

УДК 004.9

ДВУХПороГОВЫЙ АлГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЯМ

В. С. Киричук, А. К. Шакенов

*Институт автоматизи и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: adil.shakenov@ngs.ru*

Рассмотрены различные подходы к повышению качества обнаружения точечных динамических объектов за счёт использования стереовидения в условиях, когда полная совместная обработка стереопары изображений невозможна. Реализован улучшенный триангуляционный алгоритм с двойным пороговым отсечением. Исследована возможность формирования отметок по эпиполяркам для случая априорно известной геометрии съёмки. Проведено моделирование ситуации стереонаблюдения динамического объекта движущимися камерами. С использованием модельных данных для предложенных алгоритмов экспериментальным путём получена зависимость вероятности обнаружения от уровня ложных тревог.

Ключевые слова: поиск динамических объектов, малоразмерные объекты, стереовидение, обнаружение по стереопоследовательностям.

Введение. Естественным решением улучшения качества обнаружения слабоконтрастных малоразмерных динамических объектов при малом соотношении полезного сигнала и шума является использование дополнительной (часто априорно известной) информации, такой как пространственные [1] или пространственно-временные [2–4] зависимости фона, форма объекта [5], возможные траектории его движения и т. д. Синхронное наблюдение объекта с различных точек пространства — также дополнительный источник информации, которая может быть учтена в процессе обнаружения. В работе [6] рассмотрен алгоритм обнаружения объектов по стереопоследовательности, полученной стационарными камерами. В [7] проведён подробный анализ алгоритмов обнаружения объекта по стереоизображениям, а также приведён алгоритм, основанный на обработке всей совокупности имеющихся стереоданных. Однако при большой удалённости камер друг от друга передача большого объёма информации, требуемой для работы этого алгоритма, не всегда возможна. В таких случаях возникает необходимость в отдельном выделении подозрительных отметок по изображениям каждой камеры с их последующей передачей на пункт совместной обработки. В то же время приведённый в [7] триангуляционный алгоритм эпиполярного тестирования отметок, функционирующий по такой схеме, показал неудовлетворительные результаты при обнаружении слабоконтрастных объектов.

Целью предлагаемой работы является создание эффективных алгоритмов стереобнаружения объектов при ограниченном объёме передаваемых данных.

Постановка задачи. Пусть две одинаковые синхронизированные камеры на протяжении некоторого периода времени наблюдают один и тот же движущийся объект. Вся геометрия съёмки предполагается известной. Камеры могут наблюдать различные участки подстилающей поверхности, поэтому в общем случае применить стереоэффект на этапе межкадровой обработки невозможно. В данной работе предполагается, что стационарная часть фона оценена и устранена соответствующими процедурами межкадровой обработки независимо по каждой из монопоследовательностей. Таким образом, входные последовательности содержат изображение объекта и случайный шум, обусловленный помехами регистрации и ошибками оценивания стационарной части фона. Требуется обнаружить

объект по этой стереопоследовательности, причём объём совместно обрабатываемых данных должен быть на порядок меньше объёма данных целого изображения.

Математическая модель. Получаемые после процедур межкадровой обработки изображения содержат случайный шум и объект и допускают описание следующей моделью:

$$D_m^k(x_i, y_j) = \zeta_m^k(x_i, y_j) + A_m \phi(X_m^k - x_i, Y_m^k - y_j). \quad (1)$$

Здесь $i = 1, \dots, N_x$, $j = 1, \dots, N_y$ — номера узла дискретной решётки (N_x, N_y — размеры изображений); $m = 1, 2$ — номер последовательности; $k = 1, \dots, T$ — номер кадра в последовательности (T — количество кадров); $\zeta_m^k(x, y)$ — случайная величина с нормальным распределением $N(\mu_m^k, (\sigma_m^k)^2)$; A_m — амплитуда объекта; ϕ — форма объекта; (X_m^k, Y_m^k) — номер узла дискретной решётки, расположенного наиболее близко к проекции объекта на k -й кадр m -й последовательности. Экспериментально установлено, что после процедур межкадровой обработки $\mu_m^k \approx 0$, $\sigma_m^k \approx \sigma$. Считая, что $A_1 = A_2$, и проведя нормировку, имеем модель

$$D_m^k(x_i, y_j) = \varsigma(x_i, y_j) + A \phi(X_m^k - x_i, Y_m^k - y_j), \quad (2)$$

где $\varsigma(x_i, y_j)$ — случайная величина с нормальным распределением $N(0, 1)$; $A = A_1/\sigma$.

