сопровождения принималась ситуация, при которой данная ошибка превышала пороговое значение  $\lambda$ . При этом в экспериментальных исследованиях использовались два порога:  $\lambda = 0,25$  и  $\lambda = 0,5$ . Метрой качества сопровождения в данном эксперименте являлась длительность сопровождения до первого превышения ошибкой порога  $\lambda$ .

Длительности сопровождения различных объектов двумя рассмотренными способами при двух различных порогах  $\lambda$  приведены в табл. 2. (в кадрах).

Таблица 1. Значения описанных признаков для различных минимумов

Порядковый номер минимума $n$	Признак $A_n$	Признак $B_n$	Признак $C_n$	Произведение $T_n$
1 (истинный)	0,985	0,967	1	0,952
2 (глобальный)	1	0,380	0,187	0,071
3	0,207	0,348	0	0
4	0,277	0,474	0,063	0,008
5	0,300	0,557	0,066	0,011
6	0,931	0,533	0,302	0,150
7	0,926	0,625	0,279	0,162
8	0,800	0,337	0,203	0,055
9	0,530	0,503	0,132	0,035
10	0,544	0,516	0,051	0,014
11	0,650	0,365	0,197	0,047
12	0,651	0,378	0,247	0,061

Таблица 2. Длительности сопровождения различных объектов

Порядковый номер трека	Длительность сопровождения, кадр.			
	Глобальный минимум		Предложенная процедура	
	$\lambda = 0,25$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 0,25$	$\lambda = 0,5$
1	48	48	225	225
2	9	9	63	63
3	25	25	99	100
4	39	39	40	44
5	32	32	100	100
6	87	136	85	139
7	23	23	45	46

Из анализа данной таблицы следует, что применение предлагаемой процедуры анализа минимумов критериальной функции приводит к увеличению длительности сопровождения до срыва в среднем в 2,3 раза.

### Заключение

В ходе данной работы показано, что при сопровождении объектов на видеопоследовательностях имеют место ситуации, при которых глобальный минимум критериальной функции не соответствует истинному положению объекта. Предложена процедура анализа локальных минимумов, основанная на трёх критериях: значение критериальной функции в точке минимума, расстояние до её центра и острота вершины. На примере типовой критериальной функции, для которой происходит срыв сопровождения при использовании глобального минимума, показана эффективность предложенной процедуры. Составлена база видеопоследовательностей с размеченными треками объектов. Экспериментальные исследования показали, что применение предложенной процедуры увеличивает качество сопровождения.

### Литература

1. Dutta A. et al. Vision Tracking: A Survey of the State-of-the-Art // SN Computer Science. 2020. No. 1 Art. 57. 19 p.
2. Yao R. et al. Video object segmentation and tracking: A survey // arXiv. 2019. Vol. 1. No 1. Art. 1. 36 p.

3. Walia G. S., Kapoor R. Recent advances on multicue object tracking: a survey // Artificial Intelligence Review. 2016. Vol. 46. No. 1. pp. 1-39.

4. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.

5. Алпатов Б.А., Бабаян П.В. Методы обработки и анализа изображений в бортовых системах обнаружения и сопровождения объектов // Цифровая обработка сигналов. 2006. № 2. С. 45-51.

6. Yao R. et al. Video object segmentation and tracking: A survey // arXiv. 2019. Vol. 1. No. 1. pp. 1-36.

7. Yilmaz A., Javed O., Shah M. Object tracking: A survey // ACM computing surveys (CSUR). 2006. Vol. 38. No. 4. pp. 1-45.

8. Алпатов Б.А., Селяев А.А. Алгоритм оценки местоположения объекта на двумерном изображении // Изв. вузов. Приборостроение. 1988. № 5. С. 3-5.

9. Можейко В.И., Обухова Н.А., Тимофеев Б.С., Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Телевизионные методы сопровождения объектов в сложных условиях наблюдения // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 8. С. 20-29.

10. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Корепанов С.Е. Корреляционный алгоритм слежения за движущимися объектами при наличии близкорасположенных похожих объектов // Вестник РГРТУ. 2010. № 2 (32). С.3-8.

### *У в а ж а е м ы е а в т о р ы !*

Редакция научно-технического журнала «Цифровая обработка сигналов» просит Вас соблюдать следующие требования к материалам, направляемым на публикацию:

#### 1) Требования к текстовым материалам и сопроводительным документам:

- Текст – текстовый редактор Microsoft Word.
- Таблицы и рисунки должны быть пронумерованы. На все рисунки, таблицы и библиографические данные указываются ссылки в тексте статьи.
- Объем статьи до 12 стр. (шрифт 12). Для заказных обзорных работ объем может быть увеличен до 20 стр.
- Название статьи на русском и английском языках.
- Рукопись статьи сопровождается: краткой аннотацией на русском и английском языках; номером УДК; сведениями об авторах (Ф.И.О., организация, должность, ученая степень, телефоны, электронная почта); ключевыми словами на русском и английском языках; актом экспертизы (при наличии в вашей организации экспертной комиссии).

#### 2) Требования к иллюстрациям:

- Векторные (схемы, графики) – желательно использование графических редакторов Adobe Illustrator или Corel DRAW.
- Растровые (фотографии, рисунки) – М 1:1, разрешение не менее 300dpi, формат tiff.