

УДК 681.5

## ВЫДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПРИЗНАКОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ СИМВОЛОВ НА ОСНОВЕ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ С МЕТКАМИ

**Д. И. Суясов<sup>1</sup>,**

аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,  
механики и оптики

Рассматривается выделение структурных признаков изображений символов, что является частью процесса распознавания текста. Использование клеточных автоматов позволяет упростить вычисления, исключив операции с плавающей точкой, и обеспечивает возможность параллельной обработки точек изображения. Вводятся понятия клеточного автомата с метками и управления набором клеточных автоматов. Предлагаются алгоритмы по выделению признаков изображений символов на основе клеточных автоматов с метками и приводятся результаты экспериментов над ними.

**Ключевые слова** — клеточный автомат, распознавание текста, структурные признаки.

### Введение

С середины XX в. ведутся работы по распознаванию текстов. Распознаванием текста называют перевод последовательности графических образов символов в последовательность символов, воспринимаемую ЭВМ в качестве текста. Решение этой задачи позволит упростить работу человека с системами документооборота, анализ данных, автоматическую обработку текстов и анкет при переводе в электронный вид печатных архивов и т. д. В настоящее время эта задача продолжает быть актуальной, так как погрешность существующих систем и алгоритмов при распознавании текстов хоть и достаточно низка (в некоторых системах достигает 0,2–0,5 %), но не настолько мала, чтобы ею можно было пренебречь.

В большинстве работ, связанных с областью систем распознавания, предлагается разделение процесса распознавания на составляющие. В них рассматриваются отдельные подпроцессы по фильтрации изображений [1], сегментированию [2, 3], преобразованию изображений [4, 5] и выде-

лению из них признаков [6] с последующей классификацией.

Данная работа является частью исследований по определению перспективных подходов к построению систем распознавания текста, основанных на простых вычислениях и возможности параллельной обработки изображений символов текста. В исследовании, аналогично большинству работ, предлагается рассматривать системы распознавания текста как совокупность подпроцессов, но при этом решаются задачи по их упрощению и реализации на основе автоматного подхода [7, 8].

В настоящей работе рассматривается процесс выделения структурных признаков изображений символов, как один из наиболее важных этапов распознавания текста. Предлагается простой и эффективный подход к решению данной задачи с помощью клеточных автоматов.

Клеточные автоматы были предложены в работе фон Неймана [7] и получили развитие в 70–80-х гг. прошлого века. Они являются примером распределенных систем, основанных на простых правилах, которые позволяют реализовывать сложное поведение [8–10]. Сегодня существует большое число статей по клеточным автоматам, связанных с системами распознавания текста [2, 3, 11–13]. В основном в них делается упор на генетический подход к построению эффектив-

<sup>1</sup> Научный руководитель — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий программирования Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики А. А. Шалыто.

ных клеточных автоматов. К сожалению, данный подход позволяет лишь приблизиться к оптимальному решению для выделенных наборов экспериментальных изображений с текстом. Универсального алгоритма при таком подходе не найдено.

В настоящей статье рассматривается клеточный автомат и вводится новый его тип — клеточный автомат с метками, а также прорабатывается вопрос построения набора клеточных автоматов. Затем определяются признаки, присущие символам текста, и излагаются принципы их выделения, описываются алгоритмы выделения указанных признаков с помощью клеточных автоматов, обсуждается вопрос производительности и эффективности работы этих алгоритмов.

### Клеточный автомат

Клеточный автомат — это распределенная система, состоящая обычно из однородных простых элементов, локально связанных на периодической решетке (поле), глобальное состояние которых изменяется с течением времени на основе локальных правил переходов элементов поля [8].

Формально клеточный автомат определяется как набор  $\{G, Z, N, f\}$ , где:

$G$  — метрика поля, на котором действует клеточный автомат;

$Z$  — множество состояний каждой клетки;

$N$  — окрестность клетки, которая влияет на состояние данной клетки;

$f$  — правила клеточного автомата,  $Z \times Z^{|N|} \rightarrow Z$ .

