

УДК 004.932, 004.272

МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БИНАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕД*

Д. В. Шашев¹, С. В. Шидловский^{1,2}

¹Томский государственный университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 36

²Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30
E-mail: dshashev@mail.ru

Затрагивается проблема применения высокопроизводительных вычислительных систем с архитектурой параллельного принципа функционирования для решения задач обработки изображений, излагается идея использования перестраиваемых вычислительных сред. Рассматривается синтез моделей перестраиваемых вычислительных сред для некоторых задач обработки бинарных изображений, а также демонстрируются результаты их работы.

Ключевые слова: обработка изображений, перестраиваемая вычислительная среда, высокопроизводительная вычислительная система.

Введение. В настоящее время огромное количество разнообразных задач научного и прикладного характера решается с помощью той или иной вычислительной техники. С ростом человеческих потребностей и научного прогресса многократно возрастает как их число, так и сложность выполнения. Многие задачи, особенно научного характера, включают большое количество операций, которые необходимо проводить максимально быстро и качественно. Для этого в современных вычислительных системах используется многократное аппаратное наращивание (многопроцессорная техника, увеличение оперативной памяти и т. д.).

Наряду с устоявшимся принципом увеличения вычислительной мощности требуются альтернативные подходы. Одним из таких подходов является использование концепции перестраиваемой вычислительной среды (ПВС), позволяющей достичь многократного увеличения скорости выполнения поставленных задач, надёжности работы вычислительной среды, а также упрощения технологии производства.

Цифровая обработка изображений — актуальная область, в которой необходимо обрабатывать большое количество информации и тем самым применять быстродействующие и эффективные вычислительные системы.

Цель данной работы — синтез моделей ПВС для решения задач цифровой обработки изображений, результат и принципы работы которых демонстрируют возможность их применения в высокоскоростной обработке изображений, в том числе в масштабе реального времени.

1. Методы морфологической обработки бинарных изображений. В области обработки изображений слово «морфология» используется в контексте математической морфологии — инструмента для извлечения некоторых компонент изображения, полезных для его представления и описания [1]. В данной работе интерес представляют мор-

*Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ (проект № МД-411.2014.9).

фологические методы, применяемые для обработки изображений, например фильтрация, утончение, формирование контура объекта интереса [2].

Пользуясь терминологией теории множеств, полагаем, что функция $f(x, y)$ называется цифровым изображением, если (x, y) — это пары целых чисел из декартова произведения Z^2 (декартово произведение множества Z на себя, т. е. множество всех упорядоченных пар (z_i, z_j) , где z_i, z_j — любые целые числа), а f — отображение, сопоставляющее значение яркости (принадлежащее множеству вещественных чисел R) каждой паре координат (x, y) .

Математическая морфология позволяет взглянуть на бинарное изображение (содержащее пиксели фона и объекта интереса, значения яркости которых равны 0 и 1 соответственно) как на множество пикселей переднего плана в пространстве Z^2 (со значением яркости равным 1) [1]. Исходя из этого операции, совершаемые над множествами, можно производить и над изображениями.

Как следствие, простейшими операциями являются теоретико-множественные операции пересечения, объединения, разности, дополнения и т. д.

Морфологические операции выполняются над двумя изображениями: обрабатываемым и специальным, зависящим от вида операции и решаемой задачи. Такое специальное изображение в математической морфологии называется структурным элементом или примитивом. Размер структурного элемента, как правило, равен 3×3 , 4×4 , 5×5 пикселей. Это обусловлено самой идеей морфологической обработки, в процессе которой отыскиваются характерные детали изображения. Искомая деталь описывается примитивом, и в результате морфологической обработки можно подчеркнуть или удалить такие детали на всём обрабатываемом изображении [2].

С помощью теоретико-множественных операций образуются основные операции морфологической обработки изображений: сужение, расширение, открытие и закрытие [1, 3].

Операции расширения и сужения имеют основополагающее значение при морфологической обработке изображений.

