

УДК 004.04

АЛГОРИТМ РАЗДЕЛЕНИЯ ЧЕЛЮСТЕЙ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ ПАНОРАМНЫХ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

М. В. Привалов, З. Сабо, А. Базько
Донецкий национальный технический университет
max@asu.dgtu.donetsk.ua
Чешский технический университет
szabozol@fbmi.cvut.cz
dicerona@gmail.com

Привалов М.В., Сабо З., Базько А., Алгоритм разделения челюстей при распознавании панорамных стоматологических изображений. В настоящее время все современные зубоорачебные клиники имеют рентгеновское оборудование, которое активно используется в процессе лечения заболеваний. С помощью данного оборудования можно получать интраоральные и экстраоральные снимки. На данных изображениях могут присутствовать зубы, обе челюсти, носовая полость и часть синуса. Изображения данных модальностей используются для обнаружения скрытых дефектов, поиска патологических образований на кончиках корней зубов, помощи при лечении корневых каналов зубов и в других подобных случаях. В данной статье рассматривается построение алгоритма для разделения верхней и нижней челюсти на основании морфологических операций.

Введение.

Рентгеновская диагностика и её более современный и совершенный вариант, компьютерная томография, используются в настоящее время во всех медицинских учреждениях во всём мире, а также в большинстве стоматологических клиник. Такой способ диагностики является эффективным для обнаружения таких проблем как кариес коронковой и корневой части зуба, кист и опухолей, дефектов челюстной хирургии, повреждений костей, а также неоднородности костной ткани. Другой областью применения является идентификация в автоматизированных системах дентальной идентификации (ADIS). При этом инвазивность данных методов обследования является низкой и они безболезненны для пациентов. Основными модальностями, используемыми врачами для поиска перечисленных ранее проблем, являются: прикусовая, периапикальная и панорамная. Прикусовые изображения дают подробную информацию о зубах, расположенных в области губ. Приапикальные детально отображают один отдельно взятый зуб. Панорамные же изображения содержат развёртку всей области, включая челюсти и зубы. Благодаря тому, что панорамные изображения дают полное представление обо всей картине и метод получения этих изображений надёжный и точный (более высокую точность может обеспечить уже только более дорогая компьютерная томография), данный метод является достаточно популярным у врачей-стоматологов. Ниже, на рис. 1, приведен пример панорамного стоматологического изображения.



Рис. 1. Пример панорамного стоматологического рентгеновского изображения.

Однако, любая диагностика, проводимая доктором с использованием изображений, является субъективной и при этом нередко порождает проблематичный выбор из множества возможных диагнозов в отсутствие формального описания изображения. Данная проблема может быть решена путём создания компьютеризированной диагностической системы, которая бы использовалась в процессе диагностики и лечения. В настоящее время компьютерное оборудование присутствует практически в любой клинике, поэтому разработка и развёртывание компьютерной системы поддержки принятия решений, способной выполнять сегментацию изображений, подчёркивание и визуализацию важных свойств изображения, а также выдавать врачу советующее диагностическое решение, позволит объективизировать диагноз, повысить скорость и снизить трудоёмкость его вынесения. Перед тем как сгенерировать решение-совет, система должна выполнить сегментацию входного изображения и извлечь важную информацию, необходимую для дальнейшей

обработки и предъявления на вход системы поддержки принятия решений.

Современное состояние вопроса.