Триангуляционный алгоритм обнаружения с двойным пороговым отсечением. Рассмотрим стереопару изображений $D_1^k(x_i, y_j)$ и $D_2^k(x_i, y_j)$, сделанных разными камерами в один момент времени. Пронумеровав некоторым образом узлы дискретной решётки, введём обозначения \mathbf{p}_i и \mathbf{q}_i , $i = 1, \dots, N$, $N = N_x N_y$, для дискретных узлов изображений $D_1^k(x_i, y_j)$ и $D_2^k(x_i, y_j)$ соответственно. Пусть $\hat{\mathbf{p}}$ — некоторая точка в изображении $D_1^k(x_i, y_j)$. Поскольку изображения $D_1^k(x_i, y_j)$ и $D_2^k(x_i, y_j)$ являются стереопарой, то $\hat{\mathbf{p}}$ однозначно определяет две эпиллярные прямые в этих изображениях [8]. Обозначим $l^1(\hat{\mathbf{p}})$ эпиллярную прямую, задаваемую точкой $\hat{\mathbf{p}}$ в изображении $D_1^k(x_i, y_j)$, а $l^2(\hat{\mathbf{p}})$ эпиллярную прямую, определяемую точкой $\hat{\mathbf{p}}$ в изображении $D_2^k(x_i, y_j)$. Введём также обозначения множеств $ld^1(\hat{\mathbf{p}}, d) = \{p_i \mid \text{dist}(l^1(\hat{\mathbf{p}}), p_i) < d\}$ и $ld^2(\hat{\mathbf{p}}, d) = \{q_i \mid \text{dist}(l^2(\hat{\mathbf{p}}), q_i) < d\}$, где $\text{dist}(\cdot)$ — расстояние от прямой до точки, d — половина ширины эпиллярной линии. В работе [7] описан известный триангуляционный алгоритм обнаружения. Напомним кратко его схему. На первом этапе этого алгоритма делаются отметки в каждом кадре стереопары с выбором некоторого числа самых ярких точек. Пусть $T_1 = \{\mathbf{p}^n\}$, $n = 1, \dots, N_1$, — множество отметок на изображении $D_1^k(x, y)$; $T_2 = \{\mathbf{q}^m\}$, $m = 1, \dots, N_2$, — множество отметок на $D_2^k(x, y)$; N_1, N_2 — количество отметок на изображениях $D_1^k(x, y)$ и $D_2^k(x, y)$ соответственно. На втором этапе производится эпиллярное тестирование множеств T_1 и T_2 . Результатом тестирования являются новые множества \hat{T}_1 и \hat{T}_2 , имеющие следующий вид:

$$\hat{T}_1 = \{\mathbf{p}^n \in T_1 \mid ld^2(\mathbf{p}^n, d) \cap T_2 \neq \emptyset\}, \quad (3)$$

$$\hat{T}_2 = \{\mathbf{q}^m \in T_2 \mid ld^1(\mathbf{q}^m, d) \cap T_1 \neq \emptyset\}. \quad (4)$$

В рассмотренном алгоритме выполнялось эпиллярное тестирование с размером эпилляры $d = 0,7$. Будем называть стереоотметкой тройку, состоящую из пары точек двух изображений, удовлетворяющих эпиллярному соотношению, и суммы яркостей в этих точках $s = \langle \mathbf{p}_i, \mathbf{q}_j, I_1(\mathbf{p}_i) + I_2(\mathbf{q}_j) \rangle$. Конечным результатом триангуляционного алгоритма

является построение множества стереоотметок $S = \{s_i\}$ и восстановление трёхмерных координат в этих точках. В [7] установлено, что прямое применение описанной схемы даёт неудовлетворительные результаты при снижении яркости наблюдаемого объекта. Это происходит из-за того, что при больших значениях N_1, N_2 процедура эпиларного тестирования не уменьшает, а увеличивает количество результирующих стереоотметок. Такая ситуация возможна, потому что одной отметке из множества T_1 может соответствовать более одной отметки из T_2 . Если же N_1, N_2 выбирать таким образом, чтобы количество стереоотметок уменьшалось, то происходят частые пропуски объекта на одном из изображений стереопары. Строгий подсчёт вероятности обнаружения и ложной тревоги приведён в [7]. Предлагаемое решение проблемы заключается в следующем. Сначала обработка проводится вышеописанным способом, причём значения N_1, N_2 выбираются такими, чтобы вероятность обнаружения объекта по каждому из изображений стереопары была не меньше 0,9. Затем полученное множество стереоотметок переупорядочивается по значению суммарной яркости и проводится повторное пороговое отсечение.