Существует несколько классификаций клеточных автоматов: по способу применения локальных правил на элементы поля (синхронные и асинхронные), по возможности применять различные правила для разных элементов поля (однородные и неоднородные), а также по наличию вероятностных правил переходов (детерминированные и вероятностные) и по стационарности клеток поля (подвижные и неподвижные). В данной работе рассматриваются синхронные однородные детерминированные неподвижные клеточные автоматы.

Дальнейшая классификация клеточных автоматов состоит в следующем [8]. Для циклического клеточного автомата определяется несколько наборов правил переходов, которые поочередно применяются к полю. Другой тип клеточных автоматов — мобильные клеточные автоматы, в которых определены одна или несколько активных клеток, участвующие в локальных правилах переходов. Часто изменения в мобильном клеточном автомате происходят только с активными клетками поля.

В качестве развития идеи мобильного клеточного автомата введем другой тип — клеточный автомат с метками. В этом автомате состояние каждого элемента (клетки) поля определяется двумя составляющими. Первая из них представляет собой классическое состояние, введенное в рамках основного определения клеточного автомата. Вторая часть — это набор меток, которые по отдельности или в некоторой комбинации могут принадлежать клетке или не принадлежать ей. Метки в данном случае могут играть роль маркеров для клеток.

Формально клеточный автомат с метками можно определить как набор  $\{G, M, Z, N, f\}$ , где:

$G$  — конечное дискретное метрическое множество, гарантирующее конечность расстояний между клетками;

$M$  — конечное множество меток, определенное для каждой клетки;

$Z$  — конечный набор состояний клеток;

$N$  — конечное множество, определяющее окрестность клетки ( $|N|$  — число соседних клеток, которые влияют на состояние данной клетки);

$f$  — правила клеточного автомата, соответствующие математической функции переходов  $Z \times C \times (Z \times C)^{|N|} \rightarrow Z \times C$ , где  $C \subset M$ .

Отметим аналогию между клеточным автоматом с метками и понятием памяти в тьюринговых машинах [14]. Головка тьюринговой машины может хранить некоторое конечное число данных, которые используются в правилах автомата машины для изменения ленты или передвижения головки.

Клеточный автомат является примером системы, которая решает сложные задачи на основе простых локальных правил. К сожалению, не все задачи поддаются решению лишь одним клеточным автоматом. Для решения может потребоваться набор (последовательность) клеточных автоматов, каждый из которых будет решать специализированную подзадачу.

Набор клеточных автоматов — это совокупность клеточных автоматов, связанных единой метрикой поля и одинаковым набором состояний клеток, но имеющих разный набор правил переходов. В наборе должны быть введены дополнительные правила:

- правила очередности запуска клеточных автоматов (при этом каждый следующий клеточный автомат начинает работу на поле, которое было сформировано предыдущим клеточным автоматом);

- правила завершения работы каждого автомата, которые могут иметь вид: работа клеточного автомата может ограничиваться числом итераций, клеточный автомат может функционировать до выполнения определенного условия или

завершаться, когда применение правил автомата не изменяет состояние поля.

Набор клеточных автоматов может содержать не только сами клеточные автоматы, но и управляющие элементы — операторы переходов и циклов, условные операторы и т. д. Управление запуском клеточных автоматов и управляющих элементов может осуществляться на основе конечных автоматов [15].

### Выделение признаков символов

Существует несколько подходов к процессу идентификации (распознаванию) символов. Можно работать с изображением символа как единым объектом или выделять некоторые базисные характеристики, которые легче поддаются исследованию. Структурный подход [16, 17] используется при выделении характеристик и признаков из изображений. В данной работе в рамках структурного подхода предлагается выделять структурные признаки изображений символов с помощью клеточных автоматов. При этом предлагается выделять следующие признаки: расположение концов отрезков, из которых состоит изображение символа; положение замкнутых контуров; места пересечений отрезков. В общем случае для распознавания образов или текстов с различных языков такого числа признаков может быть недостаточно [16], однако настоящая работа не ставит перед собой задачу показать все возможные признаки изображений, основной упор здесь делается на простоту их извлечения. Для задач распознавания русскоязычных символов данных признаков в большинстве случаев оказывается достаточно (существует зависимость от сложности стилей, применяемых к тексту).