1. *Сужение.* Пусть A и B — множества из пространства Z^2 . Эрозия множества A по множеству B обозначается $A \ominus B$ и определяется как

$$A \ominus B = \{z \mid (B)_z \cap A^c = \emptyset\},$$

где A^c — отрицание A ; $(B)_z$ — параллельный перенос множества B в точку $z = (z_1, z_2)$ (сдвиг в точку z), т. е. сужение множества A по примитиву B — это множество всех таких точек z , при сдвиге в которые примитив B целиком содержится в A . На практике операция сужения «ужимает» или «утощает» объекты бинарных изображений. Способ и степень утолщения контролируется примитивом B .

2. *Расширение.* Пусть A и B — множества из пространства Z^2 . Расширение множества A по множеству B обозначается $A \oplus B$ и определяется как

$$A \oplus B = \{z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\},$$

где \hat{B}_z — центральное отражение B (относительно его начала координат) с последующим параллельным переносом в точку $z = (z_1, z_2)$ (сдвиг в точку z), т. е. расширение множества A по примитиву B — это множество всех таких смещений z , при которых множества \hat{B} и A совпадают, по меньшей мере, в одном элементе. На практике операция расширения «наращивает» или «утолщает» объекты на бинарных изображениях.

Необходимо отметить, что чаще всего операции сужения и расширения используются совместно. Поэтому к морфологическим операциям добавляются также операции открытия и закрытия.

3. *Открытие* множества A по примитиву B обозначается $A \circ B$ и определяется равенством

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B,$$

либо эквивалентной формулой

$$A \circ B = \bigcap \{(B)_z \mid (B)_z \subseteq A\}.$$

На практике операция открытия сглаживает контуры объекта, обрывает перешейки и ликвидирует выступы небольшой ширины.

4. *Закрытие* множества A по примитиву B обозначается $A \bullet B$ и задаётся равенством

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B.$$

На практике операция закрытия сглаживает контуры объекта, в общем случае «заливает» узкие разрывы и длинные углубления малой ширины, а также ликвидирует небольшие отверстия и заполняет промежутки контура.

2. Перестраиваемая вычислительная среда. В настоящее время перспективной концепцией высокопроизводительных вычислительных систем является ПВС — дискретная математическая модель высокопроизводительной вычислительной системы, состоящей из одинаковых и одинаково соединённых друг с другом простейших универсальных элементов (элементарных вычислителей), программно-настраиваемых на выполнение любой функции из полного набора логических функций, памяти и любого соединения со своими соседями [4, 5].

Результаты многочисленных исследований обобщены и на их базе сформулированы основные принципы создания ПВС [5–7]: параллельность, перестраиваемость, однородность, конвейерность обработки информации.

Вычислительная среда, построенная по указанным выше принципам, отвечает следующим требованиям:

1) повышенному быстродействию за счёт параллельного (одновременного) выполнения большого числа операций;

2) надёжности, гибкости и структурной универсальности за счёт большого числа однотипных и универсальных вычислителей внутри среды и программного изменения связей между вычислителями и их логическими функциями;

3) простоте технологии изготовления благодаря использованию одинаковых вычислителей и однотипных связей между ними.

3. Перестраиваемая вычислительная среда для морфологической обработки бинарных изображений. Принцип работы методов морфологической обработки бинарных изображений можно представить в виде функциональной схемы (рис. 1). Под маскированием будем понимать некоторое разбиение исходного цифрового изображения на участки A_i , равные по размеру (в пикселах) примитиву B , а также дальнейшее «наложение» B



Рис. 1. Схема работы морфологических методов

на A_i , чем будет задаваться соответствие пикселей B пикселям A_i . Далее, на основании полученного ранее соответствия осуществляется логическая операция между элементами (пикселями) A_i и B и результат включается в уже обработанное конечное изображение A^* . Таким образом, циклично осуществляется обработка всего цифрового изображения.

В результате в классическом исполнении методы морфологической обработки бинарных изображений выполняются последовательно в цикле.

