
ISSN: 2545-0573

РАСПОЗНАВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ И НАЛОЖЕННЫХ РЕАЛЬНЫХ ПЛОСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО КРИВИЗНЕ ТОЧЕК КОНТУРОВ ИХ БИНАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Садыков Султан Сидыкович

Д.т.н., профессор, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета РФ

Савичева Светлана Владимировна

к.т.н.доцент, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета РФ

Самандаров Илхомжон Расулович

к.т.н.доцент, Алмалыкский филиал Ташкентского Государственного Технического Университета им. И. Каримова

ARTICLE INFO.

Ключевые слова:

Распознавание; реальный плоский объект; бинарное изображение; контур; кривизна; сигнатура; признак.

Аннотация

Предложен метод распознавания каждого реального плоского объекта (РПО) при их отдельном и наложенном состоянии. Метод основан на двух алгоритмах распознавания отдельных РПО. Приведены результаты экспериментальных исследований алгоритмов и метода распознавания отдельно расположенных и наложенных РПО.

<http://www.gospodarkainnowacje.pl/> © 2022 LWAB.

Введение

Методы и алгоритмы обработки и анализа изображений и распознавания объектов на них в настоящее время используются во всех областях науки и техники. Особый интерес представляют эти методы для решения задач: практического применения аэрокосмических снимков[1]; диагностики заболеваний по рентгеновским снимкам[2]; распознавания типов объектов в поле зрения роботов[3]. На промышленных предприятиях при сортировке и контроле деталей, сборке изделий, находящихся, например, на конвейере, возникают задачи распознавания как отдельно расположенных, так и наложенных объектов [4, 5].

Если задача распознавания отдельно расположенных объектов уже достаточно хорошо решена [6], то вопрос распознавания отдельных объектов при их наложенном состоянии еще предстоит решить.

Разработкой алгоритмов распознавания отдельных объектов при их наложенном состоянии занимаются несколько исследовательских центров в Японии и США [7]. Однако, еще не созданы

алгоритмы и методы, пригодные для практического использования. В России исследования в этом направлении пока не ведутся.

В связи с этим, разработка и практическое применение новых быстрых и точных алгоритмов распознавания как отдельно расположенных, так и наложенных объектов является актуальной научно-исследовательской задачей, решение которой позволит создать промышленные системы автоматического распознавания (САР) для автоматизации сортировочных, сборочных и т.д. операций.

В данной работе рассмотрены два алгоритма распознавания отдельно расположенных РПО(рис.1,а) и один метод распознавания каждого из двух объектов в их наложенном состоянии(рис.1,б).

Под плоским объектом понимаются реальные предметы, изделия, детали, высота(толщина) h которых значительно меньше его длины l , т.е. $h \ll l$ (обычно $h < 4$ мм).

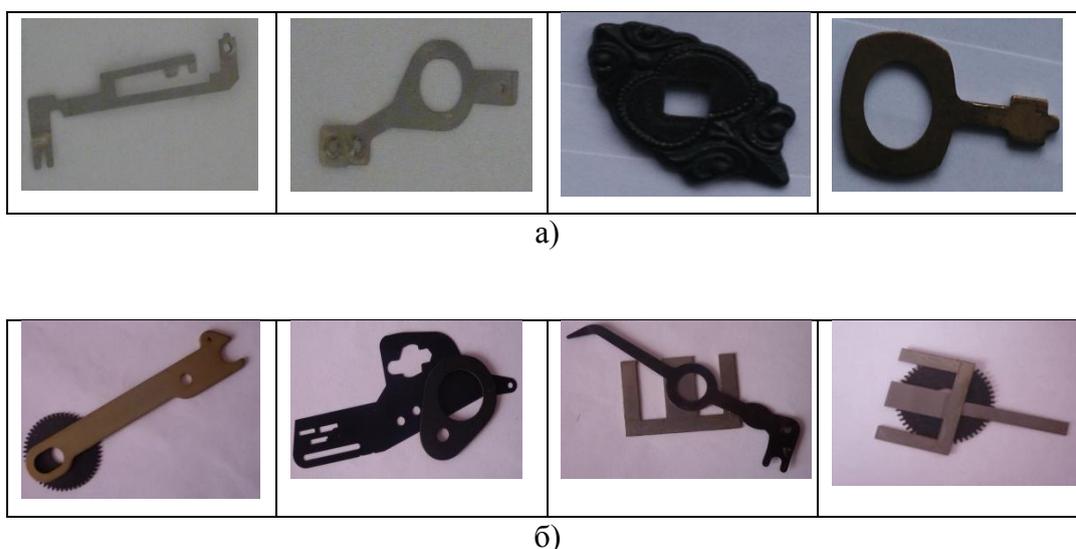


Рисунок 1 – Примеры отдельных а) и двух наложенных б) РПО.

Алгоритмы распознавания отдельно расположенных РПО.

Первый алгоритм, основанный на использовании сигнатуры бинарного изображения РПО(R-алгоритм).

На этапе обучения реализуются следующие шаги:

1. Генерация 2000 вариантов расположения каждого отдельного РПО в поле зрения системы [8].

Основной информацией (параметрами) для генерации вариантов расположения РПО в поле зрения распознающей системы являются координаты центра тяжести x_c и y_c , а также угол наклона одного из диагоналей прямоугольника с изображением объекта. Значения параметров задаются с помощью датчиков случайных чисел. При этом значения угла наклона диагонали изменяются в пределах от 0 до 360 градусов (шаг равный 1 градусу), а координат x_c и y_c изображения исходного объекта – в пределах: $x_1 < x_c < x_2$; $y_1 < y_c < y_2$, где $(x_1; y_1)$, $(x_2; y_2)$ – значения координат концов диагонали прямоугольника содержащего изображение РПО, которые не должны выходить за пределы размеров поля зрения. Для проведения исследований, размер поля зрения САР был выбран равным 1024x1024 точек. При этом размер рабочей области (рабочего поля зрения системы распознавания) составляет 1023x1023 точек.

Сгенерированы по 2000 вариантов изображений каждого из 10 отдельных (различных) РПО и размещены в базу данных (БД).

2. *Определение частоты появления каждого варианта расположения объекта в поле зрения САР* [8]. Результаты также размещаются в БД.

