

А. С. Наумов, инженер-программист, e-mail: alex.naumov53@mail.ru  
ООО "Электра-Н", Великий Новгород, 173003

## Разработка программного обеспечения для реконструкции фрагментированных изображений

*Рассмотрены технические аспекты разработки программного комплекса автоматизированной сборки фрагментированных изображений, предназначенного для восстановления разрушенных объектов с плоской поверхностью в криминалистике, реставрации, археологии. Описана общая архитектура комплекса, логика работы и механизмы взаимодействия отдельных компонентов. Разработаны форматы хранения данных, рассмотрены особенности практической реализации используемых методов, моделей и алгоритмов.*

**Ключевые слова:** программный комплекс, реконструкция изображений, стыковка фрагментов, композиция, контур, атрибут, визуализация, формат XML

### Введение

Автоматизация и виртуализация процесса восстановления фрагментированных объектов являются актуальными задачами в криминалистике, археологии, реставрации и архивном деле [1]. В большинстве случаев подобное восстановление предполагает подбор стыкующихся между собой фрагментов с последующей сборкой композиции из найденных пар. Выполнение таких операций вручную требует значительных временных и человеческих ресурсов, приводит к физическому разрушению материалов.

К настоящему времени опубликовано значительное число работ, посвященных автоматизированной реконструкции керамических изделий [2], бумажных документов [3], фотографий [4], [5], фресковых композиций [6], а также общим теоретическим аспектам сравнения формы объектов [7]. Значимым примером является проект Института Фраунгофера по восстановлению документов архива Госбезопасности Восточной Германии [8].

В российской практике известны примеры виртуальной реконструкции фресок путем подбора положения фрагментов по фотографиям, сделанным до разрушения [9], однако подобная работа не предусматривала непосредственно автоматизированного поиска стыков.

Реконструкция относительно плоских объектов может быть сведена к задаче синтеза двухмерного цифрового изображения из фрагментов произвольной формы. Для этого

используют изображения поверхности фрагментов, дополненные информацией об их характеристиках, формируемой вручную оператором-экспертом.

Реконструкция фрагментированного изображения состоит из следующих этапов.

1. Оцифровка материалов путем сканирования или фотографирования.

2. Формирование дескрипторов фрагментов, в частности:

- предварительная обработка изображений (сегментация, выделение отдельных фрагментов, их маркировка и сохранение);
- анализ изображений для описания отдельных характеристик;
- формирование и сохранение дескрипторов.

3. Поиск и локализация стыков, осуществляемые путем перебора потенциальных пар фрагментов и сравнения их характеристик по выбранным критериям.

4. Синтез и визуализация изображения композиции на основе найденных стыков.

Ранее автором был получен ряд теоретических результатов в рамках данной проблемы, в том числе предложены новые математические методы и алгоритмы сравнения характеристик фрагментов и синтеза композиции. Для их практической реализации и экспериментальных исследований автор разрабатывает соответствующий программный комплекс. В работе рассмотрены технические особенности подобного комплекса, основные аспекты его разработки и применения.

## 1. Постановка задачи

По результатам исследования проблемы автоматизированной реконструкции изображений из фрагментов [10] автором были разработаны методы описания и сравнения геометрических и цветовых характеристик контурной линии фрагмента с использованием многооткликовых статистических моделей [11], динамической модификации контура [12], а также метод сравнения цветовой палитры фрагментов. Эти методы ранее были реализованы автором в виде отдельных программ, на которые получены свидетельства о государственной регистрации. Предложен комплексный подход к поиску стыков двух фрагментов на основе совокупности их характеристик, а также алгоритмы синтеза и визуализации композиции [13].

Полученные результаты представляют собой основу технологии реконструкции, которая может быть использована для сборки таких объектов, как разорванные и разрезанные бумажные документы, керамические изделия, фрески и другие материалы с относительно плоской поверхностью. В дальнейшем технология может быть расширена и дополнена новыми методами.

Упрощенная схема технологии приведена на рис. 1. Она включает в себя основной каркас, обобщенно реализующий функции обработки исходных данных, поиска стыков, синтеза и визуализации композиции, а также дополнительные модули, отвечающие за описание и сравнение отдельных характеристик фрагментов.

