

Обратная разработка печатных плат с использованием алгоритма обезьян

А.М. Штучный¹, В.М. Курейчик²

¹НКБ «МИУС» ЮФУ, г. Таганрог, shtuchnyy@sfedu.ru

²ИКТИБ ЮФУ, г. Таганрог, vmkureychik@sfedu.ru

Аннотация — Авторами статьи проведено исследование целью которого, является определение недостатков существующих методов автоматизации обратной разработки печатных плат, определение путей их модернизации. Задачей статьи является разработка нового алгоритма сегментации для использования в системах автоматизированной обратной разработки печатных плат. В статье приведен обзор современного состояния проблемы обратной разработки печатных плат. Сделаны выводы о пригодности рассматриваемых подходов и возможные пути улучшения работоспособности. Одним из путей такого улучшения является применение современных средств предварительной обработки изображения, в частности, сегментации изображения. Проведен обзор методов сегментации, основанных на алгоритме кластеризации и существующих современных алгоритмов кластеризации. Сделаны выводы о пригодности использования данного подхода. В статье авторами предложен новый алгоритм сегментации изображений. Данный алгоритм основан на сочетании достоинств алгоритмов обезьян и сегментации изображений к-средних и с-средних. Преимуществом такого алгоритма является самостоятельное определение количества сегментов и их центров, которое обеспечивается применением алгоритма обезьян, и точная сегментация изображения благодаря алгоритму к-средних и с-средних. Авторами был проведен эксперимент. Его целью подтверждения качества модернизированной системы обратной разработки печатных плат. Задачами эксперимента являются: 1) подтверждение работоспособности и конкурентности предложенного авторами алгоритма сегментации изображений относительно существующих алгоритмов; 2) подтверждение конкурентоспособности авторского модернизированного подхода автоматизированной обратной разработки печатных плат. В ходе эксперимента удалось установить, что предложенный авторами алгоритм сегментации изображений работоспособен и конкурентоспособен. Он обладает большей точностью, чем существующие аналоги. Модернизированная авторами система так же превосходит существующие аналоги в области количества распознанных компонентов. Новизной данной работы является модернизация метода автоматизации процесса обратной разработки печатных плат. Принципиальным отличием является использование нового метода сегментации, основанного на алгоритмах к-средних и нечеткой с-средних сегментации изображений и алгоритма обезьян.

Ключевые слова — обратная разработка, обратная разработка печатных плат, алгоритмы сегментации, к-средних, нечеткий с-средних, алгоритм обезьян.

I. ВВЕДЕНИЕ

Текущее развитие науки и техники привело к появлению в современности таких тенденций, которые в совокупности образуют технологию Индустрия 4.0. Понятие «Индустрия 4.0» отождествлено с «четвертой промышленной революцией». Одним из принципов которой является максимальная автоматизация всех процессов производства. Существует проблема, заключающаяся в отсутствии технической документации на разработанные ранее радиоэлектронные изделия и макеты. Данная проблема связана с развитием отрасли электроники и микроэлектроники и дальнейшим ее спадом. Это повлекло за собой огромное количество разработанных образцов аппаратуры, на ряд которых отсутствует техническая документация. Решением задачи восстановления документации по имеющимся образцам занимается такое направление разработки, названное обратной разработкой или реверс-инжиниринг. Это направление используется для помощи при поиске неисправностей, копировании изделий и проверке защиты от копирования.

II. ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ. РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ

На данный момент существуют попытки автоматизации данного процесса, одни из широко известных описаны в работах [11, 12, 13]. В работе [11] предложена реализация автоматизации процесса обратной разработки печатных плат, путем применения средств распознавания изображений алгоритмы использованы из библиотеки для реализации компьютерного зрения OpenCV. Результаты стандартные и широко известные алгоритмы распознавания показывают не самые высокие. В работе [12] авторы выявили явное описание рабочего процесса для неразрушающего реверс-инжиниринга печатных плат для современного уровня техники. Предложена программная архитектура, поддерживающая рабочий процесс и ввода в нее элемент автоматизации. Данная работа показывает, что современное развитие науки и техники может решать поставленную задачу обратной разработки. Как показали опыты по использованию