В данной работе предлагается технология обработки бинарных изображений, по которой на каждый элементарный вычислитель ПВС подаётся один из пикселей исходного изображения. Таким образом, размерность ПВС здесь совпадает с размерностью изображения.

Перестраиваемую вычислительную среду также можно дополнить понятием перестраиваемого автомата и рассмотреть её работу с точки зрения теории автоматов. Перестраиваемым называется автомат, для которого задано множество реализуемых им автоматных отображений и определён алгоритм настройки на реализацию каждого из них [4]. Автоматное отображение — это однозначное отображение зависимости вектора входов автомата от вектора выходов, а настройка на реализацию каждого из автоматных отображений осуществляется путём определения их кодов настройки.

Согласно рис. 1 и приведённым в разд. 1 описаниям базовых операций исходное изображение необходимо дополнить примитивом B . В практике обработки изображений такие примитивы являются стандартными элементами [1, 3], поэтому для нашего случая выберем в качестве B матрицу единиц размером 3×3 .

Сам элемент B «вложим» в архитектуру синтезируемой ПВС, следовательно, на вход среды будет подаваться только исходное изображение. Тот или иной вид примитива B будет определять только количество межавтоматных связей элементарного вычислителя и места их приложения в среде.

На базе описанных операций зададим автоматные отображения, реализуемые в ПВС для морфологической обработки бинарных изображений (рис. 2). Для операции расширения предназначено автоматное отображение, представленное на рис. 2, a , для операции сужения — на рис. 2, b — g .

Присвоим каждому автоматному отображению код настройки (z_4, z_3, z_2, z_1) , при котором автомат перестраивается на него, а также системы выходных формул, т. е. запишем автоматные операторы:

$$1) z_4 = 0, z_3 = 0, z_2 = 0, z_1 = 0 \text{ (см. рис. 2, } a) \quad 2) z_4 = 0, z_3 = 0, z_2 = 0, z_1 = 1 \text{ (см. рис. 2, } b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f = x \vee \left(\bigvee_{i=1}^8 y_i \right), \\ f_1^M = f_2^M = f_3^M = f_4^M = f_5^M = \\ = f_6^M = f_7^M = f_8^M = x; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} f = x \wedge \left(\bigwedge_{i=1}^8 y_i \right), \\ f_1^M = f_2^M = f_3^M = f_4^M = f_5^M = \\ = f_6^M = f_7^M = f_8^M = x; \end{array} \right.$$

$$3) z_4 = 0, z_3 = 0, z_2 = 1, z_1 = 0 \text{ (см. рис. 2, } c) \quad 4) z_4 = 0, z_3 = 0, z_2 = 1, z_1 = 1 \text{ (см. рис. 2, } d)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f = x \wedge \left(\bigwedge_{i=4}^6 y_i \right), \\ f_1^M = f_2^M = f_3^M = f_7^M = f_8^M = 0, \\ f_4^M = f_5^M = f_6^M = x; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} f = x \wedge \left(\bigwedge_{i=4}^8 y_i \right), \\ f_1^M = f_2^M = f_3^M = 0, \\ f_4^M = f_5^M = f_6^M = f_7^M = f_8^M = x; \end{array} \right.$$