К разрабатываемому программному обеспечению предъявлены следующие требования.

1. Реализация всех этапов реконструкции от ввода фрагментов до сохранения результирующих композитных изображений.

2. Реализация ранее разработанных автором методов и алгоритмов.

3. Возможность анализа тестовых выборок фрагментов для уточнения критериев сравнения их характеристик.



Рис. 1. Обобщенная схема технологии реконструкции: M1...MN — модули описания и сравнения характеристик фрагментов

4. Разделение функциональности в соответствии с этапами реконструкции.

5. Учет количественных параметров качества сборки.

6. Возможность последующего расширения функциональности за счет включения модулей работы с дополнительными характеристиками фрагментов.

7. Доступность аппаратных и программных средств.

Разрабатываемый комплекс предполагает обработку ограниченных объемов исходных данных (не более 1,5—2 тысяч фрагментов) и предназначен прежде всего для исследовательских целей. Предполагается сочетание автоматических вычислительных процедур и работы оператора-эксперта на всех этапах реконструкции.

## 2. Состав программного комплекса

С учетом указанных выше требований предложена архитектура программного обеспечения, предполагающая разделение на три отдельные программы (рис. 2), взаимодействующие между собой через хранилище данных и использующие общую библиотеку модулей.

*Программа описания фрагментов* (ПОФ) предназначена для ввода и обработки исходных данных с последующим формированием библиотеки фрагментов и их дескрипторов в соответствии с заданным набором описываемых характеристик.

*Программа поиска стыков* (ППС) осуществляет перебор потенциально возможных пар фрагментов, сравнение их характеристик, выявление и локализацию области стыка, а также расчет взаимного расположения фрагментов. В программу включены функции анализа из-



Рис. 2. Структура программного комплекса

вестных стыков для подбора параметров критериев сравнения (анализ тестовых выборок).

*Программа визуализации композиции (ПВК)* осуществляет синтез, визуализацию и сохранение результирующего изображения реконструированной композиции на основе найденных пар стыкующихся между собой фрагментов, а также реализует процедуры оценки качества проведенной реконструкции.

Хранилище данных осуществляет функцию долговременного хранения информации, формируемой в процессе работы указанных программ, и в простейшем случае представляет собой файловую систему с соответствующей структурой каталогов, форматами файлов и соглашениями по их именованию. К хранимым данным относятся:

- исходные изображения совокупностей фрагментов;
- выделенные изображения отдельных фрагментов;
- дескрипторы фрагментов;
- дескрипторы стыков;
- результирующие изображения.

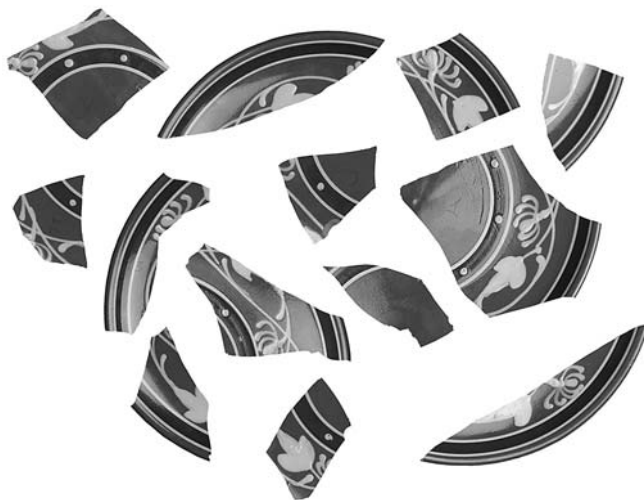
Модули описания и сравнения отдельных характеристик фрагментов реализованы в виде библиотек, совместно используемых ПОФ и ППС.

Данная архитектура обеспечивает оптимальное разделение функциональности, аппаратных и людских ресурсов и позволяет выполнять отдельные этапы реконструкции в разные временные промежутки. Изменения, вносимые в одну из программ, в минимальной степени затрагивают остальные.