различных обработок изображения и распознавания, использование алгоритмов сегментации изображения, повышает уровень обнаружения компонентов и доводит его до 65 процентов от общего количества элементов. В качестве алгоритма сегментации был предложен алгоритм водораздела. В работе [13] продемонстрирована работа по обратной разработке с использованием рентгеновской визуализации печатной платы. Использование такого метода повысило рабочий диапазон для анализа печатной платы. Показано данный подход позволяет анализировать и межслойные проводники, и соединения.

Подводя итог существующим работам по автоматизации обратной работы печатных плат, можно увидеть, что в основном работа по автоматизации заключается в применении алгоритмов распознавания к изображениям печатных плат, с целью определения элементов печатных плат. Как было отмечено в работе [12], применение алгоритмов сегментации перед распознаванием изображения повышает результативность. Авторы делают заключение, что применение совершенных алгоритмов сегментации может увеличить результативность существующих систем. Предлагается модернизировать существующий подход новым алгоритмом сегментации.

III. ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ. СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

На текущий момент существует множество подходов к сегментации изображений. Одними из востребованных являются алгоритмы на основе кластеризации, такие как *k*-средних (*K*-Means, *KM*) и нечетких *c*-средних (*Fuzzy C*-Means, *FCM*).

В работе [1] приведена модификация алгоритмов *KM* и *FCM*. Алгоритм получил название *k*-средних и нечетких *c*-средних (*K*-Means and *Fuzzy C*- Means, *KMandFCM*). Были проведены тестирования алгоритма в сравнении с оригинальными алгоритмами *KM* и *FCM*. Достоинством предложенного алгоритма является меньшее время работы и показатель средней квадратической ошибки. Недостатками является унаследованное от этих алгоритмов необходимость точно знать количество кластеров в изображении, а также их центры.

В [2] представлен алгоритм нечеткого *C*-среднего вейвлет-фрейма для сегментации изображений на графах. Достоинством является приемлемая сложность вычислений, высокая адаптивность к данным изображения и шуму и могут использоваться для анализа характеристик шума. Предложенный алгоритм имеет более широкий спектр применения. Недостатком является увеличенные вычислительные затраты.

Исследование [3] посвящено анализу влияния распределения данных на результаты кластеризации. Исследованы алгоритмы кластеризации *KM* и *FCM*. *FCM* показывает худшие результаты в наборах данных с большим разбросом размеров кластеров.

В [5] предложен метод использования *KM* и *FCM* алгоритмов сегментации для изображений головного мозга с целью поиска опухолей. Метод заключается в использовании алгоритма *KM* для предварительной сегментации, а *FCM* для уточнения формы объекта, далее применяются алгоритмы классификации для определения стадии опухоли. Данный подход продемонстрировал более точный результат.

В [6] предложен пространственный нечеткий *c*-средний алгоритм сегментации с использованием модели Мамфорда Шаха (*spatial fuzzy c-means using Mumford Shah model*), который позволяет автоматически определять внутренние контуры, эффективно определять размытые контуры, повышать устойчивость к шуму и повышать общую точность сегментации с меньшим числом итераций. Данный алгоритм обладает точностью определения кластеров оригинального алгоритма *FCM*, однако время работы существенно меньше.

Авторы отмечают, что оптимального алгоритма сегментации не существует, и они не лишены недостатков, одним из которых является невозможность самостоятельно определять количество сегментов и их центры. Однако алгоритм *k*-средних и *c*-средних (*KMandFCM*) показывает не плохие результаты на тестовых задачах. Авторы статьи предлагают модифицировать его алгоритмом обезьян для автоматического поиска количества кластеров и их центров.