3. *Предварительная обработка* [8, 12, 13].

Предлагаемая методика предварительной обработки изображений РПО включает следующие шаги: 1) уменьшение уровня шума (в основном фона) на изображениях объектов до требуемого; 2) бинаризация изображений; 3) маркировка объектов на изображении; 4) убиение нецелых объектов на изображении; 5) выделение контуров бинарных изображений РПО; 6) определение центра тяжести бинарных изображений РПО. Результаты операций шагов 5 и 6 предварительной обработки изображений РПО сохраняются в БД.

4. *Формирование R-функции для каждого бинарного изображения объекта*

В рассматриваемом алгоритме распознавания в качестве признака РПО используется функция $R(r_i)$, представляющая собой множество значений расстояний $\{r_i\}$ от центра объекта до точек его внешнего контура. Эту функцию назовем R-функцией. Она представляет собой так называемую сигнатуру бинарного изображения объекта [9].

Процесс формирования R-функции бинарного изображения по его контуру иллюстрирован на рис. 2.

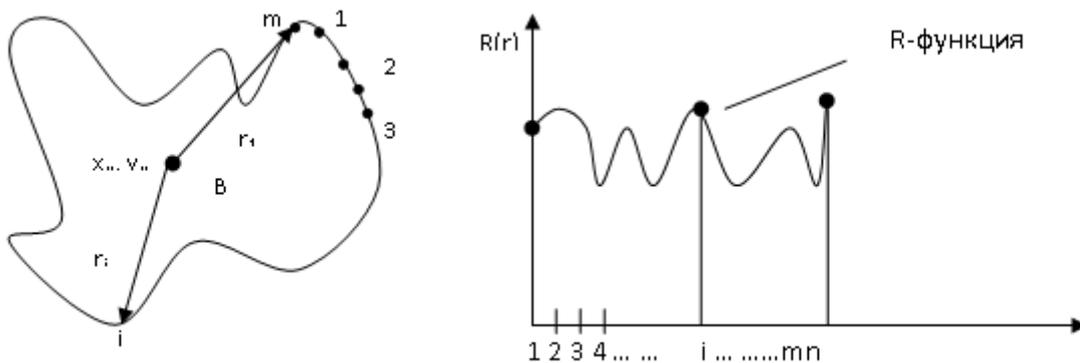


Рисунок 2 – Формирование R-функции отдельного плоского объекта по контуру его бинарного изображения

Формирование R-функции объекта состоит в организации массива со значениями $r_i (i=1, 2, 3, \dots, m)$ в порядке их определения в процессе обхода контура.

Следует отметить, что при формировании R-функции, первым ее элементом будет расстояние r_1 от центра до первой точки контура, найденной первой по ходу сканирования поля изображения слева-направо и сверху-вниз (рис.3). R-функции всех 2000 вариантов изображений каждого из 10 выбранных плоских объектов заносятся в БД.

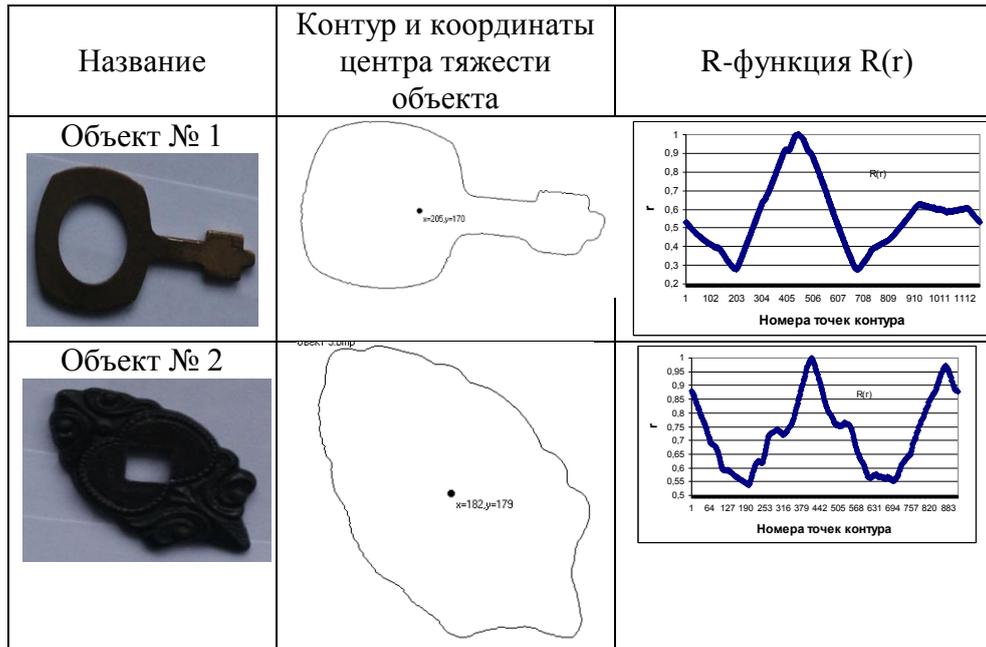


Рисунок 3 – Снимки некоторых реальных плоских объектов, контуры их бинарных изображений и графики R-функций (с нормированными значениями r)

5. Выбор R-функций объектов в качестве эталонных R_3 -функций.

В качестве первой эталонной R_{31} -функции для каждого объекта выбирается (из 2000) R-функция объекта с наиболее высокой частотой конкретной ориентации (из возможных 360 вариантов) в поле зрения САР.

При необходимости увеличения количества эталонов объекта (например, до 2- R_{32}), используются R-функции, частота ориентации которых наиболее близка к частоте первой эталонной R_{31} -функции и т.д.