### **3. Логика работы и функциональные возможности программ**

Реализуемая технология предполагает использование следующих характеристик фрагментов для поиска и локализации стыка:

- внешние атрибуты, задаваемые оператором;
- геометрический и цветовой контур, представленный в нескольких вариантах с различными детализацией, способом выбора узловых точек и числом описываемых параметров;
- векторы, описывающие такие характеристики, как направление строк текста, мазков кисти и иные геометрические особенности изображений на поверхности;
- цветовая палитра изображения;
- текстурные характеристики.



**Рис. 3. Исходное изображение группы фрагментов**

На вход программы описания подаются сканированные изображения групп фрагментов на контрастном фоне (рис. 3), после чего выполняется их автоматическая сегментация с выделением контура. Она включает в себя:

- построение бинарной маски изображения, на которой пикселям фона соответствует значение 0, а пикселям фрагментов — значение 1;
- обход контура с одновременным определением границ фрагмента;
- копирование области фрагмента с сохранением его изображения в отдельный файл;
- создание и сохранение заготовки дескриптора.

После формирования заготовок по команде пользователя выполняется дальнейшая обработка:

- удаление ошибочных фрагментов;
- описание контура [10, 11] с возможностью ручного задания границ участков (сегментов);
- задание внешних атрибутов (тип краски, тип материала, толщина фрагмента и т.п.);
- задание векторных характеристик;
- описание цвета и текстуры;
- сохранение данных в файл дескриптора.

Результатом работы программы описания является набор изображений фрагментов и их дескрипторов, сохраняемых в отдельные файлы, структура которых описана далее.

Предусмотрена возможность автоматической классификации фрагментов на основе внешних атрибутов [13], что позволяет кратно снизить размерность задачи поиска стыков за счет исключения заведомо невозможных вариантов.

Поскольку в реальных задачах (особенно связанных с реконструкцией фресковых композиций) качественное выделение границ объекта затруднено вследствие разрушений материала, в программе предусмотрен режим ручного выделения контура посредством его отрисовки с использованием графического планшета.

На вход программы поиска стыков поступают следующие данные:

- список фрагментов, в рамках которого осуществляется поиск;
- дескрипторы фрагментов;
- протокол сравнения.

Поиск стыков осуществляется путем полного перебора доступных пар фрагментов из всего множества или отдельных классов с последующим сравнением их характеристик и локализацией области стыка, для чего используется трехэтапный метод сравнения характеристик, предложенный автором в работе [13]. Он позволяет повысить достоверность идентификации стыков за счет использования совокупности признаков и является дополнительным фактором ограничения перебора для оптимизации производительности. Суть метода заключается в последовательном отсеивании неподходящих вариантов, при этом сравнение наиболее вычислительно сложных характеристик по возможности выполняется на более поздних стадиях конвейера. Метод включает в себя классификацию фрагментов, поиск и подтверждение стыков.

Порядок сравнения характеристик, их значимость и критерии определяются протоколом сравнения — структурой данных, описываемой в виде XML-документа. Локализация об-

ластей стыков проводится путем выявления совмещающихся сегментов контура [12].

Для каждого найденного стыка формируется дескриптор, содержащий параметры взаимной привязки фрагментов, который в виде XML-документа сохраняется в заданный каталог.

Предусмотрена процедура ручного подтверждения стыков, в ходе которой эксперту предлагается просмотреть найденные варианты стыков между двумя фрагментами, выбрав наиболее подходящий из них. Для уменьшения трудоемкости оператору отображается не более пяти ранжированных по весу вариантов. Результатом работы программы является набор дескрипторов стыков.

В зависимости от требуемого уровня автоматизации и особенностей конкретной задачи возможны различные пути реализации синтеза и визуализации композиции. В данном комплексе реализован метод, основанный на обходе графа связности в ширину с учетом факторов приоритета. Модель композиции представляется взвешенным неориентированным графом, в котором каждая вершина соответствует фрагменту, а ребро — стыку между фрагментами. Вес ребра является интегральной характеристикой, учитывающей длину стыка и значения критериев сравнения. Алгоритм синтеза описан в работе [13].