Алгоритм формирования отметок по эпиларным линиям для случая априорно известной геометрии. В ситуации, когда при формировании множества отметок по каждому кадру известна геометрия съёмки другого кадра, возникает идея сначала построить разбиение на эпиларные линии, а затем формировать отметки в соответствии с построенным разбиением. Рассмотрим процедуру формирования отметок для некоторого кадра первой последовательности. Понятно, что можно разбить исходное изображение на эпиларные прямые, выбрав некое начальное множество точек $P = \{\tilde{p}_i\}$,

$i = 1, \dots, K$, и d так, чтобы $\tilde{p}_k \notin ld^1(\tilde{p}_l, d)$ при $l \neq k$ и $\bigcup_{k=1}^K ld^1(\tilde{p}_k, d) = \{p_i\}, i = 1, \dots, N$. При

формировании множества P выбор ширины эпилары относительно произволен. Большее значение d приведёт к меньшему количеству передаваемой информации и меньшей вероятности обнаружения, и наоборот. В данном случае $d = 0,7$. Остановимся более подробно на формировании множества $P = \{\tilde{p}_i\}, i = 1, \dots, K$. Одним из возможных вариантов построения такого множества является последовательный перебор точек p_1, p_2, \dots , при этом $p_i \in P \Leftrightarrow \forall j < i, p_i \notin ld^1(p_j)$. В рассмотренной реализации алгоритма использовался другой подход. Сначала точки пересортировывались по убыванию яркости, так что $\forall i, j: i < j \Rightarrow D_1^k(p_i) \geq D_1^k(p_j)$, затем применялась описанная выше процедура формирования множества P . Знание геометрии съёмки второго кадра стереопары позволяет исключить из построенного множества P отметки, для которых $ld^2(\tilde{p}_k, d) = \emptyset$. Когда P известно, множество отметок можно построить, выбирая из каждого $ld^1(\tilde{p}_k, d)$ одну или несколько самых ярких точек. После того как отдельно по каждому из кадров $D_1^k(x_i, y_j)$ и $D_2^k(x_i, y_j)$ сформированы множества отметок, они передаются на общий центр обработки. Совместная обработка сводится, как и раньше, к эпиларному тестированию, построению множества стереоотметок, переупорядочению по значениям суммарной яркости и восстановлению трёхмерных координат найденных точек.

Экспериментальные результаты. Для исследования эффективности рассмотренных алгоритмов использовались те же модельные данные, что и в [7], исключение стационарного фона производилось с помощью процедур межкадровой обработки, изложенных в [9]. Случайный шум датчиков моделировался таким образом, чтобы после устранения стационарного фона соотношение исходной яркости объекта и СКО шума было равно 4. Оценённое среднее значение длины эпилары для использованной геометрии съёмки составило порядка 250 пикселей. На рис. 1 показана экспериментально полученная зависимость вероятности обнаружения от уровня ложных тревог для алгоритма двойной пороговой обработки (кривая 4). Для сравнения приведены аналогичные зависимости для моноалгоритма (кривая 1), обычного триангуляционного алгоритма (кривая 3) и опти-

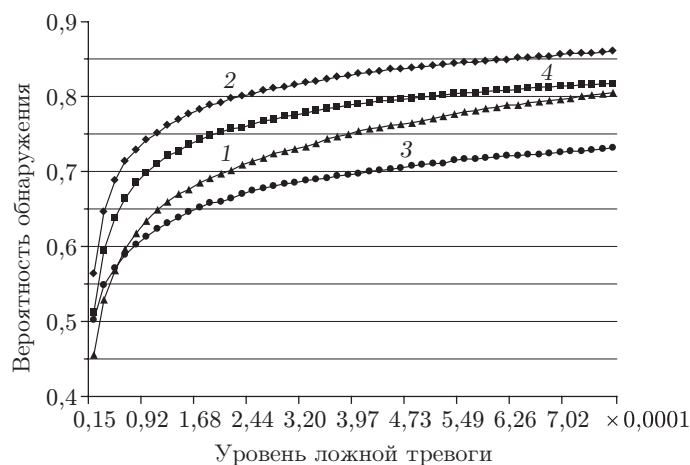


Рис. 1

мального стереоалгоритма (кривая 2) [7]. В экспериментах на первом этапе обработки использовалось 550 отметок с каждого кадра.