6. Распознавание РПО и определение необходимого количества эталонов

При распознавании объекта его R-функция сравнивается с эталонными R_3 -функциями объектов на основе следующего выражения

$$Z_{kl} = \sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^n (r_{ik} - r_{il})^2}, \quad (1)$$

где k – номер эталонного объекта; l – номер распознаваемого объекта; $r_{ik} = \{r_i(k), \text{ если } i \leq m_k; 0 - \text{ в противном случае}\}$; $r_{il} = \{r_i(l), \text{ если } i \leq m_l; 0 - \text{ в противном случае}\}$; m_k, m_l – число элементов R-функции с номером k и распознаваемого объекта с номером l , соответственно; Z_{kl} – среднеквадратическое отклонение значений R-функции распознаваемого объекта с номером l от эталонной R_3 -функции с номером k ; $n = \max_{k,l} \{m_k, m_l\}$;

Суммирование при вычислении Z_{kl} осуществляется по m_l , если $m_l > m_k$, по m_k , если $m_k > m_l$. Значения недостающих элементов, сравниваемых R- и R_3 - функций, принимаются равными нулю. Отличие m_k и m_l связано с тем, что различные объекты и их варианты имеют разное количество контурных элементов.

Решение об идентификации распознаваемого объекта принимается на основе следующего выражения:

$$\min_{k,l} Z_{kl}^0 = \min_k \{ \min_l Z_{kl} \}, \quad (2)$$

где $\min_k Z_{kl} \{.\}$ – минимальное значение Z_{kl} среди всех Z_{kl} при $k=1, 2, \dots, N$ и постоянном значении l ; $\min_l Z_{kl}^1$ – выбор минимального значения Z_{kl} среди всех $Z_{kl}(1)$ при $l=1, 2, \dots, P$ и постоянном значении k ; N – число распознаваемых объектов; P – число эталонов.

Полученное $\min_{k,l} Z_{kl}^0$ при известных k и l указывает близость l -го распознаваемого объекта к k -му эталону, чем к другим эталонам.

Предварительные исследования показали, что один эталон (R_3 -функция с самой высокой частотой появления) на каждый объект не обеспечивает необходимую точность (вероятность ошибки 10^{-4}) распознавания РПО, поэтому проведены эксперименты, на которых определено нужное количество эталонов на каждый объект для достижения 100% распознавания всех реализаций всех объектов.

Установление нужного количества эталонов на объект для выполнения нужной точности распознавания РПО осуществляется в следующей последовательности.

1. Из БД выбирается R -функция первого варианта из 2000 объекта №1.
2. Осуществляется сравнение данной R -функции с 10 эталонными R_3 -функциями 10 объектов на основе выражения (1).
3. По выражению (2) определяется $\min Z_{kl}$. Его значение для объекта 1 должно быть самым минимальным и близким к нулю. Если это не так, то количество эталонов всех 10 объектов увеличивается до 2.
4. Осуществляется сравнение данной R -функции с 20 R_3 -функциями 10 объектов. По (2) определяется $\min Z_{kl}$. Его значение для объекта 1 должно быть самым минимальным и близким к нулю. Если это не так, то количество эталонов всех 10 объектов увеличивается до 3 и т.д.
5. Процесс продолжается до тех пор пока увеличение числа эталонов не уменьшит значение $\min Z_{kl}$ до требуемого и близкого к нулю для объекта № 1.
6. После определения требуемого числа эталонов для объекта № 1, осуществляется переход к установлению нужного количества эталонов, обеспечивающего стопроцентное распознавание объекта № 2 и т. д.
7. Затем выбирается R -функция второго объекта (из 2000) и т.д.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что 100% распознавание всех 20 000 вариантов изображений 10 объектов обеспечивается максимум при 10 эталонах на каждый распознаваемый объект.

На этом этап обучения САР по распознаванию отдельных РПО по первому R -алгоритму заканчивается.

На этапе экзамена по рассмотренному R -алгоритму реализуются следующие шаги:

1. Выбирается новый набор 10 РПО из деталей и изделий, примеры которых приведены на рис. 1,а;

2. Осуществляется генерация изображений по 2000 вариантов каждого объекта;
3. Определяются R-функции всех 20 000 вариантов 10 отдельных РПО;
4. Случайным образом выбирается одна из 20 000 R-функций РПО;
5. Далее выполняются п.п.2-4 этапа обучения;
6. По значению СКО $\min Z_{kl}$ определяется к какому из 10 объектов относится рассматриваемый входной объект;
7. Затем также случайным образом выбирается вторая R-функция;
8. Выполняется п.п.5,6 и т.д.

Были проведены исследования со всеми 20 000 вариантами изображений всех 10 отдельных РПО с использованием для распознавания выбранных при обучении эталонов объектов.

Экзаменационные исследования по первому R-алгоритму распознавания отдельных РПО полностью подтвердили результаты, полученные на этапе обучения САР. На рис. 4 и 5 даны графики зависимости вероятности правильного распознавания и времени по всем 10 исходным РПО от количества эталонов, соответственно.

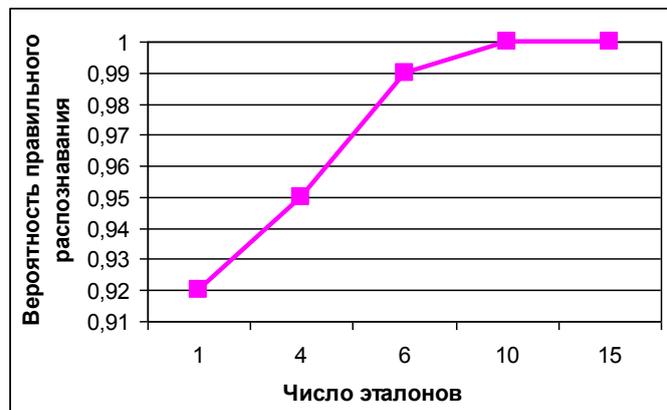


Рисунок 4 – График зависимости вероятности правильного распознавания отдельного объекта от числа эталонов по первому R-алгоритму

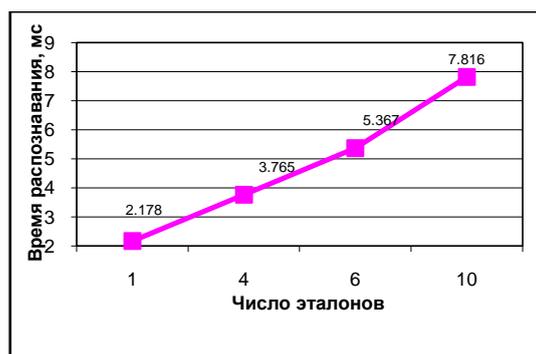


Рисунок 5 – График изменения времени распознавания отдельного объекта от числа эталонов по первому R-алгоритму

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- Точность распознавания всех 20 000 вариантов всех 10 реальных плоских объектов при использовании уже 10 эталонов составляет 100%. Увеличение числа эталонов на объект лишь приводит к повышению времени распознавания. Среднее время распознавание одного объекта составляет менее 8 мс (рис.5).