Программа визуализации композиции может быть использована как для ручной, так и для автоматизированной реконструкции объектов и предусматривает следующий набор функций:

- загрузка дескрипторов стыков;
- просмотр одиночных фрагментов;
- просмотр стыкующихся пар;
- сборка участка композиции с обходом графа от выбранного фрагмента и заданной глубиной;
- коррекция параметров стыка как в числовой форме, так и за счет перемещения изображений в графическом интерфейсе;
- сохранение и загрузка дескриптора композиции;
- оценка качества сборки;
- сохранение результирующих изображений.

Для оценки качества сборки предусмотрена возможность построения карты перекрытий (рис. 4), отражающей отношение площадей зон

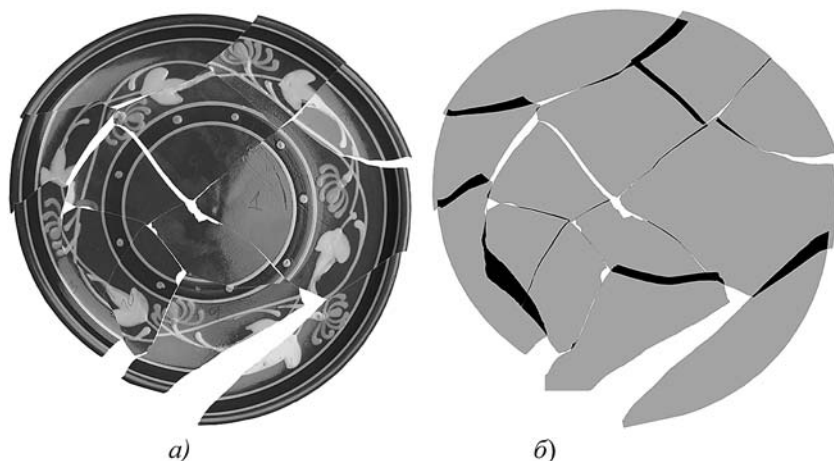


Рис. 4. Изображение собранной композиции (а) и соответствующей ей карты перекрытий (б)

взаимного наложения фрагментов к их общей площади. Идеальная композиция не должна содержать перекрытий, однако в реальных задачах можно говорить лишь о минимизации их количества. Технология предусматривает проверку глобальной совместимости фрагментов (размеры и форма композиции, приоритет стыков, образующих общий угол трех и более фрагментов) [13], реализация данного функционала будет выполнена в рамках дальнейших этапов разработки.

#### 4. Организация хранения данных

Исходные материалы предоставляются в виде цветных изображений формата TIFF или JPEG, после обработки которых программа описания фрагментов формирует BMP-файлы формата ARGB глубиной цвета 8 бит на канал. Альфа-канал изображения представляет собой маску выделения, в которой пикселям фона соответствует значение 0, пикселям фрагмента — значение 255.

Дескрипторы фрагментов хранятся в XML-формате, обеспечивающем иерархическую структуру данных, пригодном для ручного редактирования и обеспечивающем расширяемость описания по мере развития функциональности комплекса. Документ имеет следующую структуру:

```
<fragment id="" description="">
  <image></image>
  <features>
    <feature1>
      ...
    </feature1>
    ...
    <featureN>
      ...
    </featureN>
  </features/>
</fragment>.
```

Для корневого элемента `<fragment>` определяются уникальный идентификатор (`id`) и описание (`description`) в виде атрибутов. Элемент `<image>` содержит путь к файлу с изображением. Далее следуют элементы `<feature>`, содержащие описания отдельных характеристик. Внутренняя структура каждого из этих элементов определяется и формируется соответствующим модулем описания.

Дескрипторы стыков и композиций хранятся в XML-документах следующей структуры:

```
<composition id="" description="">
  <fragments>
    <fragment id="" description="">
      <image></image>
    </fragment>
  <matches>
    <match id1="" id2="" weight="">
      <point1 x="" y=""/>
      <point2 x="" y=""/>
      <vector1 x="" y=""/>
      <vector2 x="" y=""/>
    </match>
  </matches>
</composition>.
```

Корневой элемент `<composition>` также содержит атрибуты идентификатора и описания. Элемент `<fragments>` задает перечисление фрагментов, входящих в данную пару или композицию. Элементы `<match>` описывают стык двух фрагментов с идентификаторами `id1` и `id2` соответственно и содержат информацию об их взаимном расположении — координаты точки привязки (элементы `<point1>` и `<point2>`) и вектора, соответствующего области стыка (`<vector1>` и `<vector2>`) на первом и втором фрагментах соответственно. На основе этой информации программа визуализации композиции выполняет геометрическую трансформацию изображений фрагментов при синтезе конечного изображения так, чтобы области стыка оказались совмещены.