Группы учёных по всему миру проводили исследования в направлении построения алгоритмов сегментации панорамных стоматологических изображений. В работе [1] был предложен метод для выполнения сегментации стоматологических панорамных изображений для идентификации человека в системе ADIS. Метод базируется на разделении челюстей, основанном на суммировании интенсивностей пикселей, а также на применении вероятностных признаков и «жадном» сканировании изображения для идентификации зубов на изображении. Предложенный метод работает на качественных изображениях, но при этом непригоден для отсканированных снимков и случаев, когда невозможно разделить зубы прямыми линиями. Методы, предложенные в работах [2] – [5], основаны на математической морфологии, применяемой как на стадии разделения челюстей, так и на стадии выделения зубов. Подход, описанный в [2] использует методы статистического обучения для выбора области интереса (ROI), а также признаковую классификацию для распознавания кариеса. Метод показывает достаточно хорошую производительность, но согласно исследованиям авторов, может давать неверные результаты для изображений, на которых присутствует шум, обусловленный сканированием, имеются отсутствующие зубы или зубы расположены так, что накладываются друг на друга на снимке. В [3] морфологическая предобработка используется совместно с морфологическим извлечением данных. Детектирование зубов предлагается авторами выполнять путём полного перебора сдвига точек эталонного контура с целью сопоставления точкам, определенным с помощью морфологических операций. Более перспективный метод описан в [6], где предложена комбинация морфологических операторов с модифицированным оператором водораздела. Использован водораздел, основанный на дистанционном преобразовании. Однако, морфологические методы не единственные методы, с помощью которых исследователи предлагают выполнять разделение челюстей и эффективную сегментацию панорамного изображения. В ряде работ в основе таких алгоритмов лежат алгоритмы сегментации, основанные на минимизации энергии. Например, в [7] и [8] в основе метода лежат алгоритмы активных контуров различных модификаций: алгоритм геодезических активных контуров и алгоритм активных контуров без границ. Применяются также методы, основанные на

вариационных методах функции уровня [9] и простые методы порогового ограничения [10]. Основываясь на проведенном исследовании состояния вопроса автоматической сегментации панорамных изображений, можно выделить следующие этапы обработки панорамных стоматологических изображений:

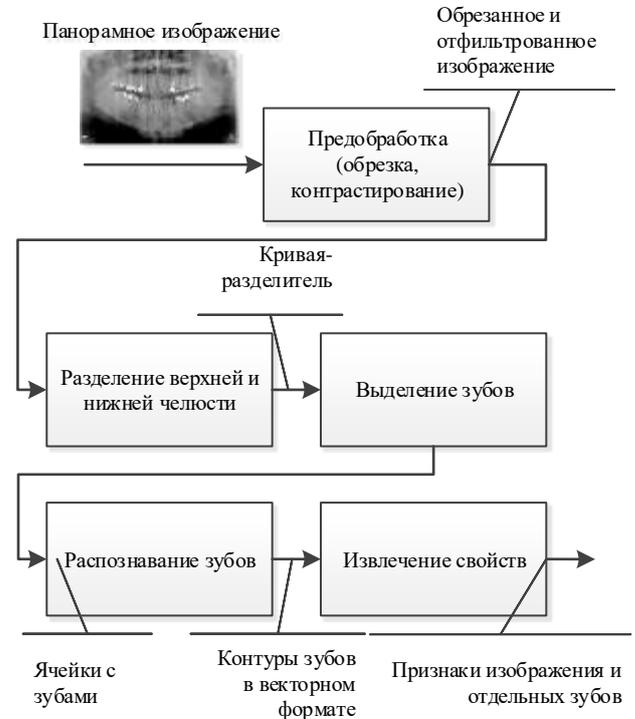


Рис. 2. Этапы сегментации панорамного стоматологического изображения.

Более подробно методы сегментации панорамных медицинских изображений описаны в [11].

Одним из первых этапов является разделение челюстей на изображении, и от результатов выполнения этого этапа зависят остальные этапы обработки. Разделение челюстей может быть выполнено несколькими путями. Один из подходов – определить долину между зубами в соответствии с минимальной точкой на вертикальной диаграмме и с учётом пользовательского ввода, как показано в работах [1] и [13]. Алгоритм строит разделительную линию, сглаживая её сплайном. Однако данная процедура требует контроля пользователя, поэтому не является полностью автоматизированной. Другой подход заключается в приближении разделительной кривой полиномом высокой степени [2]. Для построения такой кривой авторы предлагают равномерно расставить точки вдоль оси X. Для предотвращения резких провалов и скачков кривой к позициям точек добавлены ограничения:

$$p_i(x_i, y_i) = \begin{cases} p_i(x_{i+1} + T, y_i), & |p_i(x_i, y_i) - p_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})| > T \\ p_i(x_i, y_i), & \text{иначе} \end{cases}$$

Здесь T – порог, введенный с целью ограничить резкие изменения, например, при отсутствующих зубах. После распределения точек конечная кривая аппроксимируется с использованием метода наименьших квадратов полиномом:

$$p_0 = a_0 + a_1x + \dots + a_{10}x^{10}.$$

Подходы в [7] и [8] основаны на использовании алгоритмов минимизации энергии, основанных на известном методе активных контуров.

