

УДК 004.9

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

Метод автоматизированной реконструкции фрагментированных изображений на основе совокупности признаков фрагментов

Рассмотрена проблема использования совокупности признаков фрагментов при автоматизированной реконструкции фрагментированных изображений в приложении к восстановлению разрушенных материалов в криминалистике, археологии, реставрации и других областях. Предложен универсальный трехэтапный метод автоматизированного поиска стыков фрагментов на основе совокупности признаков, использующий принцип конвейерной обработки. Рассмотрен алгоритм синтеза изображения на основе найденных стыков. Показаны их особенности и преимущества.

Ключевые слова: стыковка фрагментов, реконструкция изображения, классификация, поиск, верификация, граф, дескриптор фрагмента, поиск в ширину, конвейерная обработка

Введение

В различных прикладных областях, таких как реставрация, криминалистика, музейное и архивное дело, возникает задача восстановления механически фрагментированных объектов: фресок, керамических изделий, бумажных документов, фотографий и других материалов. Традиционный подход к ее решению — это ручной подбор стыкующихся между собой фрагментов для последующего воссоздания композиции, соответствующей исходному объекту. Такой процесс предполагает выполнение большого объема малоэффективной ручной работы, которая приводит к необратимому разрушению материалов в процессе физического кон-

такта с ними. Актуальным направлением исследований является внедрение в этот процесс перспективных информационных технологий, в частности, создание методов его автоматизации с использованием компьютерной техники и соответствующего программного обеспечения, что позволит перенести процесс реконструкции в виртуальную среду и многократно повысить его эффективность.

Рассмотрим класс задач, предполагающих реконструкцию материалов с плоской поверхностью, которая может быть сведена к задаче синтеза изображения из фрагментов произвольной формы. Для этого используют двумерные цифровые изображения поверхности фрагментов, полученные путем сканирования или фотографирования, а также дополнительную информацию об их свойствах, задаваемую вручную или автоматически. На рис. 1 показан пример фрагментированного объекта.

Процесс автоматизированной реконструкции изображения объекта в общем виде включает следующие этапы (рис. 2):

- оцифровка материалов;
- формализация и описание характеристик (признаков) фрагментов с использованием соответствующих математических моделей;
- перебор пар фрагментов в целях сравнения признаков и выявления стыков;
- синтез изображения композиции на основе стыкующихся пар фрагментов.

В зарубежных источниках рассматриваемой проблеме посвящено значительное число публикаций. В качестве примера можно привести работы [1] и [2] (описана реконструкция керамических изделий),



Рис. 1. Изображение фресковой композиции

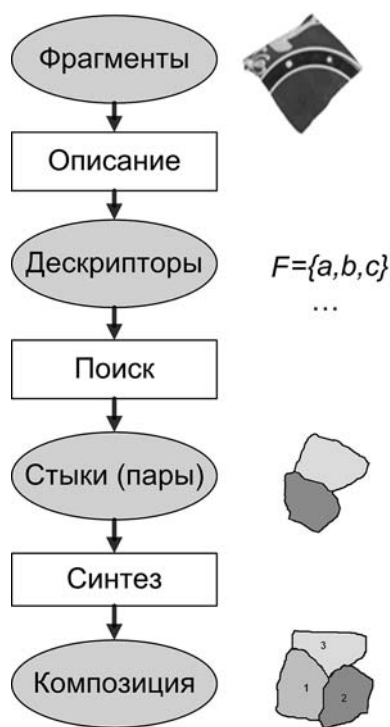


Рис. 2. Схема процесса реконструкции

[3] и [4] (реконструкция бумажных документов), [5] и [6] (реконструкция фотографий). Анализ литературы показывает, что практически все предложенные подходы базируются на конкретных примерах и задачах, следовательно, имеют ограниченную сферу применения и невысокую практическую ценность. Рассматриваются материалы какого-либо одного конкретного типа, учитываются их одиночные признаки. Таким образом, проблема в определенной степени разработана на уровне отдельных характеристик фрагментов, но не рассматривается в комплексе, на более общем концептуальном уровне с точки зрения обеспечения универсальности методов и их применения. В открытых источниках не удалось найти публикаций, затрагивающих подобные аспекты, также отсутствует единая терминология в рассматриваемой области.