На рис. 2 показана экспериментально полученная зависимость вероятности обнаружения от уровня ложных тревог для алгоритма обнаружения по эпполярным линиям (кривая 3). В проведенных экспериментах с каждой эпполяры выбирались три самые яркие точки. Среднее значение количества передаваемых отметок равно 550 точкам. Для сравнения приведены аналогичные зависимости для моноалгоритма, триангуляционного алгоритма с двойным порогом и оптимального стереоалгоритма. Амплитуда объекта равна четырём СКО шума регистрации. (Обозначения остальных кривых см. на рис. 1.)

Зависимость вероятности обнаружения от объема передаваемых данных в алгоритме двойного порогового отсека. Количество данных, которые могут быть переданы в общий центр обработки, может варьироваться в широких пределах. Максимальный объем передаваемой информации зависит от пропускной способности канала, алгоритмов сжатия и кодировки, числа градаций серого и других факторов. Поэтому возникает необходимость оценивания качества работы алгоритма в зависимости от количества передаваемых данных. Для исследования этой зависимости ставился следующий эксперимент. Объем передаваемой в общий центр обработки информации изменялся от 100 до 2000 точек с шагом 100 точек. Был проведен эксперимент с фиксированной вероят-

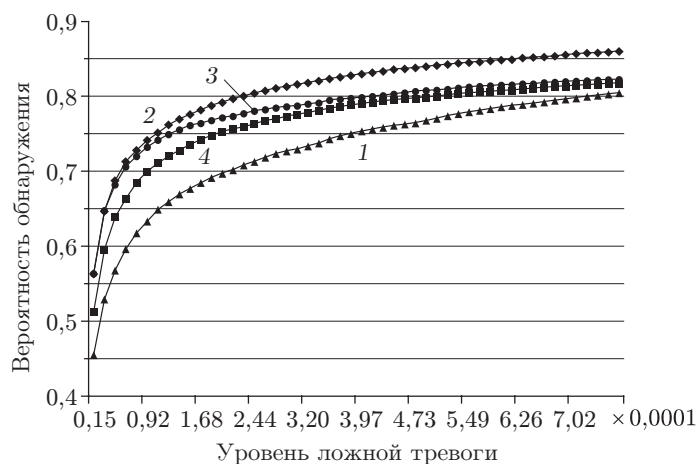


Рис. 2

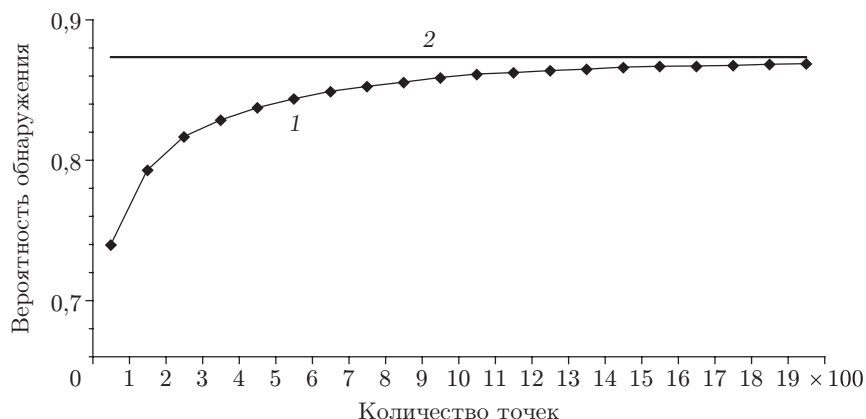


Рис. 3

**Асимптотическая сходимость алгоритмов
полной обработки и двойного порога**

Количество точек	Вероятность обнаружения	Разность результатов алгоритмов
6000	0,872292994	0
5000	0,872133758	0,000159
4000	0,871496815	0,000796
3000	0,870859873	0,001433
2000	0,867675159	0,004618
1000	0,85955414	0,012739

ностью ложной тревоги $7,6 \cdot 10^{-4}$ (50 стереоотметок). Полученные значения вероятности обнаружения приведены на рис. 3 (кривая 1). Для сравнения дано значение вероятности обнаружения при использовании алгоритма полной совместной стереообработки по двум кадрам (кривая 2). Как видно из рисунка, при возрастании объёма передаваемых данных вероятность обнаружения алгоритмом двойного порогового отсека стремится к вероятности обнаружения алгоритмом полной совместной стереообработки по двум кадрам.