Таким образом, существуют различные методы разделения челюстей на изображении, но они не всегда учитывают качество входной информации и не всегда автоматические.

Постановка задачи.

Целью разделения верхней и нижней челюсти на цифровом панорамном стоматологическом изображении является отделение на изображении зубов и тканей верхней челюсти от зубов и тканей нижней, что даст отправную точку для их раздельного анализа. Конечным результатом сегментации будет получение контура в форме последовательности узловых точек. При этом следует учитывать факт наличия в медицинских учреждениях большого количества отсканированных рентгеновских снимков в различных цифровых форматах, что обуславливает необходимость учитывать наличие артефактов сканирования и сжатия.

Решение задачи.

Панорамные стоматологические рентгеновские изображения могут поступать на обработку в систему из различных источников. В идеальном случае, они поступают в цифровом виде в формате DICOM напрямую от медицинского оборудования и содержат яркостную информацию высокого разрешения (как правило, 12-16 бит на пиксель). Однако, помимо этого, в качестве входной информации могут быть снимки, оцифрованные на различном оборудовании и в различных форматах. В этих случаях приходится обрабатывать растровые изображения в различных форматах: от полутоновых изображений с глубиной цвета 8 бит на пиксель до полноцветных изображений с глубиной цвета 24 бита на пиксель. В связи с этим перед разделением челюстей нужна предварительная обработка изображения. Её целью в нашем случае является повышение разницы между светлыми и темными регионами, а также устранение артефактов сканирования плёнки, если таковые присутствуют. В [5], [6],

[9]-[12] для этого предлагается использовать морфологические операторы открытия и закрытия и основанные на них преобразования top-hat и bottom-hat.

Пусть входное изображение I , а структурный элемент b , тогда определение преобразования top-hat будет выглядеть следующим образом:

$$I_{top} = I - (I \circ b). \quad (1)$$

Здесь оператор $I \circ b$ обозначает морфологическое открытие I с использованием структурного элемента b , определенного через базовые операторы эрозии \ominus и дилатации \oplus следующим образом:

$$I \circ b = (I \ominus b) \oplus b.$$

Преобразование bottom-hat определено следующим образом:

$$I_{bot} = (I \cdot b) - I. \quad (2)$$

Более подробно вопрос предобработки рассмотрен в [11], где показано, что хорошие результаты могут быть достигнуты с использованием следующего преобразования:

$$I_E = I + I_{top} - I_{bot}. \quad (3)$$

Пример изображения с рис. 1 после предобработки показано ниже (рис. 3).



Рис. 3. Изображение после предобработки в соответствии с (3).

При необходимости перед или после предобработкой можно осуществить обрезку изображения по краям. Такая операция потребует для того, чтобы убрать боковую засветку, которая появляется после сканирования снимков (твёрдых копий) для их перевода в цифровой формат. С учетом того, что примерно 25-30% изображения не содержат полезной для распознавания информации, по обьём размерностям можно оставить 75% информации.

Далее, имея изображение с подчеркнутым контрастом, можно начать построение разделяющего контура. Согласно постановке задачи, требуется получить векторное представление контура и решить ряд проблем, описанных ранее. В качестве отправной точки можно выбрать прикусную пластину, которая

используется для фиксации положения челюстей пациента.



Рис. 4. Пластина, прикусываемая пациентом.

Далее, контур строится от неё в обоих направлениях. Основная идея заключается в том, что точка последовательно ставится на некотором расстоянии от предыдущей. В качестве критерия вполне подойдет минимум среди горизонтальных сумм яркостей изображения $I(x, y)$ в окне размером $N \times N$ пикселей.

$$F_l = \min^y f_y, \text{ где } f_y = \sum_{x=1}^N I(x, y). \quad (4)$$

Для расчетов следует выбирать N достаточной величины для захвата долины и краёв зубов сверху и снизу. Такой критерий хорошо подходит для поиска долины между краями зубов при отсутствии дефектов. В случае неоднородного фона, а также в случае отсутствия некоторых зубов следующая точка может «провалиться» вниз или «взлететь» вверх. В результате будет получен резко меняющийся контур. Пример показан на рис. 5.