Для того чтобы выделить подобные признаки, введем понятие распространения волны. Волна определяется как итерационный процесс распространения меток от одних клеток (точек) к соседним. Предлагается пускать волну по точкам изображения символа.

Волна состоит из *фронта* (точек, помеченных специальной меткой фронта волны) и *шлейфа* (точек, помеченных специальной меткой шлейфа волны, которая присваивается точке с меткой фронта волны на следующей итерации). Метка обработанных точек выставляется для тех точек изображения, в которых в предыдущие итерации выставлялись метки фронта и шлейфа волны. Метки фронта волны, шлейфа волны и обработанных точек не могут присутствовать на одной клетке одновременно.

В процессе распространения волна, начинаясь с некоторой позиции, обходит все изображение

символа и угасает на его концах или при встрече с другой волной. Реализация идеи распространения волны сводится к циклическому процессу вида, представленного на рис. 1:

- в начальный момент выделяется точка изображения символа и ей присваивается метка фронта волны (существует некоторая корреляция между расположением результирующих признаков символов и способом выделения начальной точки распространения волны, поэтому предлагается использовать единую стратегию для всех символов с целью уменьшить данный эффект, например выделять крайнюю верхнюю точку или верхнюю среднюю точку, если их несколько);
- первый шаг цикла включает замену всех меток шлейфа волны для точек изображения на метки обработанных точек;
- все точки с метками фронта волны изменяют метку на метку шлейфа волны;
- всем точкам изображения символа без меток, соседствующим (по фон Нейману [8]) с любыми точками с метками, присваиваются метки фронта волны;
- цикл повторяется.

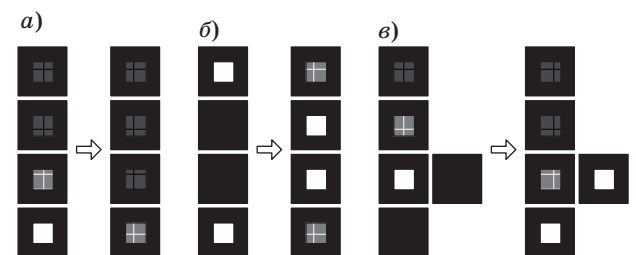
Для выделения структурных признаков символов фиксируются моменты встречи волн, угасания волн на концах изображения символа и моменты их разделения на части:

- момент угасания волны определяется, когда у группы смежных точек с метками шлейфа волны отсутствует по соседству точка с меткой фронта волны (рис. 2, а);
- момент встречи двух волн определяется, когда точки с метками шлейфа волны разделены точками с метками фронта волны (рис. 2, б);



Метки: □ — фронт волны  
 ■ — шлейф волны  
 ■ — обработанные точки

■ Рис. 1. Этапы итерационного процесса распространения волны по точкам изображения



■ Рис. 2. Процесс распространения волн в ситуациях: а — угасания волны на конце символа; б — встречи двух волн; в — разделения волны на части

• момент разделения волны на части определяется, когда точки с метками фронта волны разделены точками с метками шлейфа волны (рис. 2, в).

На основе информации о расположении точек, в которых волна угасает, разделяется на части или встречается с другими волнами, можно судить о расположении структурных признаков символов.

### Алгоритмы выделения признаков символов

Для реализации процесса выделения признаков символов предлагается использовать набор клеточных автоматов с метками. При этом в качестве базовой используется идея распространения волны. Выделенные в ходе распространения волны позиции (позиции угасания волны, встречи волн и разделение волны) интерпретируются алгоритмом как признаки изображения символа:

- конец символа определяется местом угасания волны;
- пересечение отрезков символа — это место раздвоения волны на части;
- петли в символе определяются позициями встречи волн.