Возникает задача создания обобщенного метода реконструкции, позволяющего использовать различные (существующие и перспективные) способы описания и сравнения отдельных признаков фрагментов, однако обеспечивающего их совместное применение и универсальный подход, не привязанный к специфике конкретной задачи. Такой метод предложен автором и описан в данной статье. Совместное применение совокупности признаков призвано повысить эффективность и результативность процесса реконструкции за счет максимального полного использования доступной информации о свойствах фрагментов. Общая структура метода является универсальной, а адаптация к конкретным задачам происходит за счет изменения набора и процедур сравнения отдельных признаков.

1. Признаки фрагментов и их дескрипторы

Поиск стыков фрагментов осуществляется путем сравнения их характеристик (признаков). Типичными признаками являются геометрический и цветовой контур, текстура, цветовая палитра, особенности материала, семантические свойства изображения и т.д. Их обзор и классификация представлены в работах [7], [8]. Способы описания и сравнения отдельных признаков в данной статье не приведены, поскольку являются темой отдельных исследований. Достаточно рассмотреть их абстрактно с учетом формальных особенностей.

С точки зрения представления выделяют следующие группы признаков.

1. *Элементарные*. Принимают конечное число значений из заранее определенного множества. К ним относится, например, тип бумаги, тип краски, информация о принадлежности какой-либо части композиции и т.п. Данные признаки сравниваются по критерию точного совпадения.

2. *Скалярные*. Представляются вещественным числом и допускают тривиальное количественное сравнение с помощью порогового или статистического критерия. Таким признаком может являться, например, толщина фрагмента.

3. *Векторные*. Представляются набором значений, организованных в структуру данных. К ним относятся, например, контур фрагмента, цветовая палитра, дескриптор текстуры и т.п. Векторные признаки обладают наибольшей информативностью и требуют наибольших вычислительных затрат для их сравнения, которое может выполняться с использованием пороговых, статистических, логических, семантических или иных критериев. В большинстве задач основным векторным признаком является контур, так как он позволяет идентифицировать и локализовать область стыка [7].

С точки зрения сравнения признаки можно также разделить на три группы.

1. *Предварительные*. Позволяют разделить исходное множество фрагментов на отдельные классы, но не позволяют судить о возможности стыка между ними. В частности, не имеет смысла искать стык между фрагментами рукописного документа и фотографии или сравнивать фрагменты существенно разной толщины.

2. *Основные*. Служат для установления наличия стыка и локализации его области.

3. *Верификационные*. Их можно сравнить только после расчета взаимного положения фрагментов в соответствии с предполагаемым стыком. Например, направление строк текста в документе на соседних фрагментах должно совпадать с точностью до значения допустимой ошибки, однако проверить этот факт можно только после выполнения совмещения.

Для каждого признака фрагмента формируется дескриптор — структура данных, описывающая его либо явно (для элементарных и скалярных призна-

ков), либо с использованием заданной математической модели (для векторных). Совокупность дескрипторов отдельных признаков составляет дескриптор фрагмента.

Пусть дескриптор фрагмента F формально представлен совокупностью признаков $D(F) = \{T_1(F), T_2(F), \dots, T_n(F)\}$, где $T_i(F)$ — i -й признак фрагмента; n — общее их число. Пусть имеются два фрагмента F_1 и F_2 . Тогда совпадение признака T_i у этих фрагментов с точки зрения выбранного критерия обозначим равенством $T_i(F_1) = T_i(F_2)$, несовпадение — неравенством $T_i(F_1) \neq T_i(F_2)$. Возможна ситуация, когда значение признака не задано и считается нулевым, $T_i(F) = null$.

Формирование дескрипторов осуществляется при предварительной обработке исходных данных (изображений фрагментов).