Рис. 5. Разделительный контур, построенный без учета кривизны.

Таким образом, возникает необходимость снизить влияние мелких деталей на изображении и сделать контур плавным.

Для снижения влияния мелких деталей на результат разделения предлагается выполнить гауссовское размытие изображения. С этой целью производилась свёртка с ядром гауссовского фильтра размером 15×15 пикселей. Чуть сложнее дело обстоит с контролем

кривизны разделительной линии. Простым и очевидным критерием является величина вертикального отклонения точки от положения предыдущей:

$$f_c = \Delta y = y_2 - y_1, \quad (5)$$

для точек $p_1(x_1, y_1)$ и $p_2(x_2, y_2)$ соответственно. Но у данного критерия есть проблема, связанная с тем, что чем больше размер окна для анализа области около начальной точки, тем меньше кривизна контура при одном и том же вертикальном отклонении. Данный недостаток можно преодолеть, используя в качестве критерия величину, не зависящую от размера окна. Один из вариантов: использовать компоненту внутренней силы, действующей на активный контур. В качестве такой компоненты целесообразно использовать «энергию кривизны» [14]. Её задача – пытаться придать замкнутому активному контуру форму окружности, а открытому – форму прямой

$$f_c^y = E_{cv} = \|p_{i-1} - 2p_i + p_{i+1}\|^2. \quad (6)$$

Другим, аналогичным, вариантом может быть модуль разности нормализованных векторов, построенных между базовой и предыдущей точкой и между следующей и базовой.

$$f_c^y = \|v_2 - v_1\|, \quad (7)$$

где v_1 и v_2 – нормализованные векторы между точками p_i и p_{i-1} и точками p_{i+1} и p_i , соответственно. С учётом сказанного и выражения (4), положение новой точки определяется путём минимизации функции

$$F_l = \min^y (f_y + \alpha f_c^y), \quad (8)$$

где α – коэффициент штрафа, определяемый на основании дисперсии яркостей в окрестности стартовой точки алгоритма. Данное выражение учитывает как интенсивность пикселей и налагает штраф на кривизну, что препятствует резким отклонениям точек и даёт плавный контур. Хорошие результаты были получены для $\alpha=2,5$. Пример результата показан на рис. 6.



Рис. 5. Разделенные челюсти в отсутствие штрафа на кривизну контура (а) и с ним (б).

Выводы.

В результате анализа существующих методов сегментации панорамных стоматологических изображений определены основные этапы обработки, включающие предобработку, разделение челюстей, выделение ячеек с зубами, распознавание зубов, извлечение признаков. Предложен вариант предобработки на основе морфологических операторов top-hat и bottom-hat.

Для построения разделительной кривой предложено минимизировать функцию, представляющую собой результат интегрирования изображения по горизонтали в окне с функцией штрафа на кривизну контура. Предложено использовать в качестве такой функции энергию кривизны из алгоритма активных контуров.

Направлением дальнейших исследований является построение алгоритма изоляции зубов на изображении с целью их дальнейшего распознавания.

Литература.