Второй алгоритм распознавания отдельных РПО основан на использовании значений кривизны в точках дискретного контура бинарного изображения объекта (А-алгоритм).

Все этапы и шаги данного А-алгоритма практически аналогичны этапам и шагам первого R-алгоритма.

Отличие состоит в формируемой функции из значений кривизны в точках дискретного контура бинарного изображения РПО.

Особенность данного А-алгоритма состоит в следующем.

Для получения односточечных без разрывных контуров бинарных изображений плоских объектов использован алгоритм [10], формирующий дискретную контурную линию из 4-х и d-связных точек [8]. Это значит односточечный контур состоит из точек, кривизна в которых может принимать всего три значения – 0° , 90° и 135° . Поэтому определение значения кривизны в точках такого контура можно осуществить логическим путем с помощью масок.

Для определения значений кривизны в точках одноэлементной дискретной контурной линии (вообще, любой дискретной кривой), вместо сложных вычислений, достаточно сканировать 16 масками размером 3×3 элемента и логически установить величину кривизны в каждой точке контура.

Обозначим элементы маски g_0 размером 3×3 следующим образом:

f_4	f_3	f_2
f_5	f_0	f_1
f_6	f_7	f_8

g_0

Используемые далее маски имеют следующий вид и обозначения:

1. Маски для определения кривизны в 0°

0	1	0
0	1	0
0	1	0

g_1

0	0	0
1	1	1
0	0	0

g_2

0	0	1
0	1	0
1	0	0

g_3

1	0	0
0	1	0
0	0	1

g_4

2. Маски для определения кривизны в 90°

1	0	1
0	1	0
0	0	0

g_5

0	0	1
0	1	0
0	0	1

g_6

0	0	0
0	1	0
1	0	1

g_7

1	0	0
0	1	0
1	0	0

g_8

3. Маски для определения кривизны в 135°

0	1	0
0	1	0
0	0	1

g_9

0	0	1
0	1	0
0	1	0

g_{10}

0	0	0
0	1	1
1	0	0

g_{11}

0	0	0
1	1	0
0	0	1

g_{12}

1	0	0
0	1	0
0	1	0

g_{13}

0	1	0
0	1	0
1	0	0

g_{14}

0	0	1
1	1	0
0	0	0

g_{15}

1	0	0
0	1	1
0	0	0

g_{16}

Значение любого элемента f_i маски g_0 определяется так:

$$f_i = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, i = 1, 2, \dots, 8, \quad (3)$$

т.е. $f_i(1) = f_i = 1$; $f_i(0) = \overline{f_i} = 0$.

Представим маски g_1, \dots, g_{16} в виде логических булевых функций:

$$g_i = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, i = 1, 2, \dots, 16. \quad (4)$$

Тогда

$$g_1 = \begin{cases} 1, \text{ при } f_0 f_3 f_7 \overline{f_1} \overline{f_2} \overline{f_4} \overline{f_5} \overline{f_6} \overline{f_8} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ если } g_1 = 1, \text{ то } f_0 = 1 \quad (5)$$

где $g_1 = 1$ означает полное совпадение содержимого анализируемого участка дискретной линии с маской g_1 , и центральная точка f_0 текущей маски имеет кривизну равную нулю и значение точки $f_0 = 1$ не меняется.

$$g_2 = \begin{cases} 1, \text{ при } f_0 f_1 f_5 \overline{f_2} \overline{f_3} \overline{f_4} \overline{f_6} \overline{f_7} \overline{f_8} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ если } g_2 = 1, \text{ то } f_0 = 1(0^0) \quad (6)$$

$$g_3 = \begin{cases} 1, \text{ при } f_0 f_2 f_6 \overline{f_1} \overline{f_3} \overline{f_4} \overline{f_5} \overline{f_7} \overline{f_8} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ если } g_3 = 1, \text{ то } f_0 = 1(0^0) \quad (7)$$

$$g_4 = \begin{cases} 1, \text{ при } f_0 f_4 f_8 \overline{f_1} \overline{f_2} \overline{f_3} \overline{f_5} \overline{f_6} \overline{f_7} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ если } g_4 = 1, \text{ то } f_0 = 1(0^0) \quad (8)$$

$$g_5 = \begin{cases} 1, \text{ при } f_0 f_2 f_4 \overline{f_1} \overline{f_3} \overline{f_5} \overline{f_6} \overline{f_7} \overline{f_8} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ если } g_5 = 1, \text{ то } f_0 = 90^0 \quad (9)$$

$$g_6 = \begin{cases} 1, \text{ при } f_0 f_2 f_8 \overline{f_1} \overline{f_3} \overline{f_4} \overline{f_5} \overline{f_6} \overline{f_7} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ если } g_6 = 1, \text{ то } f_0 = 90^0 \quad (10)$$

$$g_7 = \begin{cases} 1, \text{ при } f_0 f_6 f_8 \overline{f_1} \overline{f_2} \overline{f_3} \overline{f_4} \overline{f_5} \overline{f_7} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ если } g_7 = 1, \text{ то } f_0 = 90^0 \quad (11)$$

$$g_8 = \begin{cases} 1, \text{ при } f_0 f_4 f_6 \overline{f_1} \overline{f_2} \overline{f_3} \overline{f_5} \overline{f_7} \overline{f_8} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ если } g_8 = 1, \text{ то } f_0 = 90^0 \quad (12)$$

$$g_9 = \begin{cases} 1, \text{ при } f_0 f_3 f_8 \overline{f_1} \overline{f_2} \overline{f_4} \overline{f_5} \overline{f_6} \overline{f_7} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ если } g_9 = 1, \text{ то } f_0 = 135^0 \quad (13)$$

$$g_{10} = \begin{cases} 1, \text{ при } \overline{f_0 f_2 f_7 f_1 f_3 f_4 f_5 f_6 f_8} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ если } g_{10} = 1, \text{ то } f_0 = 135^0 \quad (14)$$