Протокол сравнения описывает последовательность и критерии сравнения характеристик фрагментов, а также параметры их применения. Файл имеет следующую структуру:

```
<compare name="" description="">
  <feature1 opt="false">
    ...
  </feature1>
  <alt>
    <feature2 opt="false">
      ...
    </feature2>
    <feature3 opt="false">
      ...
    </feature3>
  </alt>
</compare>.
```

Корневой элемент `<compare>` содержит элементы описания критериев сравнения ха-

рактических (<feature>) в порядке их выполнения, при этом атрибут `opt` определяет опциональность или обязательность выполнения данного критерия при переходе к дальнейшим этапам обработки. Элементы <alt> определяют группу альтернативного выбора, в рамках которой для перехода к последующим этапам требуется выполнение любого из входящих в нее критериев [13]. Внутренняя структура элементов <feature> определяется соответствующими модулями сравнения.

Изображения результирующих композиций сохраняются в форматах BMP, TIFF или JPG.

## 5. Особенности реализации

Компоненты комплекса разработаны на языке C# с использованием платформы .NET Framework 4.0 в среде разработки Microsoft Visual Studio 2010. Программы выполнены в виде приложений архитектуры x86 и x64 с графическим интерфейсом пользователя на основе технологии Windows Forms.

Все программы используют многопоточную организацию вычислений. Взаимодействие между программами осуществляется только через файловую систему.

Масштабирование комплекса достигается за счет одновременной работы нескольких экземпляров приложений на различных компьютерах, объединенных в локальную сеть. При работе с программой описания фрагментов каждый пользователь выполняет описание своей порции фрагментов, сохраняя их в общий сетевой каталог. Программа поиска стыков также может быть запущена на разных компьютерах, при этом для каждого экземпляра программы имеется возможность задать свой диапазон перебора фрагментов. В дальнейшем предполагается разделить ППС на два отдельных приложения так, чтобы с помощью единого графического интерфейса можно было управлять несколькими модулями вычислений.

Алгоритмы описания и сравнения характеристик фрагментов реализованы в виде отдельных проектов, которые после компиляции формируют DLL-библиотеки со стандартизированным интерфейсом. Это позволяет упростить поддержку и обновление программного обеспечения, поскольку модули описания и сравнения характеристик являются независимыми от общей логики работы приложений.

Загрузка данных модулей реализована с помощью механизма позднего связывания (рефлексии), что позволяет легко вносить изменения в конфигурацию программы за счет их замены или добавления. Требуется лишь внести соответствующие изменения в настройки программы и протокол сравнения.

Предусмотрено ведение текстовых логов работы программ, в которые заносится информация о выполняемых операциях.

## 6. Достигнутые результаты

Разработка комплекса предполагает итеративный подход, в ходе которого проводится постепенная доработка и расширение его функциональности по результатам нескольких этапов тестирования и практических экспериментов.

В настоящее время завершен первый этап данного процесса, предполагающий реализацию базового функционала программ, проверку общей работоспособности комплекса и основных элементов технологии реконструкции. Отладку и тестирование проводили на фрагментах керамических изделий (см. рис. 3), фресок (рис. 5) и бумажных документов (рис. 6) общим числом около 250 штук. Изображения керамических изделий были получены путем фотографирования, а фресок и документов — с помощью планшетного сканера. Для всех материалов была использована единая последовательность сравнения характеристик, различия состояли в параметрах настройки конкретных методов описания, критериев сравнения и разрешении исходных изображений.