Таким образом, алгоритм по выделению признаков символов будет следующим:

<Пометить точку изображения символа меткой фронта волны>

<Итерироваться до момента полного угасания волны>

Начало итерации

<Заменить метку шлейфа волны на метку обработанных точек>

<Заменить метку фронта волны на метку шлейфа волны>

<Выставить для необработанных точек, граничащих с помеченными точками, метку фронта волны>



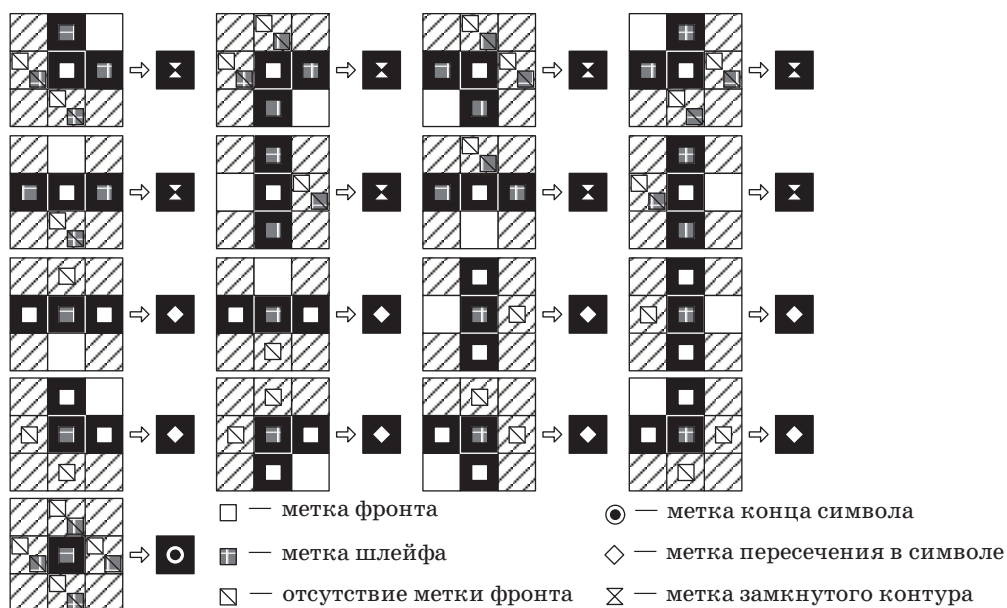
■ Рис. 3. Правила клеточного автомата с метками, осуществляющего распространение волны по точкам изображения символа

- <Проверить наличие точек с меткой шлейфа волны, не граничащих с точками фронта волны, в случае нахождения выделить конец символа>
- <Проверить наличие точек шлейфа волны, разбитых точками фронта волны, в случае нахождения выделить место встречи волн>
- <Проверить наличие точек фронта волны, разбитых точками шлейфа волны, в случае нахождения выделить место разделения волны на части>

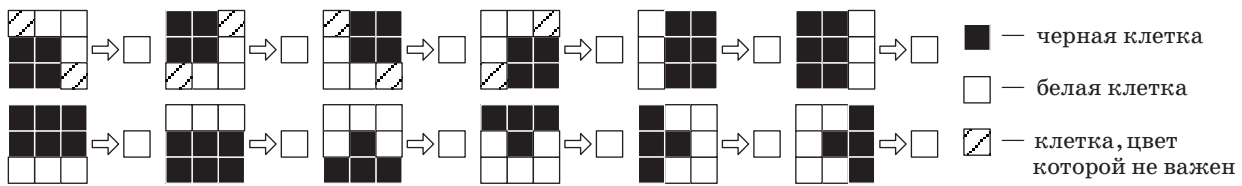
Конец итерации

Правила клеточного автомата с метками, осуществляющего распространение волны по точкам изображения символа, показаны на рис. 3.

Правила клеточного автомата с метками, выделяющего места угасания, встречи и разделения волн, показаны на рис. 4.