IV. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования разработка новой системы реверс-инжиниринга печатных плат или модификация существующей путем применения более совершенного алгоритма сегментации. Задача исследования – разработка нового алгоритма сегментации изображений. В основу разработанного алгоритма сегментации легли алгоритм сегментации, предложенный в [1], и алгоритм обезьяньего поиска, предложенный в [9], и его модификации, предложенные в [10] для кластерного анализа.

Алгоритм кластеризации – это функция $a: X \rightarrow Y$, которая любому объекту $x \in X$ ставит в соответствие номер кластера $y \in Y$. Множество Y в некоторых случаях известно заранее, однако чаще ставится задача определения оптимального числа кластеров с точки зрения того или иного критерия качества кластеризации. При решении задачи кластеризации метки исходных объектов u_i изначально не заданы, и даже само множество Y может быть неизвестно.[7] Одним из простейших алгоритмов кластеризации данных является алгоритм *K*-средних (*k-means*). Он предполагает быстрый кластерный анализ путем выделения *K* сегментов (кластеров), которые располагаются на максимальном расстоянии друг от друга, где центры кластеров соответствуют локальным максимумам плотности распределения данных. Базовый алгоритм *K*-средних предполагает случайный или эвристический выбор *K* центров кластеров,

размещение каждого пикселя изображения в кластер с ближайшим центром к этому пикселю, после чего заново пересчитываются центры кластеров до сходимости процесса [8].

V. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Работа алгоритма авторов заключается в использовании алгоритма обезьян для поиска центров кластеров и их количества, а далее применяется алгоритм сегментации. Последовательность авторского алгоритма сегментации АО на основе KMandFCM

1. Процесс инициализация популяции агентов.
2. Процесс движения вверх (climb process).
3. Процесс локальных прыжков (watch-jump process).
4. Процесс сегментации изображения алгоритмом KMandFCM.

A. Процесс инициализации популяции агентов

В оригинальном АО оказывает влияние на точность, но для задачи сегментации изображений каждый компонент данных имеет разные интервалы, что несколько нивелирует оказываемое влияние выбора начальной популяции. Для i - агента (i обезьяны) произвольно выберем K выборки (каждый образец включает в себя p компоненты) из набора данных.

B. Процесс движения вверх

Это поэтапная процедура изменения позиций агентов от исходных позиций к новым, которые должны улучшить целевую функцию. Предназначен для стохастической аппроксимации возмущения на основе псевдоградиента. Для i - агента позиция определяется $X_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,K \cdot p})$, $i = 1, 2, \dots, M$ соответственно. $f(X_i)$ - соответствующее значение пригодности. Процесс задается следующим образом:

- 1) Произвольно генерируем два вектора $\Delta x_i = (\Delta x_{i,1}, \Delta x_{i,2}, \dots, \Delta x_{i,K \cdot p})$, где

$$\Delta x_{ij} = \begin{cases} a \text{ с вероятностью } 1/2 \\ -a \text{ с вероятностью } 1/2 \end{cases} \quad (1)$$

и, $j=1, 2, \dots, K \cdot p$. И a ($a > 0$) – параметр набора высоты, определяется самостоятельно, определяет точность аппроксимации локального решения. Чем меньше параметр, тем точнее решение.

- 2) Вычисляем

$$f'_{ij}(X_i) = \frac{f(X_i + \Delta x_i) - f(X_i - \Delta x_i)}{2\Delta x_{ij}} \quad (2)$$

$j=1, 2, \dots, K \cdot p$. Вектор $f'_{ij}(X_i)$ называется псевдоградиентом целевой функции в точке X_i и описывается $f'_{ij}(X_i) = (f'_{i,1}(X_i), f'_{i,2}(X_i), \dots, f'_{i,K \cdot p}(X_i))$

- 3) Установим

$$y_j = x_{ij} + a \cdot \text{sign}(f'_{ij}(X_i)) \quad (3)$$

$j=1, 2, \dots, K \cdot p$, положим $Y=(y_1, y_2, \dots, y_{K \cdot p})$.

4) Обновим множество значений X_i множеством Y , если множество возможно, в противном случае оставляем без изменений.