2. Процедура поиска стыков

Процедура поиска стыков в качестве входных данных использует множество дескрипторов фрагментов, а в качестве выходных данных формирует список потенциально возможных стыков с описанием параметров каждого из них. Задача перебора пар фрагментов и сравнения признаков имеет квадратичную вычислительную сложность, что является критичным с точки зрения производительности, поскольку в реальных задачах число фрагментов исчисляется тысячами. При росте общего числа потенциально возможных пар фрагментов растет вероятность обнаружения ложных стыков, что также осложняет процесс реконструкции.

В качестве оптимального решения по организации процедуры перебора и поиска стыков предложена схема с разделением ее на три этапа (рис. 3), на каждом из которых происходит проверка отдельной группы признаков. Этапы включают в себя классификацию фрагментов, поиск стыков и их верификацию.

На этапе *классификации* на основе группы предварительных признаков выделяются непересекающиеся классы фрагментов, внутри которых выполняется дальнейший поиск. Это позволяет сократить множество, подлежащее перебору и распараллелить процесс обработки независимых классов.

На этапе *поиска* происходит перебор всех возможных пар фрагментов внутри каждого класса, проверяются основные признаки, и при нахождении стыка выполняется расчет взаимного положения фрагментов. Результатом данного этапа является ранжированный по весу список возможных стыков. В качестве веса выступает величина, учитывающая длину предполагаемой области стыка и число совпадающих признаков.

На этапе *верификации* проверяются признаки, которые невозможно проверить до пробного совмещения, и исключаются пары, не совпадающие с точки зрения этих признаков. В случае реализации интерактивного режима реконструкции на данном этапе реализуется процедура ручного утверждения стыков.

Трехэтапная процедура позволяет учесть неравнозначность признаков и обеспечить широкие возможности модификации.

В соответствии с предложенной схемой и особенностями признаков их общая совокупность делится на три группы: предварительные $TP = \{T_1, T_2, \dots, T_k\}$; основные $TS = \{T_{k+1}, \dots, T_m\}$; верификационные $TV = \{T_{m+1}, \dots, T_n\}$, где n — общее число признаков. Пусть имеются два фрагмента — F_1 и F_2 .

Алгоритм классификации строят на основе следующих правил.

1. Если $T_i(F_1) = T_i(F_2) \neq null$ для всех признаков $T_i \in TP$, то фрагменты относятся к одному классу $F_1 \in C_q, F_2 \in C_q, q$ — номер класса.

2. Если существует хотя бы один признак $T_i \in TP$, такой что $T_i(F_1) \neq T_i(F_2)$, $T_i(F_1) \neq null$, $T_i(F_2) \neq null$, то фрагменты относятся к разным классам: $F_1 \in C_q, F_2 \in C_p, p \neq q$.

3. Если существуют такие признаки $T_i \in TP$, значения которых хотя бы для одного из фрагментов не заданы ($T_i(F_1) = null$ или $T_i(F_2) = null$), то этот признак на классификацию не влияет, и она проводится по оставшимся признакам.

Требуется провести перебор всех фрагментов и для каждого текущего фрагмента выполнить сравнение значений дескрипторов его признаков со значениями, определенными для каждого класса. На основании этого выполняется либо отнесение фрагмента к одному из существующих классов, либо

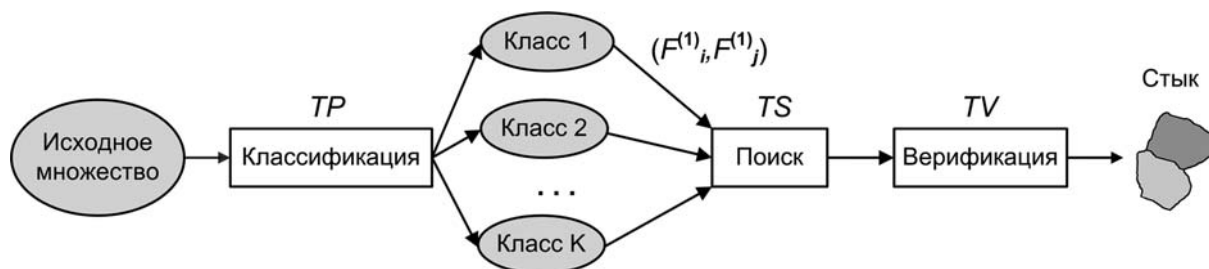


Рис. 3. Трехэтапная процедура поиска стыков: TP , TS , TV — соответствующие группы признаков (предварительные, основные, верификационные); $(F_i^{(1)}, F_j^{(1)})$ — текущая пара фрагментов из класса 1