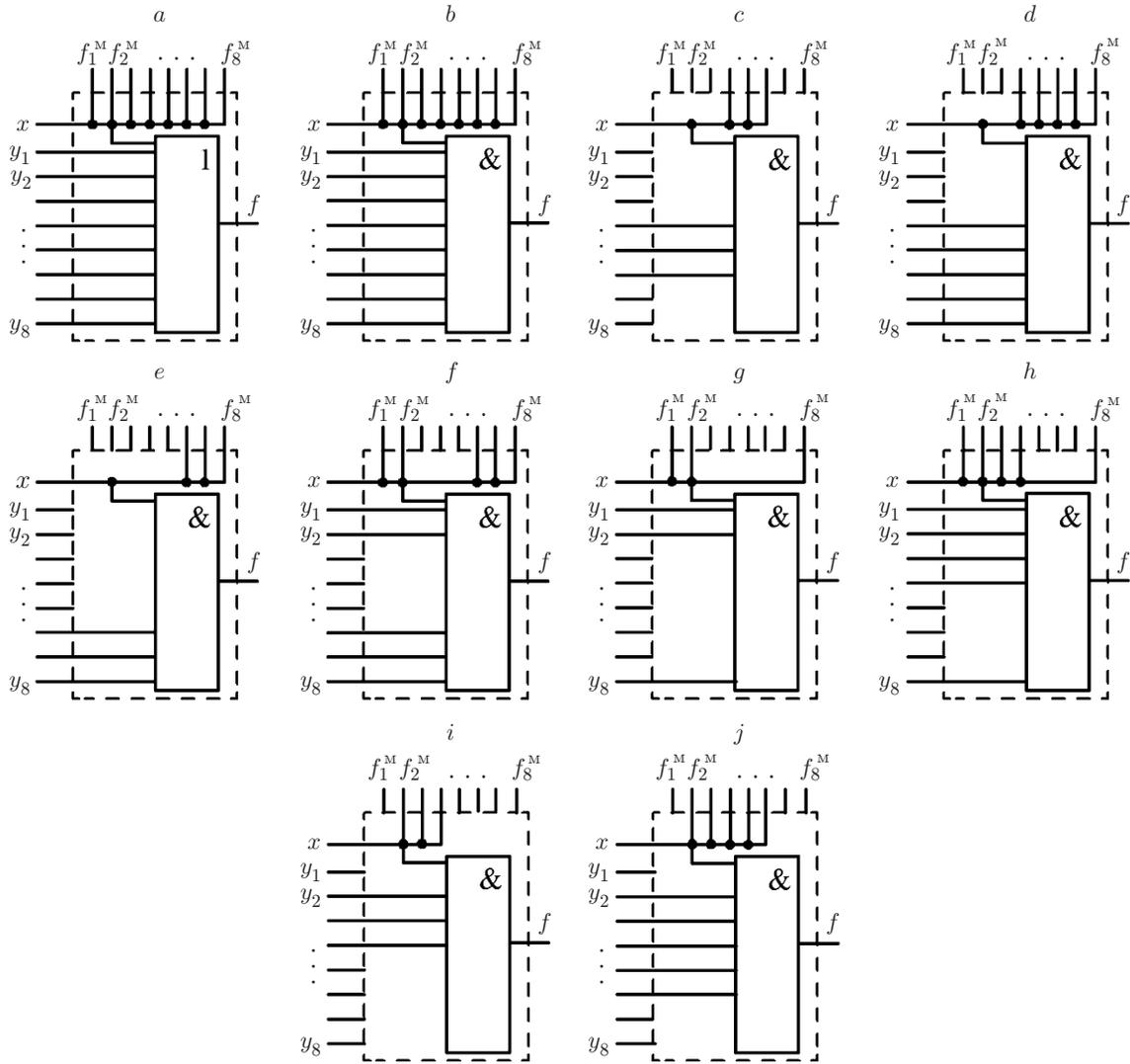


Рис. 2. Автоматные отображения (x, y_i — информационные входы; f — выход автомата; f_j^M — выходы межавтоматных связей)

5) $z_4 = 0, z_3 = 1, z_2 = 0, z_1 = 0$ (см. рис. 2, e) 6) $z_4 = 0, z_3 = 1, z_2 = 0, z_1 = 1$ (см. рис. 2, f)

$$\left\{ \begin{array}{l} f = x \wedge \left(\bigwedge_{i=6}^8 y_i \right), \\ f_1^M = f_2^M = f_3^M = f_4^M = f_5^M = 0, \\ f_6^M = f_7^M = f_8^M = x; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} f = x \wedge y_1 \wedge y_2 \wedge \left(\bigwedge_{i=6}^8 y_i \right), \\ f_3^M = f_4^M = f_5^M = 0, \\ f_1^M = f_2^M = f_6^M = f_7^M = f_8^M = x; \end{array} \right.$$

