

УДК 004.021

**В. А. Болтенков**, канд. техн. наук,  
**Нгуен Гуи Кионг, Д. В. Малявин**

### **АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ СКЕЛЕТИЗАЦИИ БИНАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

***Аннотация.** Исследованы алгоритмы построения скелетов бинарных изображений. Проведены обзор и классификация существующих алгоритмов скелетизации. Алгоритмы исследованы с точки зрения качества построения скелета и быстродействия. Введены количественные показатели качества получаемого скелета. Исследованные алгоритмы практически реализованы в системе двигательной реабилитации. Установлено, что для подобных систем может быть рекомендован алгоритм Жанг-Суена, сочетающий работоспособность в реальном времени с высокими показателями качества.*

***Ключевые слова:** бинарное изображение, алгоритмы скелетизации, быстродействие, реальный масштаб времени, системы двигательной реабилитации*

**V. A. Boltenkov**, PhD.,  
**Nhuen Hui Kionh, D.V. Maljavin**

### **ANALYSIS OF SKELETONIZATION ALGORITHMS' FOR BYNARY IMAGES**

***Abstract.** Binary images skeletons constructing algorithms have been studied. A review and classification of existing skeletonization algorithms has been performed. Algorithms are studied in terms of quality and speed of skeleton construction. The quantitative quality criteria of the skeleton were introduced. The studied algorithms has been implemented in motor rehabilitation system. It was found that Zhang-Suen's algorithm can be recommended for such systems. It combines performance in real time with high quality of skeleton.*

***Keywords:** binary image, skeletonization algorithms, computing speed performance, real-time system, motor rehabilitation*

**В.О. Болтъонков**, канд. техн. наук,  
**Нгуен Гуи Кионг, Д. В. Малявин**

### **АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ СКЕЛЕТИЗАЦІЇ БІНАРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ**

***Анотація.** Досліджено алгоритми побудови скелетів бінарних зображень. Проведено огляд і класифікація існуючих алгоритмів скелетизації. Алгоритми досліджені з точки зору якості побудови скелета та швидкодії. Введені кількісні показники якості одержуваного скелета. Досліджені алгоритми практично реалізовані в системі рухової реабілітації. Встановлено, що для подібних систем може бути рекомендований алгоритм Жанг-Суена, що поєднує працездатність в реальному часі з високими показниками якості.*

***Ключові слова:** бінарне зображення, алгоритми скелетизації, швидкодія, реальный масштаб часу, системи рухової реабілітації*

**Введение.** В рамках общей тенденции интенсивного развития систем технического зрения наблюдается большой интерес к развитию и применению алгоритмов скелетизации изображений. Скелетизация или построение срединных линий (скелетов) объектов на изображениях является важным этапом во многих практических задачах описания и распознавания объектов в системах технического зрения. В качестве примеров укажем задачи распознавания рукописных текстов [1, 2], обработки картографических изображений, технических чертежей, печатных плат [3], биометрии и высокоточной дактилоскопии [4].

Особый интерес к скелетизации наблюдается в медицинских компьютерных технологиях, где скелеты применяются для аннотирования баз диагностических изображений, улучшения качества ангиограмм и томограмм. В работах [5 – 6] рассмотрены методы дистанционной двигательной реабилитации пациентов, где ключевой процедурой является покадровое построение скелета изображения тела в видеопотоке.

Далее на полученном скелете находятся характерные точки, производится их трассировка, сравнение движения с эталонным и выдаются рекомендации пациенту по коррекции движения. Особыми требованиями к алгоритмам построения скелетов в таких системах является быстродействие, сочетаемое с достаточным качеством.

© Болтенков В. А., Нгуен Гуи Кионг,  
Малявин Д. В. 2015

Авторы [7] считают, что на сегодняшний день предложено более 300 различных алгоритмов скелетизации, только в англоязычных наукометрических базах сегодня аннотировано более 1000 публикаций по алгоритмам скелетизации. Несмотря на такое количество публикаций по проблемам скелетизации, включая обстоятельные обзоры, отсутствуют работы, позволяющие выбрать оптимальный алгоритм построения скелета по указанным выше критериям.