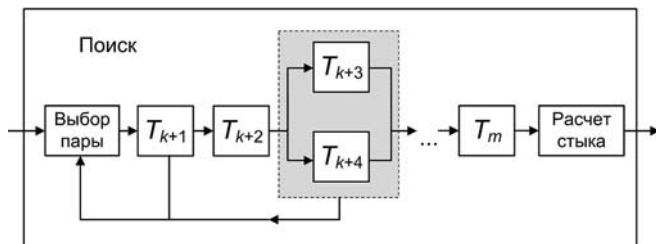


Рис. 4. Пример конвейера поиска. Признак T_{k+1} является обязательным, T_{k+3} и T_{k+4} образуют группу альтернативного выбора, прочие признаки являются вспомогательными (необязательными)

формирование нового, если класса с таким набором значений еще не существует.

Для поиска стыков на множестве из n фрагментов потребуется перебор $n(n-1)/2$ пар. При формировании двух независимых классов по $n/2$ фрагментов общее число пар будет уменьшено более чем в 2 раза. Таким образом, эффективная классификация существенно уменьшает число ненужных вычислительных операций.

Этап поиска предлагается реализовать в виде конвейера (рис. 4), который организуется в соответствии с протоколом сравнения — формальным описанием порядка проверки признаков группы TS и значимости каждого из них. Протокол сравнения индивидуален для каждой задачи и формируется экспертом. В случае совпадения некоторого признака процедура переходит к сравнению следующего и т. д. Ключевой особенностью является учет неравнозначности признаков: некоторые из них могут быть обязательными, а некоторые — вспомогательными.

Если признак является обязательным, то в случае несовпадения текущая пара отвергается, и алгоритм переходит к выбору новой пары (рис. 4). Если же он является вспомогательным, то факт совпадения или несовпадения фиксируется, а пара продолжает дальнейшее движение по конвейеру. Возможен вариант альтернативного выбора, когда обязательно требуется совпадение хотя бы одного из двух или более признаков.

Каждый найденный стык фрагментов характеризуется парой значений (l, w) , где l — длина стыка, w — вес, рассчитываемый как сумма весов вспомогательных признаков $w = r_{k+1}w_{k+1} + \dots + r_mw_m$. При этом $(m-k)$ — общее число признаков группы TS ; w_i — вес соответствующего признака $T_i \in TS$, а $r_i = 1$, если $T_i(F_1) = T_i(F_2)$ и $r_i = 0$, если $T_i(F_1) \neq T_i(F_2)$. Двухмерная метрика позволяет более гибко выбирать варианты при синтезе результирующей композиции.

Для оптимизации производительности протокол сравнения по возможности организуется так, чтобы отсеять больше ложных вариантов на ранних стадиях конвейера.

Процесс верификации организуется по принципу конвейера, аналогично процессу поиска. В слу-

чае реализации интерактивного режима реконструкции на данном этапе (как последней стадии конвейера) осуществляется процедура ручного выбора и утверждения стыков оператором-экспертом, который при необходимости может выполнить коррекцию взаимной привязки фрагментов для более качественной визуализации.

Результатом работы трехэтапной процедуры является список стыков с параметрами каждого из них (координаты границ области стыка, вес и другая необходимая информация). Процедура обеспечивает гибкость временных рамок, поскольку, например, классификацию удобно реализовать еще на этапе описания фрагментов, а верификация может быть выполнена независимо от поиска, что удобно при реализации интерактивного режима с оператором-экспертом. Обработка каждой потенциальной пары фрагментов является независимой, таким образом, задача обладает массовым параллелизмом, что должно быть учтено при разработке аппаратной и программной архитектуры комплекса для реконструкции.