7) $z_4 = 0, z_3 = 1, z_2 = 1, z_1 = 0$ (см. рис. 2, g) 8) $z_4 = 0, z_3 = 1, z_2 = 1, z_1 = 1$ (см. рис. 2, h)

$$\left\{ \begin{array}{l} f = x \wedge y_1 \wedge y_2 \wedge y_8, \\ f_3^M = f_4^M = f_5^M = f_6^M = f_7^M = 0, \\ f_1^M = f_2^M = f_8^M = x; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} f = x \wedge y_8 \wedge \left(\bigwedge_{i=1}^4 y_i \right), \\ f_1^M = f_2^M = f_3^M = f_4^M = f_8^M = 0, \\ f_5^M = f_6^M = f_7^M = x; \end{array} \right.$$

9) $z_4 = 1, z_3 = 0, z_2 = 0, z_1 = 0$ (см. рис. 2, *i*) 10) $z_4 = 1, z_3 = 0, z_2 = 0, z_1 = 1$ (см. рис. 2, *j*)

$$\left\{ \begin{array}{l} f = x \wedge \left(\bigwedge_{i=2}^4 y_i \right), \\ f_1^M = f_5^M = f_6^M = f_7^M = f_8^M = 0, \\ f_2^M = f_3^M = f_4^M = x; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} f = x \wedge \left(\bigwedge_{i=2}^6 y_i \right), \\ f_1^M = f_7^M = f_8^M = 0, \\ f_2^M = f_3^M = f_4^M = f_5^M = f_6^M = x. \end{array} \right.$$

На базе структурно-автоматного метода [3] получаем следующую систему булевых формул, которая будет описывать весь элементарный вычислитель ПВС:

$$\left\{ \begin{array}{l} f = xy_1y_2y_8[(y_3y_4y_5y_6y_7\bar{z}_2\bar{z}_3) \vee (y_3y_4z_2z_3\bar{z}_4) \vee (y_6y_7\bar{z}_2z_3\bar{z}_4) \vee (\bar{z}_1z_2z_3\bar{z}_4)] \vee \\ \vee xy_4\bar{z}_3[(y_2y_3y_5y_6\bar{z}_2z_4) \vee (y_2y_3\bar{z}_1\bar{z}_2) \vee (y_5y_6y_7y_8z_2\bar{z}_4) \vee (y_5y_6\bar{z}_1\bar{z}_4)] \vee \\ \vee \bar{z}_1\bar{z}_2\bar{z}_4[xy_6y_7y_8 \vee (x \vee y_1 \vee y_2 \vee y_3 \vee y_4 \vee y_5 \vee y_6 \vee y_7 \vee y_8)\bar{z}_3], \\ f_1^M = x\bar{z}_4(z_1\bar{z}_2 \vee \bar{z}_1z_2z_3 \vee \bar{z}_2\bar{z}_3), \\ f_2^M = x\bar{z}_2[\bar{z}_4(z_1 \vee \bar{z}_1z_3) \vee \bar{z}_3], \\ f_3^M = x\bar{z}_2\bar{z}_3, \\ f_4^M = x\bar{z}_3(\bar{z}_2 \vee \bar{z}_4), \\ f_5^M = x[z_1(z_2\bar{z}_4 \vee \bar{z}_2\bar{z}_3) \vee \bar{z}_3\bar{z}_4], \\ f_6^M = x[z_1(\bar{z}_2\bar{z}_3 \vee \bar{z}_4) \vee \bar{z}_4(\bar{z}_2 \vee \bar{z}_3)], \\ f_7^M = x\bar{z}_4(z_1 \vee \bar{z}_2), \\ f_8^M = x\bar{z}_4(z_1\bar{z}_3 \vee \bar{z}_1z_3 \vee \bar{z}_2). \end{array} \right.$$

Для наглядности приведём автоматное отображение операции сужения, представленное в плоскостном виде (см. рис. 2, *b*), в трёхмерном пространстве (рис. 3, *a, b*).