При существенном возрастании объёма передаваемых данных оба алгоритма будут давать практически одинаковые результаты. Чтобы исследовать скорость сходимости вероятностей обнаружения обоими алгоритмами, был проведён эксперимент, аналогичный описанному выше. Объём информации, направляемой в общий центр обработки, изменялся от 1000 до 6000 точек с шагом 1000 точек. Эксперимент осуществлялся для уровня ложной тревоги $7,6 \cdot 10^{-4}$. В ходе эксперимента обработано порядка 5000 стереопар, результаты приведены в таблице.

Заключение. Из представленных данных видно, что алгоритм триангуляции с двойным пороговым отсека показал лучшие результаты, чем монообработка. Алгоритм формирования отметок по эпиполярным линиям даёт лучшие результаты, чем двойной порог, однако выигрыш незначителен. Знание геометрии съёмки второго кадра стереопары при формировании множества отметок по обрабатываемому изображению является достаточно сильным требованием. Кроме того, алгоритм формирования отметок по эпиполярным плохо поддаётся параллельной реализации и имеет большую вычислительную сложность. С учётом вышеизложенного использование этого алгоритма в практических задачах может быть не оправдано. В то же время алгоритм двойного порогового отсе-

чения, в котором не требуется знания априорно известной геометрии съёмки, позволяет достичь приемлемых результатов при уменьшении объёма данных на два порядка (600–1000 отметок при размере изображения 65000 точек). Также с помощью этого алгоритма можно уменьшить на порядок объём передаваемых данных, практически сохраняя вероятность обнаружения на уровне алгоритма полной совместной стереообработки по двум кадрам.

Проведённые исследования показали возможность эффективного использования стереообнаружения отметок в ситуации, когда полная совместная обработка обоих кадров невозможна. В экспериментах было достигнуто увеличение вероятности обнаружения на 0,05–0,15 по сравнению с монообнаружением. Установлено, что знание геометрии съёмки обоих кадров при раздельном формировании множества отметок позволяет незначительно улучшить качество обнаружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шакенов А. К.** Алгоритмы подавления фона в задаче обнаружения точечных объектов на изображениях // *Автометрия*. 2014. **50**, № 4. С. 81–87.
2. **Борзов С. М., Потатуркин О. И.** Обнаружение малоразмерных динамических объектов подвижной системой наблюдения // *Автометрия*. 2012. **48**, № 1. С. 23–29.
3. **Борзов С. М.** Обнаружение динамических объектов по пространственно-временным аномалиям в видеопоследовательностях // *Автометрия*. 2013. **49**, № 1. С. 11–17.
4. **Иванов В. А., Киричук В. С.** Выделение движущихся объектов по последовательности изображений в реальном времени // *Автометрия*. 2009. **45**, № 5. С. 14–21.
5. **Киричук В. С., Косых В. П.** Построение многоканального фильтра для обнаружения точечных объектов в изображении, формируемом матричным фотоприёмником // *Автометрия*. 2012. **48**, № 5. С. 82–92.
6. **Киричук В. С., Иванов В. А., Ангерев В. Ю., Синельщиков В. В.** Методика выделения подвижных точечных объектов при регистрации сцены с двух точек наблюдения // *Автометрия*. 2000. № 6. С. 3–9.
7. **Киричук В. С., Шакенов А. К.** Алгоритмы обнаружения точечных объектов по стереоизображениям // *Автометрия*. 2005. **41**, № 2. С. 14–22.
8. **Faugeras O.** *Three-Dimensional Computer Vision*. London: MIT Press, 1999. 169 p.
9. **Киричук В. С., Шакенов А. К.** Обнаружение точечных динамических объектов, регистрируемых движущейся камерой // *Автометрия*. 2004. **40**, № 1. С. 3–14.

Поступила в редакцию 21 ноября 2013 г.