■ Рис. 4. Правила клеточного автомата с метками, выделяющего места угасания, встречи и разделения волн



■ Рис. 5. Правила циклического клеточного автомата по уточнению символов

Отметим одну особенность распространения волн: две волны, распространяющиеся из одной точки дискретной области, могут прийти в другую точку изображения лишь одновременно. Доказательством этого может служить тот факт, что область, которую огибают волны в процессе распространения, имеет четное число соседних (в смысле Мура [8]) клеток. Поэтому волны, проходя по разным путям и имеющие одну скорость распространения, могут пройти только одинаковое расстояние до точки. Таким образом, можно считать корректными правила клеточного автомата, определяющие встречу волн.

Основной недостаток предложенного алгоритма — это возможность появления лишних поддельных признаков для изображения символов. Данное событие может случиться из-за особенностей начертания символов, что обеспечит, например, выделение несуществующих концов символа.

Это можно решить следующим образом. Перед началом распространения волны необходимо уточнить изображение, уменьшить толщину отрезков, из которых состоит символ, до толщины в одну точку (клетку). Данную задачу можно выполнить с помощью алгоритма, предложенного Чжаном (Т. Y. Zhang) и Суэнем (С. Y. Suen) [5], или используя алгоритм постепенного уточнения отрезков символов на основе циклического клеточного автомата [18]. Правила клеточного автомата для данной операции представлены на рис. 5.

Использование алгоритма выделения признаков символов после предварительного уточнения изображения позволяет получить более точные позиции признаков символа на изображении. Уточненные линии символа получены удалением лишних точек со всех сторон. Полученное скелетное представление является набором центральных линий исходного изображения символа, а следовательно, выделенные признаки позиционируются более точно.

Структурная схема связи клеточных автоматов, реализующих работу алгоритма по выделению признаков символов, показана на рис. 6.

Исследование характеристик представленных алгоритмов проводилось на нескольких наборах изображений русских символов как печатных,

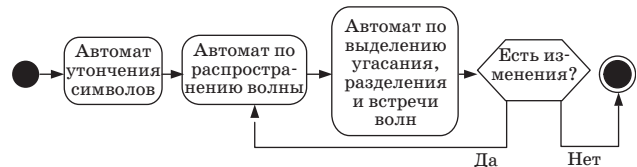
так и рукописных. В целом, алгоритмы показывают хороший результат и позволяют выделять характерные признаки изображений символов точно. При этом возможны некоторые несоответствия в выделенных признаках для различных шрифтов, например, между шрифтами с засечками и без них. Более точные результаты показывает алгоритм, включающий предварительное уточнение изображения символа.

Пример выделенных признаков представлен на рис. 7.

Основные недостатки алгоритмов, как собственно всех структурных методов, — необходимость четкого определения границ изображения символа, и как следствие — подверженность влиянию шумов.

Достоинством структурных методов являются устойчивость к сдвигу, масштабированию, повороту символа на небольшой угол и к возможным искажениям и различным стиливым вариациям шрифтов.

Кроме того, реализация на основе клеточных автоматов позволяет распараллелить механизм



■ Рис. 6. Структурная схема связи клеточных автоматов, реализующих алгоритм выделения структурных признаков символов



■ Рис. 7. Выделение признаков с помощью клеточных автоматов с метками на примере буквы «А» в различных стилях без предварительного уточнения изображения (а) и с уточнением изображения (б)

выделения признаков, руководствуясь простыми правилами без вычислений с плавающей точкой. Производительность системы во многом зависит от размеров изображения, которое поступает на вход набора клеточных автоматов, и от размеров и толщины линий изображенных символов. Введение алгоритмов объединения точек изображения и кэширования может помочь уменьшить влияние размеров на производительность. В таблице представлены показатели качества и производительности алгоритма для разных входных изображений символов.

Результат выделения признаков может быть использован в системе распознавания текста для дальнейшей классификации изображений символов. В процессе исследования качества и достаточности выделения структурных признаков символов из изображений на основе клеточных автоматов была создана тестовая среда, которая классифицирует выделяемые признаки с помощью шаблонного метода.