Вначале была проведена классификация фрагментов по их толщине, типу материала

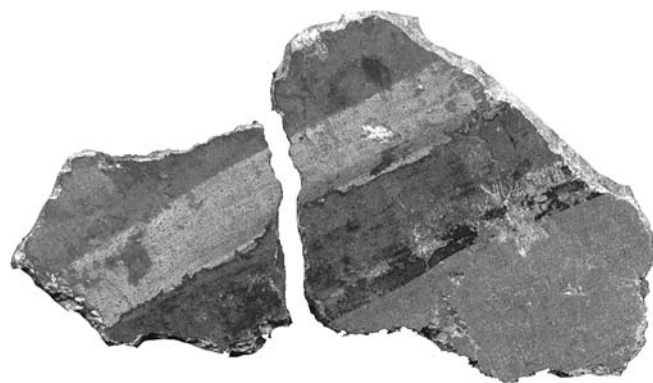


Рис. 5. Фрагменты фресок с ярко выраженным сочетанием цветовых и геометрических характеристик контура в месте разлома

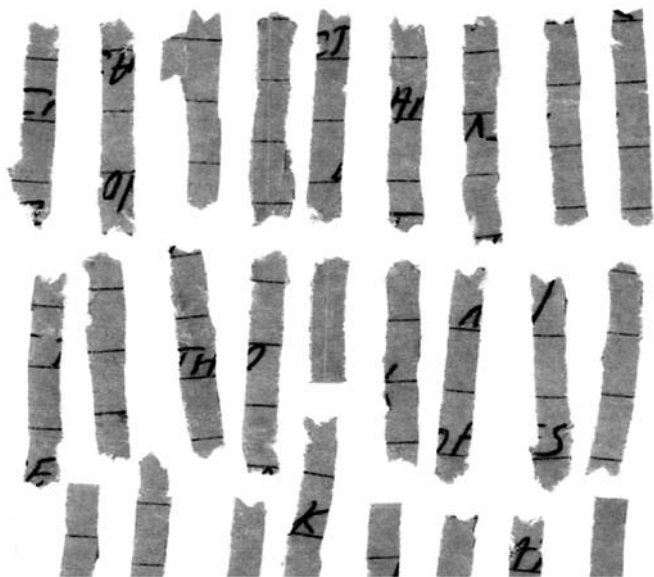


Рис. 6. Fragменты шредерованных бумажных документов представляют сложность для реконструкции ввиду малой степени уникальности формы

и цвету, после чего выполнено грубое сравнение контуров и локализация стыков методом динамической модификации контура [12]. Найденные стыки с более высокой степенью детализации подтверждались методом многооткликовой статистической модели [11], после чего выполнялось сравнение векторов (направлений строк текста, мазков кисти, расположения геометрических линий). Сравнение цветовой палитры фрагментов использовалось как опциональный критерий для ранжирования идентифицированных стыков в процессе

последующего ручного утверждения. В завершение выполнялись синтез композиции и редактирование результатов.

В ходе отладки и пробных экспериментов работоспособность программ и элементов технологии была успешно подтверждена, что позволяет приступить к их дальнейшей доработке в целях создания полнофункциональной версии продукта и ее последующей апробации с участием специалистов в области реставрации и криминалистики. Достигнуты приемлемые показатели качества реконструкции отдельных примеров, в частности, для объекта, представленного на рис. 7 (керамическая тарелка), из 25 стыков было обнаружено 17 (из них один ложный), что в конечном итоге позволило корректно совместить 12 фрагментов из 13 и восстановить 91 % общей площади объекта. Доля перекрытий при этом не превысила 6 %. Для фресковых фрагментов, как правило, удается обнаружить не более 20 % стыков, что объясняется сильными повреждениями их лицевой поверхности. По мере дальнейших экспериментов будет проводиться доработка программного обеспечения и общей методики реконструкции для повышения ее эффективности и результативности.

Практические особенности сборки различных материалов, включая настройки алгоритмов описания и сравнения характеристик, а также количественные и качественные оценки результатов являются темой отдельных исследований и будут рассмотрены автором в следующих публикациях.



Рис. 7. Общий вид главного окна программы визуализации композиции

В настоящее время создана версия программного комплекса, реализующая предложенную архитектуру, логику работы и механизмы взаимодействия компонентов с учетом выбранных аппаратных и программных средств. Комплекс позволяет выполнять описание фрагментов, поиск стыков и визуализацию результирующей композиции с учетом базового набора обрабатываемых характеристик (контуры, атрибуты, цветовая палитра и векторы) на ограниченных наборах исходных данных.