На рис. 3, *c* показан пример ПВС для морфологической обработки бинарных изображений размером 5×5 пикселей, осуществляющей операцию расширения или сужения. Как видно из рисунка, в узлах решётки ПВС расположены элементарные вычислители, которые настраиваются в соответствии с автоматными операторами: для выполнения операции расширения каждый вычислитель настраивается на код $z_1 = 0, z_2 = 0, z_3 = 0, z_4 = 0$, а для операции сужения — на код $z_1 = 1, z_2 = 1, z_3 = 1, z_4 = 1$. Бывают случаи, когда для корректного выполнения операции сужения необходимо перестроить крайние ряды с ячейками ПВС на другие автоматные отображения (см. рис. 2, *c—j*). Такая необходимость возникает, когда пиксели объекта интереса на обрабатываемом изображении попадают на крайние пиксели всего изображения.

Так как операции закрытия и открытия представляют собой определённые последовательности операций расширения и сужения, то для их выполнения можно использовать последовательность взаимосвязанных ПВС, выполняющих эти операции (рис. 3, *d*). Таким образом, в ПВС осуществляется одновременная параллельная попиксельная обработка цифрового изображения в соответствии с логикой работы той или иной операции морфологической обработки бинарных изображений.

4. Результат моделирования. Моделирование перестраиваемой вычислительной среды для основных операций морфологической обработки бинарных изображений, а также проверка корректности работы данных операций производились с помощью пакета MATLAB Simulink. Проверка на корректность осуществлялась путём сравнения резуль-

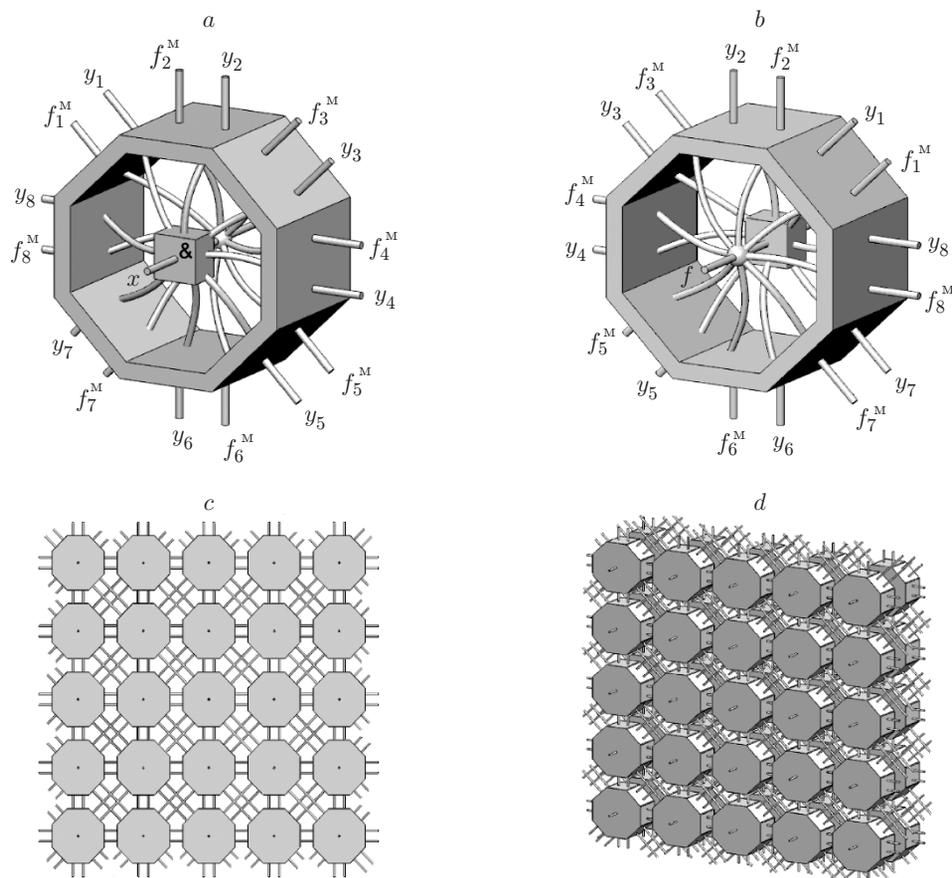


Рис. 3. Пространственное представление ПВС и автоматного отображения для операции сужения: a, b — лицевая и обратная стороны автоматного отображения; c — общий вид ПВС; d — ПВС для операций открытия и закрытия

татов работы операций на основе ПВС и вышеописанных операций, доступных для применения в расширении Image Processing Toolbox пакета MATLAB.