**Целью данной работы** является выбор эффективного алгоритма построения скелета бинарного изображения, пригодного для работы в реальном масштабе времени при анализе видеопотока. Алгоритм должен обеспечивать качество получаемого скелета по определенным количественным критериям (отсутствие ложных ветвей скелета и отсутствие нарушений сплошности). Для достижения цели решены следующие задачи:

- систематизация и анализ существующих алгоритмов скелетизации,
- практическая реализация эффективных алгоритмов с целью оценки их реального быстродействия и качества,
- выбор алгоритма, удовлетворяющего критериям максимального быстродействия и требуемого качества.

### Основные определения и концепции

Понятие скелета или срединной оси плоской фигуры было впервые введено в конце 60-х годов 20 в. Бламом [8]. Блам показал, что медиальное представление фигур (англ. *medial representation*) на двумерных изображениях, является эффективным способом описания их геометрической структуры. По сравнению с традиционным представлением формы медиальное представление является более информативным, оно отражает как общую структуру объекта, так и детальную структуру его элементов. Скелет сохраняет информацию о топологической структуре объекта и сокращает объем памяти, необходимой для ее хранения. Согласно Бламу скелет (англ. *skeleton*) плоской фигуры – это множество тех ее точек, для которых существует не менее двух равноудаленных ближайших точек границы фигуры.

Из этого следует, что каждая точка скелета является центром окружности, лежащей

в области и касающейся ее границы в двух или более точках (так называемой максимальной пустой окружности), а скелет – это множество центров максимальных вписанных в эту фигуру окружностей.

Правильно построенный скелет имеет следующие свойства:

- сохраняет топологию оригинального объекта;
- расположен в центральных точках геометрической области объекта;
- скелет есть связная фигура, т.е. все пиксели скелета связаны друг с другом;
- имеет ширину равную 1 пикселю (поэтому ряд процедур скелетизации называется утоньшением или тиннингом, от англ. *thinning*);
- для каждого пикселя скелета известно расстояние до границы объекта.

Анализ многочисленных существующих публикаций позволил построить классификацию существующих алгоритмов скелетизации, которая приведена на рис. 1.

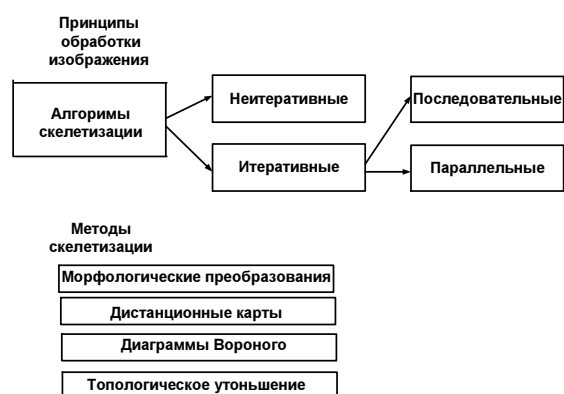


Рис. 1. Классификация алгоритмов скелетизации

Неитеративные алгоритмы скелетизации основаны на построении центральной линии изображения непосредственно в один проход без анализа всех отдельных пикселей.

Самая большая группа алгоритмов, это итеративные – основаны на идее итеративного удаления контурных точек объектов до тех пор, пока на изображении останутся только точки скелета. Итеративные алгоритмы обычно используют логическую маску (как правило, размером 3 на 3 пикселя), которые перемещаются по всему изображению и в каждый момент времени сопоставляются с соответствующим участком изображения, чтобы определить новое значение центрального пикселя.