3. Синтез композиции

На основе списка найденных стыков выполняется процедура синтеза композиции, позволяющая непосредственно реконструировать изображение исходного объекта. Модель композиции представляется неориентированным взвешенным графом, в котором каждая вершина соответствует фрагменту, ребро — стыку между фрагментами, а вес ребра является характеристикой стыка. Таким образом, на основе списка идентифицированных стыков необходимо построить набор графов, каждый из которых соответствует части исходного изображения, или же изображению целиком. При этом в исходном множестве могут содержаться фрагменты, как единственной композиции, так и множества отдельных композиций.

Пусть $G_{\text{общ}} = (V, E, w)$ — взвешенный граф связности, сформированный по результатам работы алгоритма поиска стыков, соответствующий множеству фрагментов, принадлежащих одному из непересекающихся классов. При этом V — множество вершин графа; E — множество ребер; w — выбранная весовая функция. Моделью реконструированной композиции (или ее части) является граф $G_{\text{комп}}$, являющийся покрывающим деревом для некоторого подграфа $G' \subset G_{\text{общ}}$ [9]. Выбор древовидной структуры обусловлен удобством хранения информации и обработки при последующей визуализации изображений. Задача синтеза композиции сводится к преобразованию общего графа в набор деревьев, соответствующих частям композиции, или в единственное дерево, соответствующее всей композиции, если таковое возможно.

Пусть L — общий список стыкующихся пар. Алгоритм синтеза композиции основан на поиске в

ширину и включает в себя следующие действия (рис. 5).

1. Выбор начального фрагмента с наибольшей длиной контура, который соответствует корневой вершине дерева с уровнем $d = 0$.
2. Формирование списка возможных стыков $L_d \subset L$ для фрагментов уровня d .

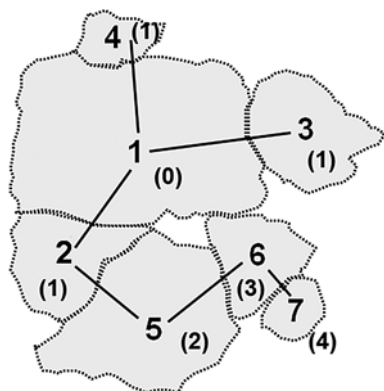


Рис. 5. Построение дерева композиции для некоторого изображения. Указан порядок добавления элементов и уровень вершин графа (в скобках)

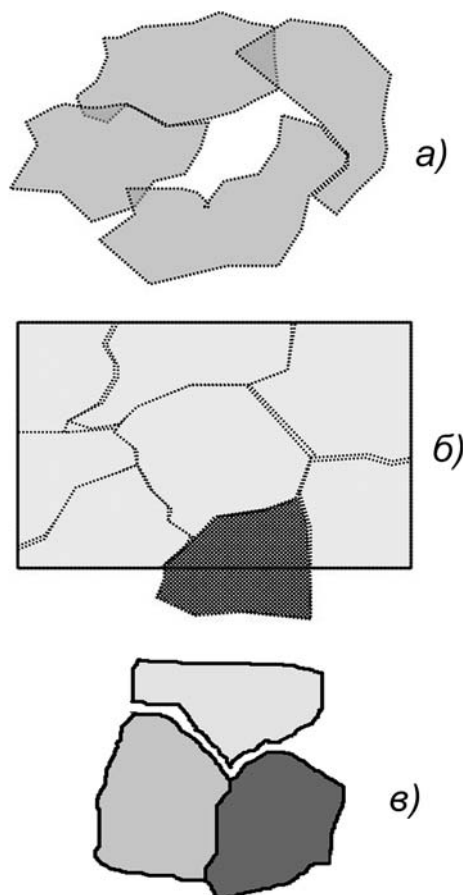


Рис. 6. Совместимость фрагментов: а — перекрытия недопустимы; б — размеры и форма композиции должны удовлетворять ограничениям; в — фрагменты, образующие общий угол, являются приоритетными

3. Выбор текущего стыка. Из списка L_d выбирается стык с наибольшей длиной контура l среди всех стыков с максимальным весом w . Возможны другие варианты выбора, определяемые спецификой задачи и экспериментом.