5) Повторим шаги (1) - (4), пока не будет достигнуто максимально допустимое количество итераций (называемое номером набора высоты, обозначаемое N_c).

C. Процесс движения локальных прыжков

После процесса подъема каждый агент прибывает на свой локальный максимум. Тогда он должен определить, есть ли другие максимумы больше, чем текущий. При наличии он совершит прыжок туда из текущей позиции, и снова повторит набор высоты, пока не достигнет максимума. Для i - агента позиция определяется $X_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,K \cdot p})$, $i = 1, 2, \dots, M$. Этот процесс задается следующим образом:

- 1) Произвольно выбрать числа для y_j из $(x_{ij}-b, x_{ij}+b)$ $j=1, 2, \dots, K \cdot p$, положим $Y = (y_1, y_2, \dots, y_{K \cdot p})$ и b параметр называется зрением агентов, которые определяется самостоятельно. Чем больше допустимое пространство задачи, тем больше значение.
- 2) Обновим X_i с помощью Y при условии, что и $f(Y) \geq f(X_i)$ и возможны. В противном случае повторим шаг 1), пока не будет найдена соответствующая точка.

D. Процесс сегментации изображения

После повторений процессов локальных прыжков и набора высоты производим сегментацию изображений по алгоритму k -средних и c -средних (KMandFCM), с учетом того, что начальные положения уже найдены.

1. Устанавливаем количество $t = 0$.
2. Шаг КМ: назначьте каждый вектор X_i своему ближайшему центру кластера, используя формулу (4)

$$d(X_i, \mu_j) = \sqrt{\sum_{l=1}^d (x_{il} - \mu_{jl})^2} \quad (4)$$

3. FCM-Step: установите $t = t + 1$.
4. Для каждого кластера C_j вычислите центр μ_j , используя формулу (5)

$$\mu_j^{t+1} = \frac{\sum_{i=1}^N (u_{ji})^m x_i}{\sum_{i=1}^N (u_{ji})^m} \quad (5)$$

5. Вычислить новую матрицу членства $U_{k \times N}^{(t)}$, используя формулу (6)

$$u_{ji}^{t+1} = \left[\sum_{l=1}^k \left(\frac{\|x_i - \mu_j^t\|^2}{\|x_i - \mu_l^t\|^2} \right)^{1/m-1} \right]^{-1} \quad (6)$$

6. Присвойте объекты данных кластерам, используя матрицу членства.
7. Вычислить процентное изменение, используя формулу (7)

$$\text{Percentage change} = \frac{|\psi_t - \psi_{t+1}|}{\psi_t} \times 100 \quad (7)$$

8. Остановите процесс, если процентное изменение $< \alpha$. В противном случае установите $t = t + 1$.
9. Шаг КМ: для каждого кластера C_j вычислите новый центр μ_j , используя формулу (5).
10. Присвойте каждому вектору X_i ближайший центр кластера, используя формулу (6).
11. Вычислить процентное изменение, используя формулу (7).
12. Остановите процесс, если процентное изменение $< \alpha$. В противном случае перейдите к шагу 3.

VI. ЭКСПЕРИМЕНТ

A. Цель эксперимента

Целью эксперимента является подтверждение эффективности авторской модернизированной системы обратной разработки печатных плат.

Задачами эксперимента являются:

1. Определение эффективности авторского алгоритма сегментации в сравнении с существующими алгоритмами FCM, PSO-FCM.
2. Сравнение систем обратной разработки печатных плат, авторской с использованием нового алгоритма сегментации и существующей, предложенной в работе [12].

Эксперимент проводился в среде MATLAB на ЭВМ Asus процессор Intel N5000 ОЗУ 8 ГБ.