Таким образом, в результате просмотра всего изображения удаляется один (или несколько) из внешних слоев объекта. Количество просмотров изображения и как следствие время работы итеративных алгоритмов, зависит от размера объектов на изображении. Алгоритмы данной группы можно разделить на два класса: параллельные и последовательные. В параллельных алгоритмах логическое окно располагается одновременно во всех пикселях изображения и при его обработке не используются новые (полученные на данной итерации) значения пикселей. При работе последовательных алгоритмов пиксели обрабатываются последовательно. При реализации параллельных алгоритмов для их корректной работы, обработанные данные (информация об удаленных пикселях) должны заноситься в отдельный массив, который предохраняет от возможности рекурсивного удаления пикселей.

Рассмотрим классификацию алгоритмов построения скелета с методологической точки зрения.

Все методы скелетизации базируются на нескольких основных концепциях:

- морфологические преобразования,
- обнаружения максимумов в дистанционных картах граничных точек;
- расчет диаграммы Вороного для фигуры, образованной граничными точками;
- послойное удаление пикселей, начиная с границы фигуры до образования фигуры толщиной в один пиксель.

Морфологические преобразования.

Скелет по Бламу наглядно иллюстрируется примером «пожара в прерии». Предполагается, что по границе объекта одновременно вспыхивает огонь, который распространяется внутри нее по всем направлениям с постоянной скоростью. Те точки области, в которых сходятся два или более огненных фронта, являются по определению точками скелета. Практически Блам реализовал скелетизацию как медиальное осевое преобразование (англ. *Medial Axis Transform (MAT)*). Дальнейшее развитие идеи Блама получили в работах [9] Serra J., где изложена парадигма анализа изображений, получившая название математической морфологии изображений, основанная на нелинейных операторах,

традиционно описываемых в теоретико-множественном формализме. Согласно морфологической концепции скелетизация выполняется как последовательное выполнение процедур эрозии и дилатации (т.е. послойного монопиксельного утоньшения и наращивания объекта на изображении).

Скелетизация на базе дистанционных карт выполняется в три этапа.

1. Бинарное изображение разделяется на характерные и нехарактерные пиксели, в характерные пиксели принадлежат границе (контуру) объекта.

2. Генерируется дистанционная карта, каждый элемент которой указывает для каждого пикселя расстояние до ближайшего характерного элемента.

3. Локальные экстремумы дистанционной карты определяются как скелетные точки.

Поскольку дистанционная карта строится на расстояниях, измеряемых не в евклидовой метрике (обычно в манхэттенской или шахматной метрике) получаемые с использованием разных расстояний скелеты могут существенно различаться. Трудоемкость метода дистанционных карт оценивается как  $O(N)$ , где  $N$  – количество пикселей объекта. Этот метод не гарантирует топологической корректности скелета.

Скелетизация на основе диаграмм Вороного. Напомним, что диаграммой Вороного конечного множества точек  $S$  на плоскости называется такое разбиение плоскости, при котором каждая область этого разбиения образует множество точек, более близких к одному из элементов множества  $S$ , чем к любому другому элементу множества. Если плотность граничных точек объекта стремится к бесконечности, то соответствующая диаграмма Вороного сходится к скелету. Вычислительная сложность метода с построением диаграммы Вороного оценивается как  $O(N^2 \log N)$ . Наиболее детально это направление скелетизации развито в работах научной школы Местецкого [10].

Методы топологического утоньшения строят скелет путем последовательного удаления пикселей границы объекта до тех пор, пока не будет получена необходимая толщина скелета в один пиксель. Все утоньшаю-

щие алгоритмы основываются на понятии «простой» точки. «Простая» точка – это пиксель, который может быть удален без изменения топологии объекта. Важное свойство «простых» точек состоит в том, что они могут быть определены локально, то есть путем анализа локальной окрестности, что делает алгоритмы топологического утоньшения более эффективными.

Процесс утоньшения начинается от границы объекта и продолжается до тех пор, пока не останется «простых» точек. На каждой итерации, каждый граничный пиксель проверяется на принадлежность множеству «простых» точек. Условия обычно реализованы как логические шаблоны (маски) размера 3\*3 пикселя или более. Центр маски совмещается с рассматриваемым пикселем, анализируется окрестность этого пикселя. В случае выполнения логических условий маски центральный пиксель удаляется. Осново-полагающей работой в направлении алгоритмов утоньшения является статья Розенфельда [11]. Основная масса современных алгоритмов скелетизации – это различные варианты топологического утоньшения.