$$g_{11} = \begin{cases} 1, \text{ при } \overline{f_0 f_1 f_6 f_2 f_3 f_4 f_5 f_7 f_8} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ если } g_{11} = 1, \text{ то } f_0 = 135^0 \quad (15)$$

$$g_{12} = \begin{cases} 1, \text{ или } \overline{f_0 f_5 f_8 f_1 f_2 f_3 f_4 f_6 f_7} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ если } g_{12} = 1, \text{ то } f_0 = 135^0 \quad (16)$$

$$g_{13} = \begin{cases} 1, \text{ при } \overline{f_0 f_4 f_7 f_1 f_2 f_3 f_5 f_6 f_8} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ если } g_{13} = 1, \text{ то } f_0 = 135^0 \quad (17)$$

$$g_{14} = \begin{cases} 1, \text{ при } \overline{f_0 f_3 f_6 f_1 f_2 f_4 f_5 f_7 f_8} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ если } g_{14} = 1, \text{ то } f_0 = 135^0 \quad (18)$$

$$g_{15} = \begin{cases} 1, \text{ при } \overline{f_0 f_2 f_5 f_1 f_3 f_4 f_6 f_7 f_8} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ если } g_{15} = 1, \text{ то } f_0 = 135^0 \quad (19)$$

$$g_{16} = \begin{cases} 1, \text{ при } \overline{f_0 f_1 f_4 f_2 f_3 f_5 f_6 f_7 f_8} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ если } g_{16} = 1, \text{ то } f_0 = 135^0 \quad (20)$$

Пусть F_1 – функция обнаружения точки с кривизной 0° ; F_2 – функция обнаружения точки с кривизной 90° ; F_3 – функция обнаружения точки с кривизной 135° .

Тогда

$$F_1 = \begin{cases} 1, \text{ если } g_1 \vee g_2 \vee g_3 \vee g_4 = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ при } F_1 = 1, f_0 = 1(0^0) \quad (21)$$

$$F_2 = \begin{cases} 1, \text{ если } g_5 \vee g_6 \vee g_7 \vee g_8 = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ при } F_2 = 1, f_0 = 90^0 \quad (22)$$

$$F_3 = \begin{cases} 1, \text{ если } g_9 \vee g_{10} \vee \dots \vee g_{16} = 1 \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \text{ при } F_3 = 1, f_0 = 135^0 \quad (23)$$

где \vee – знак дизъюнкции.

Далее осуществляется формирование А-функции, представляющая собой совокупность значений кривизны в точках контура бинарного изображения РПО при последовательном его обходе от некоторой начальной точки. Значения точек окрестности 3×3 каждой точки контура сравниваются со значениями точек всех 16 логических масок и определяются значения функций F_1, F_2, F_3 (21-23). В зависимости от того какая из функций F_1, F_2, F_3 равна единице и устанавливается значение кривизны в данной анализируемой точке, затем оцениваются значения точек окрестности следующей по ходу обхода точки контура и т.д. по всему контуру (рис.6). Таким образом, здесь процесс формирования А-функции по точкам контура аналогичен

процессу формирования R-функции для первого алгоритма.

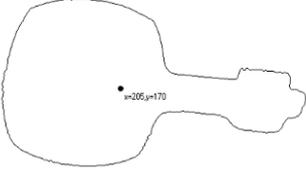
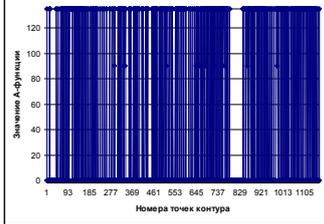
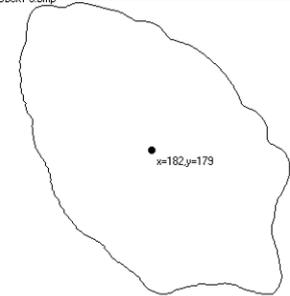
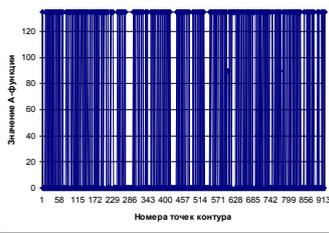
Название	Контур и координаты центра тяжести объекта	A-функция $A(\alpha)$
<p>Объект № 1</p> 		
<p>Объект № 2</p> 		

Рисунок 6 – Снимки некоторых реальных плоских объектов, контуры их бинарных изображений и графики A-функций

В процессе исследования по определению числа необходимого количества эталонов на каждый объект установлено, что 100% распознавание всех 20000 вариантов изображений 10 типов отдельных объектов требует максимум 19 эталонов на каждый тип объекта. Это почти в два раза больше при первом алгоритме. Временные характеристики данного алгоритма хуже, чем у первого R-алгоритма.

На этом этап обучения САР по распознаванию отдельных РПО по второму A-алгоритму заканчивается.

Этап экзамена для данного A-алгоритма аналогичен этапу экзамена по первому R-алгоритму.

Экзаменационные исследования по второму A-алгоритму распознавания отдельно расположенных РПО подтвердили результаты, полученные на этапе обучения САР. На рис. 7 и 8 даны графики зависимости вероятности правильного распознавания и времени по всем 10 исходным РПО от количества эталонов для данного A-алгоритма.