B. Эксперимент алгоритма сегментации

Для проведения эксперимента и апробации работы алгоритма сегментации на начальном этапе выбраны три тестовых изображения печатных плат: с защитной маской, с защитным лаковым слоем и без защитных покрытий. Данные изображения были подвергнуты сегментации тремя разными алгоритмами, в том числе и тем, что предложен авторами статьи. Первый алгоритм – это не модифицированный алгоритм нечетких с-средних (Fuzzy C-Means, FCM). Второй – алгоритм нечетких с-средних модифицированный алгоритмом оптимизации роя частиц для поиска начальных точек кластера (Fuzzy C-Means - Particle Swarm Optimization, FCM-PSO). Третьим алгоритмом в данном тесте будет предложенный авторами алгоритм сегментации обезьян на основе к-средних и с-средних алгоритма кластеризации (Monkey Segmentation Based on K-means and Fuzzy C-Means MSbKMandFCM). Для оценки работоспособности алгоритма используем параметры чувствительности (Sensitivity, Se), специфичности (Specificity, Sp) и точности (Accuracy, Acc)

$$Se = TP / (TP + FN) \quad (6)$$

$$Sp = TP / (TN + FP) \quad (7)$$

$$Acc = TP + TN / (TP + FN + TN + FP) \quad (8)$$

где TP - истинно положительный результат, FN - ложный отрицательный, TN - истинно отрицательный, FP - ложный положительный.

Полученные результаты работы алгоритмов внесены в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты работы алгоритмов

Название алгоритма	Чувствительность Se %	Специфичность Sp %	Точность Acc %
FCM	81	93,7	87,6
PSO-FCM	83,6	94,6	92,7
Авторский алгоритм MSbKMandFCM	86,9	98,5	96,5

Как видно из таблицы полученных результатов, предложенный авторами алгоритм превосходит существующие алгоритмы по параметрам чувствительности, точности и специфичности.

C. Эксперимент алгоритма распознавания

Для подтверждения эффективности модернизации системы обратной разработки печатных плат был проведен эксперимент сравнивающий авторский метод работы системы обратной разработки и предложенный в [12], как исходный. Для оценки работоспособности алгоритма используем также параметры чувствительности, специфичности и точности. Полученные результаты работы систем внесены в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты работы систем

Название алгоритма	Чувствительность Se %	Специфичность Sp %	Точность Acc %
Watershred+OCR	60	67	65
Авторский алгоритм MSbKMandFCM + OCR	68,3	76,6	74,3

Как видно из таблицы полученных результатов, предложенная авторами модернизация системы превосходит оригинал по параметрам чувствительности, точности и специфичности.

VII. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами предложена модернизация существующего метода автоматизации обратной разработки печатных плат. В статье проведен анализ текущего состояния проблемы как процесса обратной

разработки в целом, так и средств автоматизации этого процесса – а именно сегментации изображений. В статье предлагается адаптация алгоритма обезьян и алгоритма сегментации k-средних и нечеткого c-средних. Его преимуществом является самостоятельное определение количества кластеров и их центров. Проведено экспериментальное сравнение существующих алгоритмов с авторским. Из проведенных тестов алгоритмов сегментации, предложенный авторами алгоритм превосходит существующие алгоритмы по параметрам чувствительности, точности и специфичности. Так же проведено исследование авторской модернизации существующего метода обратной разработки печатных плат. Исследование показало превосходство авторской модернизации над существующим аналогом. Авторы делают вывод, использование более совершенных алгоритмов сегментации повышают результативность всей системы в целом.

ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-07-0050.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] R. Kishor Duggirala – “Segmentation using hybridization of K-means and Fuzzy C-means algorithms”, Introduction to Data Science and Machine Learning, Mar.2020.
- [2] C. Wang, W. Pedrycz, J. Yang, M. Zhou, and Z. Li, “Wavelet frame-based fuzzy C-means clustering for segmenting images on graphs”, IEEE Transactions on cybernetics, pp. 1-12, 2019.
- [3] K. Zhou and S. Yang, “Effect of cluster size distribution on clustering: a comparative study of k-means and fuzzy c-means clustering”, Patern analysis and applications, vol. 23, no.1, pp. 455-466, Mar. 2019.
- [4] A. Sathish and J. Mohana Sundaram, “A comparative study on k-means and fuzzy c-means algorithm for breast cancer analysis,” International journal of computational intelligence and informatics, vol. 4: no.1, April – June 2014 pp 54-58.
- [5] D. D. Pingale and S. R. Todmal, “Brain tumor segmentation using k-means and fuzzy c-means clustering and its area calculation and stage using SVM algorithm”, Journal of advances and scholarly researches in allied education, vol. 15, no. 3, pp. 27-32, May 2018.
- [6] Frizilin R., Muthukumaravel A. – Comparative analysis of liver segmentation using k-means, fuzzy c-means and spatial fcm using mumford shah approach international journal of recent technology and engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878, Volume -7 Issue 6S3, April, 2019, pp 99-104.
- [7] Курейчик В.М., А.С. Григораш - Программный комплекс решения задачи кластеризации, [Электронный ресурс], <https://elibrary.ru/item.asp?id=29877268>.
- [8] Эль-Хатиб С.А. - Разработка и исследование методов сегментации изображений с применением бионических моделей, [Электронный ресурс], [http://hub.sfedu.ru/media/diss/04acfd27-750f-4644-83ba-105238eb0219/Автореферат_ЭльХатиб_\(05.13.17\).pdf](http://hub.sfedu.ru/media/diss/04acfd27-750f-4644-83ba-105238eb0219/Автореферат_ЭльХатиб_(05.13.17).pdf).
- [9] Ruiqing Zhao Wansheng Tang - Monkey Algorithm for Global Numerical Optimization, Journal of Uncertain Systems Vol.2, No.3, pp.165-176, 2008.
- [10] Xin Chen, Yongquan Zhou, and Qifang Luo -A Hybrid Monkey Search Algorithm for Clustering Analysis, Scientific World Journal Volume 2014, Article ID 938239, 16 pages.
- [11] Ben Johnson - EE368: Reverse Engineering of Printed Circuit Boards, [Электронный ресурс], https://stacks.stanford.edu/file/druid:np318ty6250/Johnson_Reverse_Engineering_PCBs.pdf.
- [12] Stephan Kleber, Henrik Ferdinand Nölscher, Frank Kargl - Automated PCB Reverse Engineering, [Электронный ресурс], <https://www.usenix.org/system/files/conference/woot17/woot17-paper-kleber.pdf>.
- [13] N. Asadizanjani, M. Tehranipoor, and D. Forte, “ PCB reverse engineering using nondestructive X-ray tomography and advanced image processing”, IEEE Transaction on Components, Packaging and Manufacturing Technology, pp. 1-8, 2017.

Reverse PCB Design Using the Monkey Algorithm

A.M. Shtuchnyy, V.M. Kureychik

ICTIS SFU, Taganrog, vmkureychik@sfedu.ru

Abstract — The authors of the article have conducted a study, the purpose of which is to identify the shortcomings of existing methods for the automation of reverse engineering of printed circuit boards and to determine the ways of their modernization. The objective of the article is to develop a new segmentation algorithm for use in computer-aided reverse-circuit development of printed circuit boards. The article provides an overview of the current state of the problem of reverse engineering of printed circuit boards. Conclusions are made about the suitability of the approaches under consideration and possible ways to improve performance. One of the ways of such improvement is the use of modern means of preliminary image processing. A survey of segmentation methods based on the clustering algorithm and existing modern clustering algorithms is reviewed. Conclusions are drawn on the suitability of using this approach. In the article

the authors have proposed a new algorithm for image segmentation. This algorithm is based on a combination of the advantages of monkey algorithms and image segmentation of k-means and s-means. The advantage of this algorithm is the independent determination of the number of segments and their centers, which is ensured by the application of the monkey algorithm and precise image segmentation due to the k-means and c-means algorithm. The authors have conducted an experiment. Its purpose is to confirm the qualities of a modernized reverse circuit board engineering system. The objectives of the experiment are: 1. confirmation of the operability and competitiveness of the algorithm proposed by the authors for image segmentation relative to existing algorithms; 2. confirmation of the competitiveness of the authors' modernized approach to automated reverse circuit board engineering. During the experiment, it was possible to

determine that the image segmentation algorithm proposed by the authors is efficient and competitive. It has greater accuracy than existing systems. The system modernized by the authors also surpasses existing analogues in the field of the number of recognized components. The novelty of this work is the modernization of the method for automating the process of reverse engineering of printed circuit boards. The fundamental difference is the use of a new segmentation method based on k-means algorithms and fuzzy c-means image segmentation and the monkey algorithm.