#### **Некорректность задачи скелетизации. Дефекты скелета. Показатели качества**

В работе [12] показано, что скелетизация – это некорректная задача по Адамару. Небольшие нерегулярности в границе фигуры, связанные с зашумленностью исходного изображения, практически незаметные глазом, приводят к появлению ложных или «шумовых» ветвей скелета. Для устранения ложных ветвей разработаны процедуры его регуляризации (иногда такая процедура называется «стрижкой» скелета, англ. *pruning*) [13].

Простая процедура регуляризации выглядит так:

1) по скелету восстанавливается исходное изображение и высчитывается его площадь  $S_0$ ;

2) выбирается  $i$ -я ветвь скелета, которая одним концом соединена с другой ветвью, а другим нет, т. е. рассматривается внешняя ветвь;

3) рассчитывается площадь фигуры без выбранной ветви  $S_i$ , которая всегда будет

находиться внутри восстановленного изображения, и всегда  $S_0 > S_i$  для любого  $i$ ;

4) *если*  $S_0 - S_i < Thresh$ , где  $Thresh$  – пороговая величина, то ветвь  $i$  удаляется из скелета;

5) *если* остались нерассмотренные ветви – переход к п. 2), *иначе* конец алгоритма.

Опыт работы авторов и совпадающие с ним результаты работы [13] показывают, что временная трудоемкость операции регуляризации скелета примерно в 3–5 раз выше, чем трудоемкость самой процедура скелетизации. Поэтому регуляризацию скелета следует считать неприемлемой для систем реального времени. С этой точки зрения количество порожденных в процессе скелетизации является первым показателем качества алгоритма скелетизации.

Введем показатель качества

$$K_1 = \frac{\sum_{i=1}^F length_i^{false}}{Length_0},$$

где  $F$  – число ложных ветвей скелета;  $length_i^{false}$  – длина  $i$ -й ложной ветви скелета,  $Length_0$  – общая длина скелета.

Здесь все длины измеряются непосредственно в пикселях без перехода к линейным единицам. Наиболее эффективным следует считать алгоритм с минимальным показателем  $K_1$ .

Другим дефектом алгоритмов скелетизации является нарушение связности скелета, которое имеет место при нерегулярности границ фигуры. Несмотря на то, что по определению каждый пиксель скелета (кроме граничных точек и точек ветвления) должен иметь 2 соседних пикселя, практика показывает, что часто происходят разрывы связности, выражающиеся в получении «белой» точки вместо «черной». Разрывы связности могут быть достаточно длинными. С этой точки зрения введем второй показатель качества алгоритма

$$K_2 = \frac{\sum_{i=1}^W length_i^{white}}{Length_0},$$

где  $W$  – количество разрывов скелета;

$length_i^{white}$  – длина  $i$ -го разрыва скелета.

Наиболее эффективным следует считать алгоритм с минимальным показателем  $K_2$ .

**Практическая реализация. Сравнение алгоритмов.**

Были практически реализованы 5 алгоритмов скелетизации, являющихся наиболее популярными по данным литературных источников:

1) Морфологическая скелетизация с последовательным применением процедур эрозии и дилатации [14].

2) Алгоритм Жанга-Суена [15] – это итеративный параллельный алгоритм, работающий с логической маской размера 3\*3 и состоящий из 2 итераций. Алгоритм сохраняет связность полученного скелета.

3) Алгоритм Гуо-Холла [16] – тоже итеративный и последовательный, также состоящий из 2 итераций, но на каждой итерации применяется своя логическая маска.

4) Алгоритм Стентифорда [17] – относится к итеративным параллельным алгоритмам. Число итераций - 4, алгоритм использует различных логических маски размером 3\*3.