Шаблоны признаков были выделены из изображений алфавита русского языка за исключением букв «е», «й» и «ы», так как они состоят из нескольких отдельно записанных элементов, что должно анализироваться другой системой. Данные шаблоны сравнивались с признаками тестовых

изображений текстов. Сравнение распознаваемых изображений символов с шаблонными производилось на основе анализа смещений выделенных признаков между этими изображениями. Пример этапов распознавания показан на рис. 8.

Анализ полученных данных позволил сделать вывод, что выделенные признаки в целом дают возможность корректно классифицировать изображения символов. Основные ошибки распознавания связаны с наличием минимальных отличий между схожими символами. Выделенные признаки данных символов показаны на рис. 9.

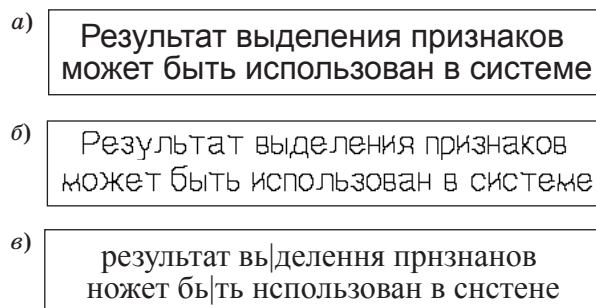
Решение задачи по различению изображений схожих символов решается с помощью учета взаимного расположения выделенных признаков. Для символов, представленных на рис. 9, данное условие позволит решить проблему корректной идентификации. Дополнительным способом правильной идентификации символов может служить морфологический разбор распознанных текстов.

В целом анализ выделенных признаков для разных групп символов и разных шрифтов показал:

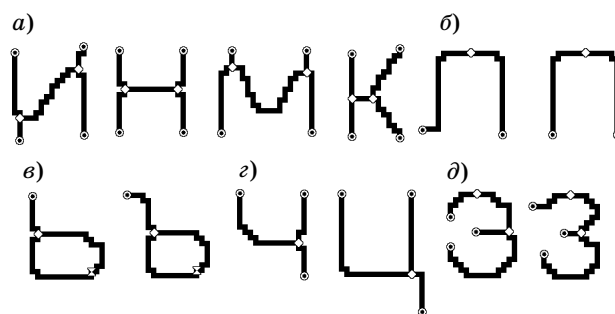
- шрифты с засечками и без засечек формируют разные наборы признаков;

■ Показатели качества и производительности алгоритма выделения признаков

| Описание изображения                                 | Время работы алгоритма, с | Ошибки при выделении признаков                            |
|------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Рукописный символ «а», 50 × 50                       | 0,1                       | Без ошибок                                                |
| Русский алфавит, 450 × 50, шрифт Arial               | 1,6                       | Две ошибки, ошибочно выделены признаки для букв «б» и «ж» |
| Русский алфавит, 600 × 60, шрифт Arial               | 2,8                       | Одна ошибка, ошибочно выделен признак для буквы «ж»       |
| Русский алфавит, 600 × 60, шрифт Times New Roman     | 3,4                       | Две ошибки, ошибочно выделены признаки для букв «х» и «ь» |
| Текст, 600 × 70, шрифт Times New Roman, 57 символов  | 2,5                       | Некорректно выделены признаки в букве «м»                 |
| Текст, 900 × 40, шрифт Arial полужирный, 57 символов | 2,5                       | Две ошибки, ошибочно выделены признаки для букв «е» и «к» |
| Текст, 900 × 40, шрифт Arial курсив, 57 символов     | 2,4                       | Две ошибки, ошибочно выделены признаки для букв «е» и «к» |



■ Рис. 8. Начальный (а), промежуточный (б) и конечный (в) вид данных процесса распознавания текста, построенного на предварительном выделении структурных признаков изображений символов



■ Рис. 9. Выделенные признаки схожих символов: «и», «н», «м» и «к» (а); «л» и «п» (б); «ь» и «ы» (в); «ч» и «ц» (г) и «э» и «з» (д)

- использование полужирных шрифтов и шрифтов с наклонами в меньшей степени влияет на результат выделения признаков;
- выделенные признаки не могут позволить однозначно идентифицировать символы, поэтому в системах распознавания текста требуются различные инструменты по анализу изображений;
- алгоритм выделения признаков эффективнее работает на утонченных изображениях символов.