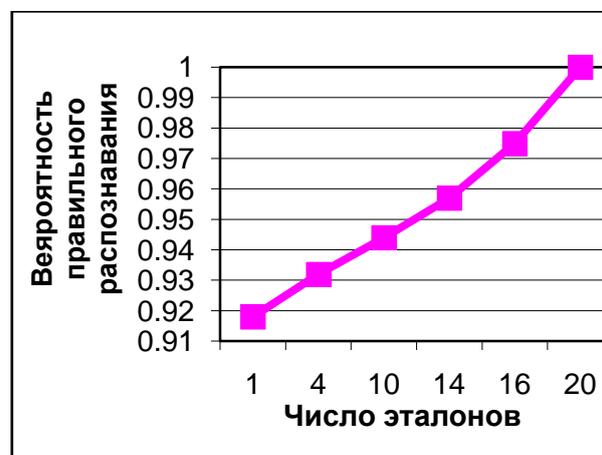


Рисунок 7 – График зависимости вероятности правильного распознавания отдельного РПО от

числа эталонов по второму А-алгоритму

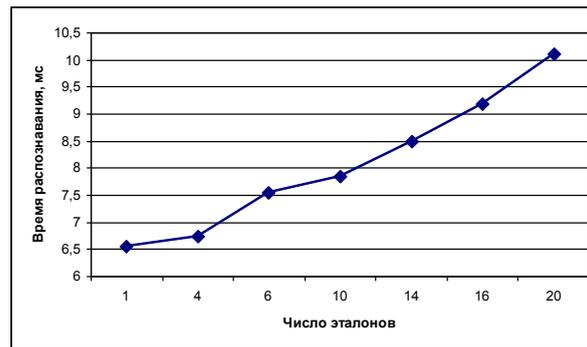


Рисунок 8 – График изменения времени распознавания отдельного объекта от числа эталонов по второму А-алгоритму

Как видно из графика на рис. 7 максимальный процент ошибок при 10 эталонах составляет 4%, а при 20 и более эталонах на объект процент ошибки становится равным нулю, т.е. обеспечивается 100% распознавание 20.000 вариантов всех 10 входных объектов. Среднее время распознавания при этом составляет меньше 11мс (рис.8).

Метод распознавания отдельных РПО в их наложенном состоянии

Данный метод состоит из двух шагов распознавания: 1) типа(номера) сложного объекта; 2) отдельного РПО в сложном объекте. Каждый шаг включает этапы обучения и экзамена.

Этап обучения распознаванию типа сложного объекта осуществляются следующий последовательности:

1. Формирование(генерация) изображений наложенных объектов(наложение двух РПО). Полученное при этом изображение назовем изображением сложного объекта.

Из 10 отдельных РПО (таких как на рис. 1,б) по 2 формируются 55 типов сложных объектов. Создание сложных объектов состоит в генерации вариантов изображения каждого отдельного РПО и их размещения их на одном поле зрения САР [11].

Наложённость двух любых типов объектов в поле зрения САР определяется маркировкой с условиями:

- если в поле зрения одна связная компонента, то объекты наложены или касаются (нулевая наложенность);
- если в поле зрения две (и более) связные компоненты, то объекты не наложены.

Процент закрытия одного плоского объекта другим определяется так:

$$K_{nl} = \left(1 - \frac{2S_{\text{слож}} - S_{\text{общ}}}{S_{\text{общ}}}\right) \cdot 100\% \quad (24)$$

где $S_{\text{слож}}$ – площадь двух наложенных объектов (одна связная компонента); $S_{\text{общ}}$ – общая (суммарная) площадь двух отдельных наложенных объектов S_1 и S_2 , т. е. $S_{\text{общ}} = S_1 + S_2$.

Для каждого из 55 типов сложных объектов формируется по 2000 вариантов их наложенности.

2. Определение частоты появления сложного объекта с конкретным процентом наложенности двух объектов.

3. Предварительная обработка изображений сложных объектов – аналогично предварительной обработке изображения РПО в первом R-алгоритме распознавания.
4. Формирование R-функции сложного объекта $R_{\text{сл.об.}}$ -функции(рис.9) – аналогично формированию R-функции РПО в первом алгоритме распознавания, поскольку бинарное изображение сложного объекта в поле зрения САР представляет собой как отдельный объект.

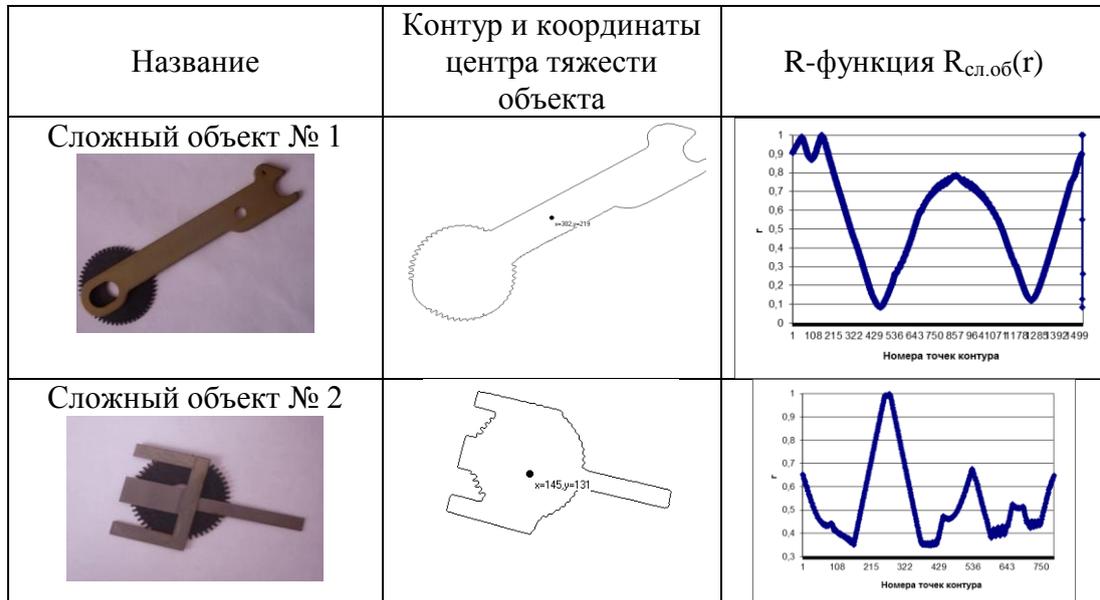


Рисунок 9 – Снимки некоторых сложных объектов, контуры их бинарных изображений и графики R-функций

Выбор $R_{\text{сл.об.}}$ -функции в качестве эталонной $R_{\text{э.сл.об.}}$ -функции осуществляются аналогично как в первом алгоритме распознавания РПО, но в данном случае выбор осуществляется по максимальной частоте появления сложного объекта с конкретной величиной перекрытия одного РПО другим.

5. Распознавание типа сложного объекта и определение необходимого количества эталонов выполняется аналогично распознаванию отдельных РПО по первому алгоритму.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что 100% распознавание всех 110000 вариантов изображений 55 типов сложных объектов обеспечивается при максимальном числе эталонов равном 25 на каждый тип сложного объекта.