5) Алгоритм Щепина-Непомнящего [18]. Этот алгоритм не относится к группе популярных параллельных алгоритмов скелетизации, является последовательным. Алгоритм полностью сохраняет 8-и кратную связность исходного изображения, причем для анализа каждой точки (с целью возможного удаления точки с сохранением связности и для выбора направления перехода) в каждый момент требуется знание, только окрестности пикселя 3\*3.

Перечисленные алгоритмы были реализованы на языке C++ с использованием библиотеки OpenCV [19]. В качестве исходного изображения для обработки были использованы кадры из видеопотока изображения движений человека размером 640\*480 пикселей, полученные с помощью бытовой веб-камеры. Скелетизация изображений с помощью программы проводилась на компьютере с характеристиками: операционная система – Ubuntu 12.04, процессор Intel (R) Core(TM)2 CPU 4400 @2.00GHz, ОЗУ – 2 Гб, видеокарта: ATI Radeon HD 2600 XT.

Пример результатов скелетизации приведены на рис. 2.

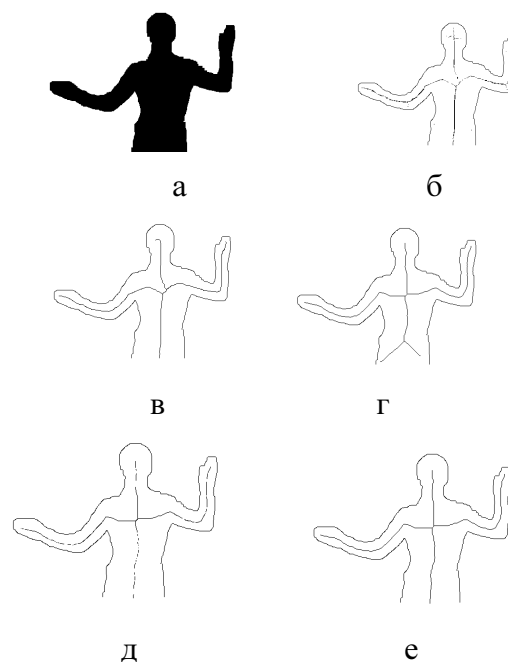


Рис. 2. Пример работы алгоритмов скелетизации: а – исходное бинаризованное изображение; б – морфологический скелет; в – скелет по Жанг-Суену; г – скелет по Гуо-Холлу; д – скелет по Розенфельду, е – скелет по Щепину

Результаты расчета показателей качества и быстродействия алгоритмов приведены в таблице 1.

1. Сравнительный анализ показателей качества алгоритмов скелетизации

Применяемый алгоритм	Время счета, мс	$K_1$	$K_2$
1. Морфология	36	0,07	0,34
2. Жанг-Суен	526	0,15	0,92
3. Гуо-Холл	663	0,24	0,93
4. Стентифорд	224	0,06	0,25
5. Щепин	2350	0,06	0,98

Анализ рис. 2 и табл. 1 позволяет установить следующие результаты. Быстродействующие алгоритмы (1 и 4) создают скелет неудовлетворительного качества по коэффициенту  $K_2$ , т.е. скелет имеет большое количе-

ство разрывов. Алгоритм Гуо-Холла порождает заметные ложные ветви скелета и требует дальнейшей регуляризации. Алгоритм Щепина создает качественный скелет, но не может быть реализован в реальном масштабе времени. Алгоритм Жанг-Суена, хотя и уступает алгоритму Щепина по качеству скелета, требует для своего осуществления времени на экономичной вычислительной платформе времени порядка 0,5 с. Поэтому этот алгоритм является компромиссным вариантом и может быть рекомендован для применения в системах дистанционной двигательной реабилитации, работающих в режиме, близком к реальному времени.

Полученные закономерности сохраняются для обработанных 340 изображений из базы данных системы двигательной реабилитации.

Все рассмотренные алгоритмы были применены в действующем прототипе системы двигательной реабилитации [6]. Алгоритм Жанг-Суена выбран в качестве основного.