## Литература

1. Ramos V., Muge F. On Image Filtering, Noise and Morphological Size Intensity Diagrams // 11<sup>th</sup> Portuguese Conf. on Pattern Recognition. Portugal, 2000. P. 483–491.
2. Rastegar R., Rahmati M., Meybodi M. R. A Clustering Algorithm using Cellular Learning Automata based Evolutionary Algorithm // Adaptive and Natural Computing Algorithms: Proc. of the Intern. Conf. in Coimbra. Springer Vienna, 2005. P. 144–150.
3. Ramos V., Muge F. Image Colour Segmentation by Genetic Algorithms // 11<sup>th</sup> Portuguese Conf. on Pattern Recognition. Portugal, 2000. P. 125–129.
4. Фролов А. Б., Четрафилов И. Д. О некоторых подходах к распознаванию оптических образов текстов // Интеллектуальные системы. 1997. Т. 2. Вып. 1–4. С. 189–200.
5. Zhang T. Y., Suen C. Y. A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns. Image Processing and Computer Vision // Communications of the ACM. 1984. Vol. 27. N. 3. P. 236–239.
6. Вершок Д. А. Алгоритмические средства обработки и анализа изображений на основе преобразования Хафа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / БГУ информатики и радиоэлектроники. — Минск, 2002. — 22 с.
7. Нейман Дж. фон. Теория самовоспроизводящихся автоматов. — М.: Мир, 1971. — 382 с.
8. Wolfram S. A New Kind of Science. — Wolfram Media, 2002. — 1192 p.
9. Наумов Л. Решение задач с помощью клеточных автоматов посредством программного обеспечения SAME&L. Ч. I // Информационно-управляющие системы. 2005. № 5. С. 22–30.
10. Наумов Л. Решение задач с помощью клеточных автоматов посредством программного обеспечения

## Заключение

В данной работе предложен метод выделения признаков символов, основанный на идее распространения волны и реализованный на основе теории клеточных автоматов. Представленные алгоритмы показывают хорошие результаты как по характеристикам качества, так и производительности. Результаты работы могут быть использованы в системах распознавания текста.

- SAME&L. Ч. II // Информационно-управляющие системы. 2005. № 6. С. 30–38.
11. Ganguly N. et al. Evolving Cellular Automata Based Associative Memory for Pattern Recognition // Lecture Notes In Computer Science. London: Springer-Verlag, 2000. Vol. 2228. P. 115–124.
  12. Oliveira C. C., Oliveira P. P. An Approach to Searching for Two-Dimensional Cellular Automata for Recognition of Handwritten Digits // Lecture Notes In Artificial Intelligence. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. Vol. 5317. P. 462–471.
  13. Pradipta M., Sikdar B. K., Chaudhuri P. P. Cellular Automata Evolution for Pattern Classification // Lecture Notes in Computer Science. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. Vol. 3305. P. 660–669.
  14. Хопкрофт Д., Мотвани Р., Ульман Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений. — М.: Вильямс, 2002. — 528 с.
  15. Шальто А. А. Switch-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. — СПб.: Наука, 1998. — 628 с.
  16. Фу К. Структурные методы в распознавании образов. — М.: Мир, 1977. — 320 с.
  17. Абламейко С. В., Берегов Б. С., Бокуть Л. В. Исследование структурного строения изображений на основе принципа симметрии // Цифровая обработка изображений: Сб. науч. тр. / Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси. Минск, 1997. Вып. 1. С. 5–14.
  18. Суясов Д. И. Утончение изображений символов на основе клеточных автоматов // VI Всерос. межвуз. конф. молодых ученых: Сб. тр. / СПбГУ ИТМО, 2009. <http://fpro.ifmo.ru/kmu/kmu6/oleg-25.html> (дата обращения: 15.12.2009).