1. Wanat R., Frejlichowski D. A problem of automatic segmentation of digital dental panoramic X-ray images for forensic human identification. // Proceedings of CESC 2011: The 15th Central European Seminar on Computer Graphics, 2011. - p.165-172.
2. João Paulo Ribeiro de Oliveira. Caries detection in panoramic dental X-ray images. // Department of Computer Science of University of Beira Interior. Thesis for the degree of Master in Science, 2009. - p. 33-36.
3. Lira P.H.M., Giraldo G.A., Neves L.A.P. Using the mathematical morphology and shape matching for automatic data extraction in dental X-ray images. // National Laboratory for Scientific Computing Petropolis, RJ, Brazil, 2013.
4. Lira, P.H.M., Giraldo, G.A., Neves L.A.P.. Panoramic dental X-ray image segmentation and feature extraction. // Conference: 2nd World Conference on Innovation and Computer Sciences, vol. 2, 2012. -p.188-197.
5. Said E.H., Nassar D.E.M., Fahmy G., Ammar H.H. Teeth segmentation in digitized dental X-ray films using mathematical morphology. // IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 1(2), 2006. - p.178-189.
6. Li, H., Sun, G., Sun, H., et al. Watershed algorithm based on morphology for dental X-ray images segmentation. // In: IEEE 11th Intern. Conf. on Signal Processing (ICSP), 2, IEEE, Beijing, 2012. - p.877- 880.
7. Al-Sherif N., Guo G., Ammar H.H. A new approach to teeth segmentation. // ISM '12 Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Multimedia, 2012. - p.145-148.
8. Harandi A.A., Pourghassem H., Mahmoodian H. Upper and lower jaw segmentation in dental X-ray image using modified active contour. // Intelligent Computation and Bio-Medical Instrumentation (ICBIMI), 2011 International Conference on, 2011. - p.124-127.
9. Zoroofi M.H.R.A., Ali Shirani A.G. Segmentation of teeth in CT volumetric dataset by panoramic projection and variational level set. // International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, vol. 3, issue 3-4, 2008. - p.257-265.
10. Dighe S., Shriram R. Preprocessing, segmentation and matching of dental radiographs used in dental biometrics. International Journal of Science and Applied Information Technology, vol. 1(2), 2008. - p.52-56.
11. Tesař J., Pryvalov M., Szabó Z., Přehled metod pro automatickou segmentaci horní a dolní čelisti v intraorálních, nebo extraorálních rentgenových snímcích // Proc. Medsoft-2015, 2015. - p.196-201.
12. Lin, P.-L., Huang, P.-W., Cho, Y.S., Kuo, C.-H. (2013). An automatic and effective tooth isolation method for dental radiographs. Opto-Electronics Review, vol. 21, number 1, 126-136.
13. Jain, A., K., Chen H. (2004). Matching of dental X-ray images for human identification, Pattern Recognition, vol. 37, 1519-1532.
14. Mackiewicz B., Intracranial Boundary Detection and Radio Frequency Correction in Magnetic Resonance Images // Simon Fraser university, master of Science thesis, 1995. - 195p.

Привалов М.В., Сабо З., Базько О., Алгоритм розділення щелеп при розпізнаванні панорамних стоматологічних зображень. В теперішній час всі сучасні стоматологічні клініки мають рентгенівське обладнання, яке активно використовується в процесі лікування захворювань. За допомогою даного обладнання можна отримувати інтраоральні та екстраоральні знімки. На даних зображеннях можуть бути в наявності зуби, обидві щелепи, носова порожнина і частина синусу. Зображення цих модальностей використовуються для знаходження прихованих дефектів, пошуку патологічних утворень на кінчиках коренів зубів, допомоги при лікуванні кореневих каналів зубів та в інших подібних випадках. В цій статті розглядається побудова алгоритму для розділення верхньої та нижньої челюсті на основі морфологічних операцій.

Ключові слова.

Панорамне рентгенівське стоматологічне зображення, математична морфологія, перетворення top-hat, перетворення bottom-hat, інтегрування, активний контур.

Privalov M., Szabo Z., Bazko A., Jaws separation algorithm for recognition of panoramic dental images. At present time all modern dental hospitals have X-Ray equipment which is actively used in treatment process. Using this equipment it is possible to acquire intraoral and extraoral images. These images can contain dentition, both jaws, temporomandibular joints, nasal cavity and the portion of the maxillary sinus. These visual modalities are being used to detect hidden defects, to find pathological creations at the tip of the tooth root, to help during curing of teeth root channels etc. In this paper described algorithm for upper and lower jaw separation based on morphological operators.

Keywords.

Panoramic X-Ray dental image, mathematical morphology, top-hat and bottom-hat transform, integration, active contour.

*Стаття постуила в редакцію 20.09.2015
Рекомендована к публікації д-ром техн. наук В.Н. Павльшом*