#### **Выводы и направления дальнейших исследований**

В результате исследования проведен анализ и классификация существующих алгоритмов скелетизации бинарных изображений. Алгоритмы рассмотрены с точки зрения применения их в системах двигательной реабилитации пациентов с болезнями опорно-двигательного аппарата. Установлены возможные дефекты, возникающие при скелетизации, и определены критерии для оценки качества получаемого скелета. Путем программной реализации с применением системы OpenCV промоделированы пять наиболее популярных алгоритмов. Эффективность алгоритмов оценена по критериям качества получаемого скелета и быстродействию. В качестве основного алгоритма скелетизации для применения в системах двигательной реабилитации рекомендован алгоритм Жанг-Суена.

Поскольку быстродействие выбранного алгоритма на выбранной экономичной платформе все равно не удовлетворяет требованиям истинного реального времени, в качестве направления дальнейших исследований рассматривается переработка архитектуры системы дистанционной двигательной ре-

билитации в клиент-серверную. При этом экономичная платформа пациента рассматривается как «тонкий» клиент, а вычислительно емкие процедуры скелетизации и вторичной обработки изображений выполняются на удаленном сервере с достаточными вычислительными мощностями.

#### **Список использованной литературы**

1. Канунова Е. Е. Методы и алгоритмы реставрации изображений архивных текстовых документов [Текст] / Е. Е. Канунова, А. А. Орлов, С. С. Садыков. – М. : Мир. – 2006. – 135 с.

2. Афонасенко А. В. Обзор методов распознавания структурированных символов [Текст] / А. В. Афонасенко, А. И. Елизаров // Доклады ТУСУРа. – Томск : – 2008. – Вып. 2 (18). – С. 83 – 88.

3. Инютин А. В. Алгоритм поиска и классификации дефектов топологии печатных плат [Текст] / А. В. Инютин // Штучний інтелект. – 2011. – Вип. 3. – С. 228 – 237.

4. Гудков В. Ю. Быстрая обработка изображений отпечатков пальцев [Текст] / В. Ю. Гудков, М. В. Боков // Информатика и ее применения. – 2012. – Вып. 1. – С. 99 – 107.

5. Нгуен Г. К. Применение систем компьютерного зрения в задачах реабилитации пациентов с болезнями опорно-двигательного аппарата [Текст] / Г. К. Нгуен // Труды МНТК «Современные информационные и электронные технологии «СИЭТ–2013»» – Одесса : Политехперіодика. – 2013. – Т. 1. – С. 53 – 54.

6. Нгуєн Гуї Кіонг. Принципи побудови комп'ютерних систем дистанційного тренування на основі аналізу відеопотоку [Текст] / Нгуєн Гуї Кіонг, В.О Болтъонков, Д. В. Малявін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков : Технологический центр. – 2014. – № 5/2 (71). – С. 25 – 33.

7. Waleed Abu-Ain, Siti Norul Huda Sheikh Abdullah, Bilal Bataineh, Tarik Abu-Ain, and Khairuddin Omar, (2013), Skeletonization Algorithm for Binary Images, *Procedia Technology*, Vol. 11, pp. 704 – 709.

8. Blum H., (1967), A Transformation for Extracting new Descriptors of Shape, *Models*

*for the Perception of Speech and Visual Form*, Cambridge, MA. *MIT Press*, pp. 362 – 380.

9. Serra J., (1982), *Image Analysis and Mathematical Morphology*, London-New York, *Academic Press*, 485 p.

10. Местецкий Л. М. Непрерывная морфология бинарных изображений. Фигуры. Скелеты. Циркуляры / Л. М. Местецкий. – М. : ФИЗМАТЛИТ. – 2009. – 287 с.

11. Rosenfeld A., and Pfalz J.L., (1967), Computer Representation of Planar Regions by their Skeletons, *Communications of ACM*, Vol.10, No. 2, pp. 119 – 125.