Keywords — reverse engineering, reverse engineering of printed circuit boards, segmentation algorithms, k-means, fuzzy c-means, monkey algorithm.

REFERENCES

- [1] R. Kishor Duggirala – “Segmentation using hybridization of K-means and Fuzzy C-means algorithms”, Introduction to Data Science and Machine Learning, Mar.2020.
- [2] C. Wang, W. Pedrycz, J. Yang, M. Zhou, and Z. Li, “Wavelet frame-based fuzzy C-means clustering for segmenting images on graphs”, IEEE Transactions on cybernetics, pp. 1-12, 2019.
- [3] K. Zhou and S. Yang, “Effect of cluster size distribution on clustering: a comparative study of k-means and fuzzy c-means clustering”, Patern analysis and applications, vol. 23, no.1, pp. 455-466, Mar. 2019.
- [4] A. Sathish and J. Mohana Sundaram, “A comparative study on k-means and fuzzy c-means algorithm for breast cancer analysis,” International journal of computational intelligence and informatics, vol. 4: no.1, April – June 2014 pp 54-58
- [5] D. D. Pingale and S. R. Todmal, “Brain tumor segmentation using k-means and fuzzy c-means clustering and its area calculation and stage using SVM algorithm”, Journal of advances and scholarly researches in allied education, vol. 15, no. 3, pp. 27-32, May 2018.
- [6] Frizilin R., Muthukumaravel A. – Comparative analysis of liver segmentation using k-means, fuzzy c-means and spatial fcm using mumford shah approach international journal of recent technology and engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878, Volume -7 Issue 6S3, April, 2019, pp 99-104.
- [7] Kureychik V.M., Grigorash A.S. – Programnyy kompleks resheniya zadachi clasterizacii (The software package for solving the clustering problem) [Electronic resource], <https://elibrary.ru/item.asp?id=29877268> (in Russian).
- [8] Khatib S.A. – Razrabotka i issledovanie metodov segmentacii izobrazheniy s primeneniem bionicheskikh modeley (Development and research of image segmentation methods using bionic models) [Electronic resource], [http://hub.sfedu.ru/media/diss/04acfd27-750f-4644-83ba-105238eb0219/\(05.13.17\).pdf](http://hub.sfedu.ru/media/diss/04acfd27-750f-4644-83ba-105238eb0219/(05.13.17).pdf) (in Russian).
- [9] Ruiqing Zhao Wansheng Tang - Monkey Algorithm for Global Numerical Optimization, Journal of Uncertain Systems Vol.2, No.3, pp.165-176, 2008.
- [10] Xin Chen, Yongquan Zhou, and Qifang Luo -A Hybrid Monkey Search Algorithm for Clustering Analysis, Scientific World Journal Volume 2014, Article ID 938239, 16 pages.
- [11] Ben Johnson - EE368: Reverse Engineering of Printed Circuit Boards, [Электронный ресурс], https://stacks.stanford.edu/file/druid:np318ty6250/Johnson_Reverse_Engineering_PCBs.pdf.
- [12] Stephan Kleber, Henrik Ferdinand Nölscher, Frank Kargl - Automated PCB Reverse Engineering, [Электронный ресурс], <https://www.usenix.org/system/files/conference/woot17/woot17-paper-kleber.pdf>.
- [13] N. Asadizanjani, M. Tehranipoor, and D. Forte, “ PCB reverse engineering using nondestructive X-ray tomography and advanced image processing”, IEEE Transaction on Components, Packaging and Manufacturing Technology, pp. 1-8, 2017.