4. Проверка совместимости выбранного фрагмента с уже имеющейся частью композиции. Если обнаружен конфликт, то стык исключается, и происходит переход на шаг 3.

5. Стыковка выбранного фрагмента к текущей композиции. Визуализация. При этом добавленный фрагмент имеет уровень $d + 1$.

6. Повторение алгоритма с шага 3, до тех пор, пока есть доступные стыки для любого из фрагментов уровня d . Если таких кандидатов нет, то выполняется переход на следующий уровень $d = d + 1$, и алгоритм повторяется с шага 2 для всех фрагментов следующего уровня.

Если существуют независимые кластеры фрагментов, соответствующие несвязанным частям композиции, то алгоритм повторяется для каждого из них.

Совместимость фрагментов на локальном уровне (уровне отдельных стыков) не гарантирует глобальную совместимость на уровне всей композиции, поскольку возможно появление ложных или эквивалентных вариантов. Чтобы их избежать, на шаге 3 проверяются эвристические правила, гарантирующие, что фрагмент успешно встраивается в текущую композицию. Такими правилами являются, например, отсутствие перекрытий с уже состыкованными фрагментами, соответствие композиции заданным размерам (рис. 6) и т.п. Фрагменты, образующие общий угол, могут быть приоритетными для выбора, так как имеют стык с двумя фрагментами сразу. Эвристические правила могут быть достаточно разнообразны и их адекватный подбор повышает достоверность реконструкции.

Заключение

Данная статья является результатом теоретического анализа проблемы реконструкции. В настоящее время автором ведется экспериментальная отработка предложенных решений. Программные средства, включающие представленные методы, планируется внедрить на базе Новгородского музея-заповедника, где остро стоит проблема сохранения, реставрации и реконструкции объектов и предметов культурного наследия, однако такая работа является длительной и затратной.

Представленный подход предлагает решение проблемы комплексного использования совокупности отдельных признаков при решении задачи реконструкции изображения из фрагментов. Он может быть полезен при разработке как экспериментальных, так и полномасштабных прикладных программно-аппаратных комплексов для восстановления фрагментированных материалов в криминалистике, реставрации, археологии и других областях.

Принципиальной особенностью метода является поэтапное многоступенчатое отсеивание неподходящих вариантов, которое направлено на повышение достоверности конечного результата, и использование максимального количества доступной информации о свойствах фрагментов. Эти решения позволяют повысить производительность и результативность процесса реконструкции и труда специалистов. Преимуществом является универсальность и гибкость с точки зрения адаптации к различным задачам при сохранении общей логики процесса. Для достижения наилучших результатов требуется учесть как можно больше отдельных признаков фрагментов и применить адекватные методы описания и сравнения каждого из них.

Список литературы

1. **Leitao H. C., Stolfi J.** Multiscale method for the reassembly of two-dimensional fragmented objects // *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2002. V. 24. N. 9. P. 1239—1251.
2. **McBride J. C., Kimia B. B.** Archaeological fragment reconstruction using curve-matching // *Proc. of Conference on computer vision and pattern recognition CVPRW '03*. 2003. N. 1. P. 3—11.
3. **Deever A., Gallagher A.** Semi-automatic assembly of real cross-cut shredded documents // *Proc. 19th IEEE International Conference on Image Processing, ICIP 2012*, 2012. P. 233—236.
4. **Justino E., Oliveira L. S., Freitas C.** Reconstructing shredded documents through feature matching // *Forensic Science International*. 2006. V. 160. N. 2. P. 140—147.
5. **Amigoni F., Gazzani S., Podico S.** A Method for reassembling fragments in image reconstruction // *International conference on image processing ICIP 2003. Proceedings*. V. 2. P. 581—584.
6. **Shengjiao C., Hairong L., Shuicheng Y.** Automated assembly of shredded pieces from multiple photos // *IEEE International Conference on Multimedia & Expo (ICME)*. *Proceedings*. 2010.
7. **Наумов А. С.** Анализ методов описания контуров фрагментов при решении задачи синтеза изображения; НовГУ им. Ярослава Мудрого. Великий Новгород, 2010. — Деп. в ВИНТИ РАН 24.01.11, № 15-B2010.
8. **Наумов А. С.** Критерии сравнения характеристик фрагментов в задаче синтеза композиции; НовГУ им. Ярослава Мудрого. Великий Новгород, 2011. Деп. в ВИНТИ РАН 01.07.2011, № 315-B2011.
9. **Емеличев В. А., Мельников О. И., Сарванов В. И., Тышкевич Р. И.** Лекции по теории графов. М.: Наука, 1990. 384 с.