12. Домахина Л. Г. Регуляризация скелета для задачи сравнения формы [Текст] / Л. Г. Домахина // Математические методы распознавания образов: доклады XIV Всерос. конф. – М. : – 2009. – С. 342 – 346.

13. Рогов А. А. Некоторые методы классификации и поиска в электронной коллекции графических документов [Текст] / А. А. Рогов, К. А. Рогова, П. В. Кириков, М. Ю. Быстров // Труды 12-й Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции». – Казань : – 2010. – С. 409 – 414.

14. Soille P., (1999), *Morphological Image Analysis*, Berlin, *Springer-Verlag*, 434 p.

15. Zhang T.Y., and Suen C.Y., (1984), A fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns, *Communications of ACM*, Vol. 27( 3), pp. 236 –39.

16. Guo Z., and Hall R.W., (1989), Parallel Thinning with two Subiteration Algorithms, *Communications of the ACM*, Vol. 32, Iss. 3, pp. 359 – 373.

17. Stentiford F.W.M., and Mortimer R.G., (1983), Some New Heuristics for Thinning Binary Hand Printed Characters for OCR, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 13, Iss. 1, pp. 81 – 84.

18. Щепин Е. В. К топологическому подходу в анализе изображений [Текст] / Е. В. Щепин, Г. М. Непомнящий // Геометрия, топология и приложения: межвузовский сборник научных трудов. – М. : – Московский институт приборостроения. – 1990. – С. 13 – 25.

19. Open CV [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://opencv.org>. – (Дата доступа – 01.09.2014).

Получено 18.12.2014

## References

1. Kanunova E.E., Orlov A.A., and Sadyikov S.S. Metody i algoritmy restavratsii izobrazheniy arhivnykh tekstovykh dokumentov, [Methods and Algorithms for Image Restoration of Archival Documents], (2006), Moscow, Russian Federation, *Mir Publ.*, 135 p. (In Russian).

2. Afonassenko A.V., and Elizarov A.I. Obzor metodov raspoznavaniya strukturirovannykh simvolov [Review of Methods of Detection of Structured Symbols], (2008), *Doklady TUSURa*, Tomsk, Russian Federation, Vol.2 (18), pp. 83 – 88 (In Russian).

3. Inyutin A.V. Algoritm poiska i klassifikatsii defektov topologii pechatnykh plat [The Search Algorithm and Classification of Defects in PCB Layout], (2011), *Shtuchniy Intelekt*, Donetsk, Ukraine, Vol. 3, pp. 228 – 237 (In Russian).

4. Gudkov V.Yu., and Bokov M.V. Bystraya obrabotka izobrazheniy otpechatkov paltsev [Fast Processing of Fingerprint Images], (2012), *Informatika i ee Primeneniya*, Moscow, Russian Federation, Vol.4, pp.99 – 107 (In Russian).

5. Nguen G.K. Primenenie sistem kompyuternogo zreniya v zadachah reabilitatsii patsientov s bolezniami oporno-dvigatel'nogo apparata [Application of Computer Vision in the Problems of Rehabilitation of Patients with Diseases of the Musculoskeletal System], (2013), *Trudy MNTK "Sovremennyye Informatsionnyye i Elektronnyye Tehnologii SIET-2013"*, Odessa, Ukraine, Vol. 1, pp. 53 – 54 (In Russian).

6. Nhuen Hui Kiong, Boltenkov V.O., and Malyavin D.V. Printsipi pobudovi komp'yuternih sistem distantsiynogo trenuvannya na osnovi analizu videopotoku [Principles of Computer Systems for Remote Training by Analyzing the Video Stream], (2014), *Vostochno-Evropeyskiy Zhurnal Peredovykh Tehnologiy*, Kharkov, Ukraine, Vol. 5/2 (71), pp. 25 – 33 (In Ukrainian).

7. Waleed Abu-Ain, Siti Norul Huda Sheikh Abdullah, Bilal Bataineh, Tarik Abu-

Ain, and Khairuddin Omar, (2013), Skeletonization Algorithm for Binary Images, *Procedia Technology*, Vol.11, pp. 704 – 709.