Проведенные пробные эксперименты по реконструкции керамических фрагментов, фресковых композиций и бумажных документов показали принципиальную работоспособность как самого программного обеспечения, так и используемых в нем теоретических разработок, ранее предложенных автором. Сформулированы задачи по дальнейшему развитию продукта.

Ведется доработка комплекса в части включения методов работы с текстурными характеристиками, проверки совместимости фрагментов на глобальном уровне композиции, оптимизации рабочего процесса. В рамках создания полнофункциональной версии продукта будет проведена доработка пользовательского интерфейса, вычислительная оптимизация компонентов комплекса и уточнение отдельных алгоритмов.

Достигнуты договоренности об апробации программного обеспечения на базе Центра реставрации монументальной живописи Новгородского музея-заповедника. Подана заявка на государственную регистрацию программы визуализации композиции под названием "Программа визуализации фрагментированного изображения" и ведется подготовка документации для регистрации остальных компонентов комплекса.

*Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям).*

1. Willis A. R., Cooper D. B. Computational reconstruction of ancient artifacts // IEEE Signal Processing Magazine. 2008. Vol. 25, N. 4. P. 65–83.
2. Leitao H. C., Stolfi J. Multiscale method for the reassembly of two-dimensional fragmented objects // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. Vol. 24, N. 9. P. 1239–1251.
3. Deever A., Gallagher A. Semi-automatic assembly of real cross-cut shredded documents // Proceedings 19th IEEE International Conference on Image Processing, ICIP 2012. 2012. P. 233–236.
4. Shengjiao C., Hairong L., Shuicheng Y. Automated assembly of shredded pieces from multiple photos // Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia & Expo (ICME). 2010.
5. Amigoni F., Gazzani S., Podico S. A method for reassembling fragments in image // Proceedings of International conference on image processing ICIP 2003. 2003. Vol. 2, N. 3. P. 581–584.
6. Papaodysseus C., Panagopoulos T. Contour-shape based reconstruction of fragmented 1600 B. C. wall paintings // IEEE Transactions on Signal Processing. 2002. Vol. 50, N. 6. P. 1277–1288.
7. Kong W., Kimia B. On solving 2D and 3D puzzles under curve matching // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2001. Vol. 2, N. 10. P. 583–590.
8. Nickolay B., Schneider J. Automated Virtual Reconstruction // Fraunhofer IPK. URL: <http://www.ipk.fraunhofer.de/en/divisions/automation-technology/departments/security-technology/core-rd-activities-of-the-security-technology-department/virtual-reconstruction/automated-virtual-reconstruction-of-ripped-stasi-files/> (дата обращения: 02.02.2018).
9. Анисимова Т. И., Зотов А. В., Поневаж А. В. Использование компьютерной технологии при реставрации живописи XIV в. церкви Успения на Волотовом поле // URL: <http://art-con.ru/node/477> (дата обращения: 02.02.2018).
10. Наумов А. С., Луций С. А. Формирование дескриптора контурной линии в задаче синтеза изображения из фрагментов произвольной формы // Вестник НовГУ, Сер.: Естеств. и техн. науки. 2012. № 68. С. 68–74.
11. Наумов А. С. Стыковка фрагментов изображения по многооткликовой модели контурной линии // Вестник НовГУ, Сер.: Техн. Науки. 2015. № 7 (90). С. 11–14.
12. Наумов А. С. Стыковка фрагментов изображения по геометрическому и цветовому контурам // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 9. С. 16–21.
13. Наумов А. С. Метод автоматизированной реконструкции фрагментированных изображений на основе совокупности признаков фрагментов // Информационные технологии. 2016. Том 22, № 1. С. 48–53.



## Fragmented Image Reconstruction Software Development

Article deals with the technical aspects of the software complex development, which is intended for an automated fragmented image reassembling. This software could be used for a flat objects reconstruction with two-dimensional digital images in forensics, archeology, restoration and archive science. Complex is based on previous author's research and theoretical results. Software architecture features, work logic and program interaction mechanisms of the software are described in the article.