На этом этап обучения по распознавания типа сложного объекта с использованием R-алгоритма заканчивается.

Этап экзамена по распознаванию типа сложных объектов аналогичен этапу распознавания отдельных объектов по первому R-алгоритму. Случайным образом последовательно выбирается из общей выборки объемом 110000 изображения сложных объектов и осуществляется их распознавание.

Экзаменационные исследования подтвердили результаты, полученные на этапе обучения распознавания сложных объектов. На рис. 10 и 11 приведены графики зависимости вероятности правильного распознавания и времени по всем 55 типам сложных объектов от количества эталонов.



Рисунок 10 – График зависимости вероятности правильного распознавания сложного объекта с помощью R-алгоритма от числа эталонов

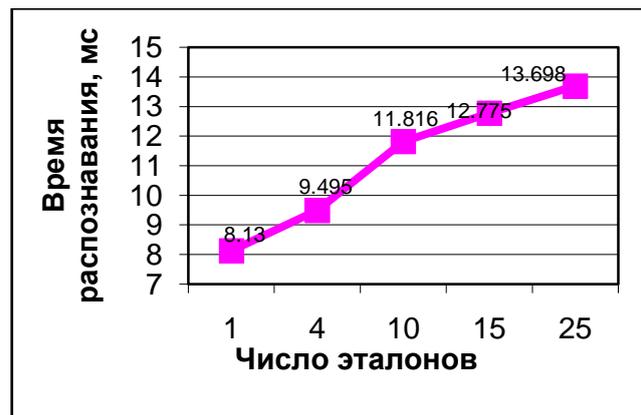


Рисунок 11 – График изменения времени распознавания сложного объекта с помощью R-алгоритма от числа эталонов

Анализ полученных результатов показывает, что при 25 эталонах обеспечивается 100% распознавание всех 110000 вариантов 55 сложных объектов. Это значит можно считать, что вероятность ошибки распознавания любого типа сложного объекта с помощью первого R-алгоритма распознавания отдельных объектов меньше $1 \cdot 10^{-5}$.

Распознавание типа сложного объекта и определение его номера позволяет узнать из каких отдельных РПО состоит данный сложный объект. Теперь, на втором шаге метода, предстоит определить где, в какой части сложного объекта находится каждый из двух отдельный РПО. Данная задача решается с использованием только второго A-алгоритма распознавания отдельных РПО в следующей последовательности (здесь приведен в основном этап экзамена при распознавании отдельных РПО в сложных объектах):

1. Формируются эталонные A_3 -функции исходных 10 отдельных РПО;
2. Формируется A-функция распознанного первым алгоритмом распознавания отдельных объектов сложного объекта – $A_{сл.об.}$ -функции;
3. Осуществляется сравнение A_3 -функции первого отдельного РПО и $A_{сл.об.}$ -функции сложного объекта на основе следующих формул:

$$\Delta = \frac{1}{k_1} \sum_{i=2}^{k_1+1} |\alpha_{эj} - \alpha_{сли}|,$$

$$\Delta_2 = \frac{1}{k_1} \sum_{i=2}^{k_1+1} |\alpha_{эj} - \alpha_{сли}|, \quad (25)$$

$$\Delta_m = \frac{1}{k_1} \sum_{i=m}^{k_1+m} |\alpha_{эj} - \alpha_{сли}|,$$

где $\alpha_{эj}$ – значения элементов A_3 -функции исходного РПО ($j=1, 2, \dots, N$); $\alpha_{сли}$ – значения элементов $A_{сл.об.}$ -функции сложного объекта O_i ($i=1, 2, \dots, P$); m – число смещений A_3 -функции РПО $\alpha_{эj}$ для полного обхода всех точек контура сложного объекта O_i и оно определяется так:

$$m = 2(N + P), \quad (26)$$

где N – число точек контура исходного отдельного РПО; P – число точек контура сложного объекта O_i .

Результаты расчетов отклонений $\Delta_1 \div \Delta_m$ заносятся в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты расчета отклонений A_3 -и $A_{сл.об.}$ -функций

Эталон 1	Эталон 2	...	Эталон q
Δ_{11}	Δ_{12}	...	Δ_{1q}
Δ_{21}	Δ_{22}	...	Δ_{2q}
...
Δ_{m1}	Δ_{m2}	...	Δ_{mq}
$\Delta D_1 = \min_{i=1,m} \{\Delta_i\}$	$\Delta D_2 = \min_{i=1,m} \{\Delta_i\}$...	$\Delta D_q = \min_{i=1,m} \{\Delta_i\}$

Решение о распознавании принимается на основе выражения (27) по данным таблицы 1:

$$\min \Delta D = \min_{i=1,q} \{\Delta D_i\}, \quad (27)$$

где q – число эталонов, A_3 -функция для одного из двух отдельных РПО в сложном (используются данные результатов, полученные с помощью второго A -алгоритма распознавания).

Аналогичное сравнение A_3 -функции второго отдельного объекта выполняется со всеми $A_{сл.об.}$ -функциями сложного объекта.

На рис. 12 приведены графики изменения точности правильного распознавания отдельных РПО в каждом из 55 типов наложенных объектов в зависимости от количества эталонов на каждый сложный объект. На рис.13 дан общий график изменения вероятности правильного распознавания отдельных РПО в сложных объектах при изменении числа эталонов от 1 до 14.