8. Blum H., (1967), A Transformation for Extracting new Descriptors of Shape, *Models for the Perception of Speech and Visual Form*, MIT Press, pp. 362 – 380.

9. Serra J., (1982), Image Analysis and Mathematical Morphology, London-New York, *Academic Press*, 485 p.

10. Mestetskiy L.M. Nepreryivnaya morfologiya binarnykh izobrazheniy. Figuryi. Skeletyi. Tsirkulyari [Continuous Morphology of Binary Images. Figure. Skeletons. Circularity], (2009), Moscow, Russian Federation, *Fizmatlit Publ.*, 287 p. (In Russian).

11. Rosenfeld A., and Pfalz J.L., (1967), Computer Representation of Planar Regions by their Skeleton, *Comm. of ACM*, Vol.10, pp.119 – 125.

12. Domahina L.G. Regularizatsiya skeleta dlya zadachi sravneniya formy [Regularization of the Skeleton for the Problem of Comparing the Shape], (2009), *Matematicheskie metody Raspoznavaniya Obrazov: Doklady XIV Vseros. Konf.*, Moscow, Russian Federation, pp. 342 – 346 (In Russian).

13. Rogov A.A., Rogova K.A., Kirikov P.V., and Byistrov M.Yu. Nekotorye metodyi klas-sifikatsii i poiska v elektronnoy kolleksii graficheskikh dokumentov, [Some Methods of Classification and Search in the Electronic Collection of Graphic Documents], (2010), *Trudy 12-y Vserossiyskoy Nauchnoy Konferentsii "Elektronnyye Biblioteki: Perspektivnyye Metodyi i Tehnologii, Elektronnyye Kollektii"*, Kazan, Russian Federation, pp. 409 – 414 (In Russian).

14. Soille P., (1999), Morphological Image Analysis, Berlin– Springer-Verlag., 434 p.

15. Zhang T.Y., and Suen C.Y., (1984), A fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns, *Comm. of ACM*, Vol. 27, pp. 236 – 239.

16. Guo Z., and Hall R.W., (1989), Parallel Thinning with two Subiteration Algorithms, *Comm. of the ACM*, Vol. 32, pp. 359 – 373.

17. Stentiford F.W.M., and Mortimer R.G., (1983), Some New Heuristics for Thinning Binary hand Printed Characters for OCR, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 13, pp. 81 – 84.

18. Schepin E. V., and Nepomnyaschiy G. M. K topologicheskomu podhodu v analize izobrazheniy, [On a Topological Approach in Image Analysis], (1990), "*Geometriya, Topologiya i Prilozheniya*", *Mezhvuzovskiy Sbornik Nauchnykh Trudov, Moskovskiy Institut Priborostroeniya Publ.*, Moscow, Russian Federation, pp. 13 – 25 (In Russian).

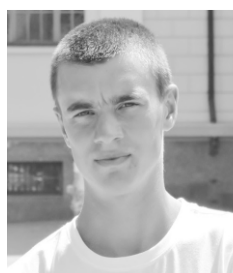
19. Open CV, (2014), [Internet resource], available at: URL: <http://opencv.org>. (accessed 01.09.2014).



Болтенков  
Виктор Алексеевич,  
канд. техн. наук, доц. каф.  
информационных систем  
Одесского нац. политехн.  
ун-та,  
тел.: (048) 743-08-15.  
E-mail:  
vaboltenev@mail.ru



Нгуен Гуи Кионг,  
аспирант каф. информаци-  
онных систем Одесского  
нац. политехн. ун-та,  
тел.: (093) 224-44-63.  
E-mail:  
cuongmits@gmail.com



Малявин  
Дмитрий Вадимович,  
студент-магистрант каф.  
информационных систем  
Одесского нац. политехн.  
ун-та,  
тел.: (093) 167-54-95.  
E-mail: dima\_91@ukr.net