Software complex consist of three separate programs, developed with C# language for the .NET 4.0 platform. Fragment description program performs image preparation and feature description. Match searching program performs matching pairs searching and joint localization. Composition visualizer constructs final reassembled images of the composition.

Software architecture provides separation of the basic logic and algorithms for fragment features description and comparing, so that particular feature set could be changed, expanded or reduced for the current application without basic logic change. Data storage formats for a fragment and match descriptors are based on the XML documents. Intermediate images are stored in the ARGB BMP format files.

Match searching is based on the geometrical and color contours, color palette, texture, other features of the surface and user-defined attributes. Software implements some commonly known feature description methods as well as previously developed by the author, such as contour description method, based on multi-response statistical models, and 3-stage multi-feature match searching algorithm. Examples of ceramic fragments reassembling and some other practical results are presented.

**Keywords:** software complex, image reconstruction, fragment matching, joint searching, composition, contour, attribute, visualization, XML format

DOI: 10.17587/it.24.487-495

### References

1. Willis A. R., Cooper D. B. Computational reconstruction of ancient artifacts, *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008. vol. 25, no. 4, pp. 65–83.
2. Leitao H. C., Stolfi J. Multiscale method for the reassembly of two-dimensional fragmented objects, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, vol. 24, no. 9, pp. 1239–1251.
3. Deever A., Gallagher A. Semi-automatic assembly of real cross-cut shredded documents, *Proceedings 19th IEEE International Conference on Image Processing, ICIP 2012*, 2012, pp. 233–236.
4. Shengjiao C., Hairong L., Shuicheng Y. Automated assembly of shredded pieces from multiple photos, *IEEE International Conference on Multimedia & Expo (ICME)*, 2010. Proceedings.
5. Amigoni F. Gazzani S., Podico S. A method for reassembling fragments in image, *International conference on image processing ICIP 2003. Proceedings*, 2003, vol. 2, no. 3, pp. 581–584.
6. Papaodysseus C., Panagopoulos T. Contour-shape based reconstruction of fragmented 1600 B. C. wall paintings, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, vol. 50, no. 6, pp. 1277–1288.
7. Kong W., Kimia B. On solving 2D and 3D puzzles under curve matching, *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001, vol. 2, no. 10, pp. 583–590.
8. Nickolay B., Schneider J. Automated Virtual Reconstruction, *Fraunhofer IPK*. URL: <http://www.ipk.fraunhofer.de/en/divisions/automation-technology/departments/security-technology/core-rd-activities-of-the-security-technology-department/virtual-reconstruction/automated-virtual-reconstruction-of-ripped-stasi-files/> (date of access: 02.02.2018).
9. Anisimova T. I., Zotov A. V., Ponevazh A. V. *Ispol'zovanie komp'yuternoy tehnologii pri restavracii zhivopisi XIV v. cerkvi Uspenija na Volotovom pole* (Using computer technology for XIV century painting restoration of the "Uspenija na Volotovom pole" church), URL: <http://art-con.ru/node/477> (date of access: 02.02.2018) (in Russian).
10. Naumov A. S., Lucij S. A. Formirovanie deskriptora konturnoj linii v zadache sinteza izobrazhenija iz fragmentov proizvol'noj formy (Contour descriptor forming for the arbitrary shaped fragments image synthesis problem), *Vestnik NovGU, ser.: Estestv. i tehn. nauki*, 2012, no. 68, pp. 68–74 (in Russian)
11. Naumov A. C. Stykovka fragmentov izobrazhenija po mnogootklikovoj modeli konturnoj linii (Image fragment matching using multiresponse contour line model), *Vestnik NovGU, Ser.: Tehn. Nauki*, 2015, no. 7 (90), pp. 11–14 (in Russian)
12. Naumov A. S. Stykovka fragmentov izobrazhenija po geometricheskomu i cvetovomu konturam (Image fragment matching using geometrical and color contour), *Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tehnologij*, 2013, no. 9, pp. 16–21 (in Russian)
13. Naumov A. S. Metod avtomatizirovannoj rekonstrukcii fragmentirovannyh izobrazhenij na osnove sovokupnosti priznakov fragmentov. (Method for automated reconstruction of the fragmented images based on multiple fragment features), *Informacionnye tehnologii*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 48–53 (in Russian)