Результат работы операции закрытие (т. е. последовательности выполнения операции расширения, а затем сужения) на основе ПВС и с помощью встроенных средств MATLAB представлен на рис. 4. В данном случае тестовое исходное изображение имеет достаточно малый размер 8×8 пикселей (рис. 4, a). Полученные результаты при использовании ПВС (рис. 4, b) и в MATLAB (рис. 4, c) идентичны, что свидетельствует о корректности работы ПВС. Теперь продемонстрируем выполнение перестраиваемой вычислительной средой задач морфологической обработки бинарных изображений на реальном изображении. На рис. 4, d представлено зашумлённое бинарное изображение объектов различной геометрической формы. Шум проявляется в виде бесконечного числа малых белых пятен на чёр-

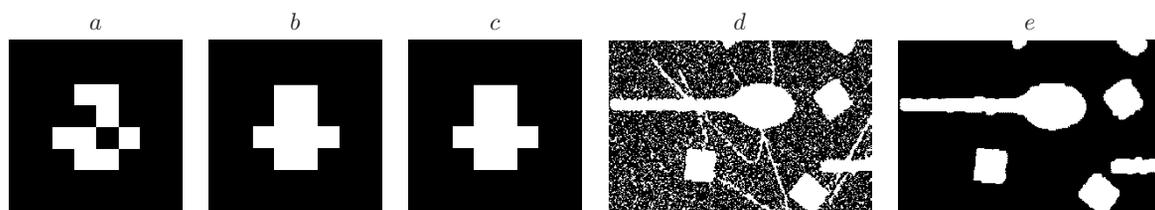


Рис. 4. Результаты обработки тестовых изображений

ном фоне, что искажает реальную форму объектов интереса. В итоге с помощью модели, описываемой ПВС, необходимо избавиться от шума с минимальным искажением формы объектов интереса (рис. 4, е). Для этого была задействована последовательность операций открытия и расширения.

Заключение. В данной работе исследована возможность реализации модели ПВС для задач морфологической обработки бинарных изображений. Показано, что с помощью ПВС можно добиться таких же результатов, что и при использовании классических методов, однако время обработки в первом случае значительно сокращается: операции расширение/сужение выполняются за один такт, а операции закрытие/открытие — за два такта работы элементарного автомата ПВС.

Исследование и создание ПВС для задач обработки изображений, а также других классов задач являются перспективным направлением в настоящее время, поскольку концепция построения таких вычислительных сред обладает высокими вычислительными возможностями по сравнению с используемыми вычислительными средствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
2. **Иванов В. А., Киричук В. С.** Особенности работы алгоритмов обнаружения упавшего человека по последовательности изображений сцены // Автометрия. 2011. 47, № 2. С. 15–25.
3. **Шапиро Л., Стокман Дж.** Компьютерное зрение: Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
4. **Шидловский С. В.** Автоматическое управление. Реконфигурируемые системы: Учеб. пособие. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. 168 с.
5. **Шидловский С. В.** Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры. Томск: Томский государственный университет, 2006. 288 с.
6. **Каляев И. А., Левин И. И., Семерников Е. А., Шмойлов В. И.** Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. 393 с.
7. **Хорошевский В. Г., Курносков М. Г., Мамоиленко С. Н.** Пространственно-распределённая мультикластерная вычислительная система: архитектура и программное обеспечение // Вестн. ТГУ. Управление, вычислительная техника и информатика. 2011. № 1(14). С. 79–84.

Поступила в редакцию 23 апреля 2014 г.