A. S. Naumov, Software Engineer, ООО Electra-N, Velikiy Novgorod, alex.naumov53@mail.ru

Method for Automated Reconstruction of the Fragmented Images Based on Multiple Fragment Features

Article deals with a problem of the automated fragmented images reassembling in application to the object reconstruction in forensics, archaeology, restoration, archive science and other fields. The basic idea involves using a two-dimensional digital images and additional information to automatically search matching fragment pairs in order to reconstruct entire image. The key feature of the presented approach is concerning multiple fragment features to use all available fragment information. It allows building effective tools for reconstruction process that minimizes manual job in compare to traditional methods. Article presents universal match searching method and image synthesis algorithm. Match searching includes 3 stages: classification, search and verification. Classification stage divides initial fragment set into several independent classes. Search stage performs feature comparison between all possible fragment pairs in each class and calculates junctions if they exist. Verification stage compares features that are not possible to deal before junctions are calculated.

Pipeline processing on the search stage allows to build flexible solutions for particular applied problems by variation of the set of used features, criterions, order of comparison, significance etc., while general scheme remains the same. Image synthesis algorithm is based on a breadth-first search graph algorithm and uses pairs of fragments to form entire composition image. Article shows advantages and significance of the developed methods. Presented results could be useful in a program tools development for actual applications.

Keywords: fragment matching, image reconstruction, classification, search, verification, graph, fragment descriptor, breadth-first search, pipeline processing

References

1. **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.
2. **McBride J. C., Kimia B. B.** Archaeological fragment reconstruction using curve-matching, *Proc. of Conference on computer vision and pattern recognition CVPRW'03*, 2003, no. 1, pp. 3—11.
3. **Deever A., Gallagher A.** Semi-automatic assembly of real cross-cut shredded documents, *Proceedings 19th IEEE International Conference on Image Processing, ICIP 2012*, pp. 233—236.
4. **Justino E., Oliveira L. S., Freitas C.** Reconstructing shredded documents through feature matching, *Forensic Science International*, 2006, vol. 160, no. 2, pp. 140—147.
5. **Amigoni F., Gazzani S., Podico S.** A Method for reassembling fragments in image reconstruction, *International conference on image processing ICIP 2003. Proceedings*, vol. 2, pp. 581—584.
6. **Shengjiao C., Hairong L., Shuicheng Y.** Automated assembly of shredded pieces from multiple photos, *IEEE International Conference on Multimedia & Expo (ICME)*, 2010, *Proceedings*.
7. **Naumov A. S.** Analiz metodov opisanija konturov fragmentov pri reshenii zadachi sinteza izobrazhenija, NovGU im. Jaroslava Mudrogo, Velikiy Novgorod; 2010. Dep. v VINITI 24.01.11, № 15-V2010.
8. **Naumov A. S.** Kriterii sravnenija harakteristik fragmentov v zadache sinteza kompozicii, NovGU im. Jaroslava Mudrogo, Velikiy Novgorod, 2011. Dep. v VINITI RAN 01.07.2011, № 315-V2011.
9. **Emelichev V. A., Mel'nikov O. I., Sarvanov V. I., Tyshkevich R. I.** Lekcii po teorii grafov, Moscow, Nauka, 1990.