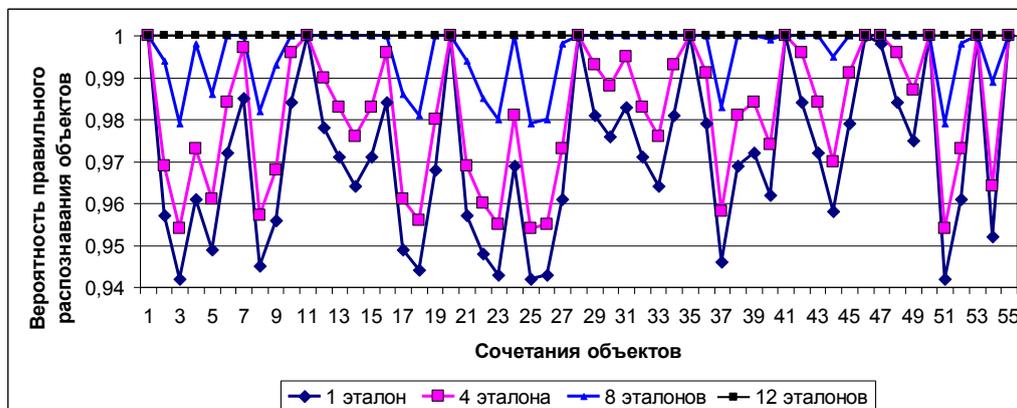


Рисунок 12 – Графики изменения вероятности правильного распознавания различных типов сложных объектов с помощью R-алгоритма при разном количестве эталонов

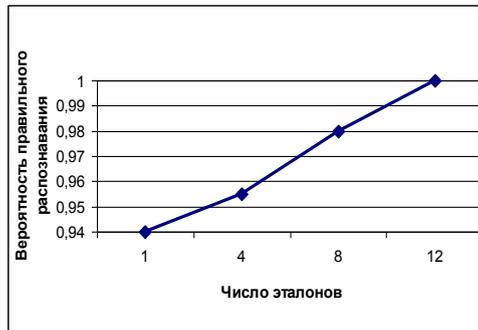


Рисунок 13 – График зависимости вероятности правильного распознавания отдельных РПО в сложном объекте с помощью А-алгоритма от числа эталонов.

График зависимости времени распознавания отдельных РПО в сложных объектах от количества эталонов представлен на рисунке 16.

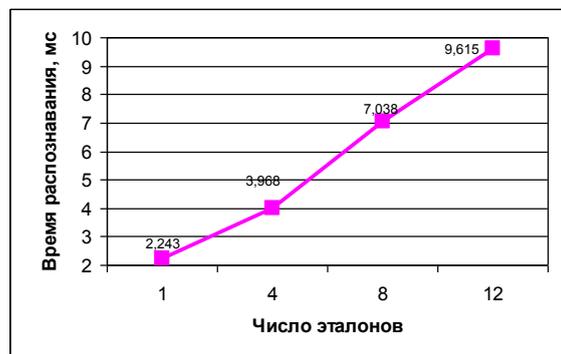


Рисунок 14 – График зависимости времени распознавания отдельных РПО в сложных объектах с помощью А-алгоритма от числа эталонов на объект

Анализ графиков на рисунках 12-14 показывает, что максимальный процент ошибок распознавания отдельных РПО в сложных объектах на основе А-алгоритма при различном количестве эталонов составляет: при 4 эталонах – 5,5 %; время – 3,968 мс; при 8 эталонах – 2 %; время – 7,038 мс; при 12 и большем числе эталонов – 0 %; время – 9,615 мс.

Заключение

1. R-алгоритм обеспечивает при небольшом количестве эталонов на каждый объект и малом времени высокую точность распознавания (в среднем, ошибка порядка $1 \cdot 10^{-5}$) отдельных РПО. С его помощью успешно решается задача определения класса сложного объекта, образованного наложением двух отдельных РПО.
2. А-алгоритм позволяет осуществлять распознавание отдельных РПО, но с большим числом эталонов на объект и большим временем, чем R-алгоритм. Кроме того А-алгоритм, в отличие от R-алгоритма, позволяет распознавать отдельные РПО в сложном объекте.
3. Метод распознавания отдельных РПО в сложном объекте, основанный на R- и А-функциях обеспечивает высокую точность распознавания (в среднем, ошибка порядка $1 \cdot 10^{-4}$) при небольшом количестве эталонов как сложный объект, так и отдельный РПО на сложном.

Литература

1. Сергеев, В.В. Итерационный метод восстановления кусочно-постоянных изображений при известных границах областей / В. В. Сергеев, А. Ю. Денисова // Компьютерная оптика. - 2013. - №2. - С.239-243.
2. Садыков, С.С. Компьютерная диагностика новообразований на маммографических снимках

- /С. С. Садыков, Ю. А. Буланова, Е. А. Захарова // Компьютерная оптика.-2014.-№1.-С.131-138.
3. З.Якимов, П.Ю. Предварительная обработка изображений в системах локализации и распознавания дорожных знаков/ П. Ю. Якимов // Компьютерная оптика.-2013.-№3.-С.401-405.
 4. Генкин, В.Л. Системы распознавания автоматизированных производств/ В.Л. Генкин, И.Л. Ерош, Э. С. Москалев.– Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1988.–246 с.
 5. Техническое зрение роботов / В.И. Мошкин, А.А. Петров, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков ; Под общ. ред. Ю.Г. Якушенкова. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
 6. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение) / А.Н. Писаревский [и др.] ; Под общ. ред. А.Н. Писаревского, А.Ф. Чернявского. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1988. – 424 с.
 7. Информационно-аналитический ресурс, посвященный машинному обучению, распознаванию образов и интеллектуальному анализу данных.: [Электронный ресурс]. URL: www.machinelearning.ru/
 8. Садыков, С.С. Предварительная обработка изображений плоских объектов в системах технического зрения/ С.С. Садыков, С. В. Савичева // Изв. вузов «Приборостроение».-2012. - № 2.-С. 19-24.
 9. Садыков, С.С. Методы и алгоритмы выделения признаков в системах технического зрения / С.С. Садыков, Н.Н. Стулов. – М.: Горячая линия – Телеком.-2005. – 204 с.
 10. Садыков, С.С. Оценка возможностей методов распознавания плоских объектов/ С.С. Садыков, С. В. Савичева // Алгоритмы, методы и системы обработки данных.- 2012. - вып. 4(22).- С.110-119.
 11. Садыков, С.С. Исследование наложенности плоских объектов в поле зрения СТЗ/ С.С. Садыков, С. В. Савичева // Изв. вузов «Приборостроение». -2012. -№ 2.-С. 14-19.
 12. Садыков, С.С , Самандаров И.Р. Скелетизация бинарных изображений // Зарубежная радиоэлектроника. -1985. -№11. – С 30-37.
 13. Садыков, С.С, Кан В.Н,Самандаров И.Р. Методы выделения структурных признаков изображений. // Тошкент. “Фан”. – 1990. -С. 109